Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do feijão no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas

Luís Alberto Silva Antolin

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Luís Alberto Silva Antolin
Engenheiro Agrônomo

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do feijão no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
PROF. DR. FÁBIO RICARDO MARIN

Co-orientador:
DR. ALEXANDRE BRYAN HEINEMANN

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Antolin, Luis Alberto Silva

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do feijão no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas / Luis Alberto Silva Antolin. – – versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. – – Piracicaba, 2019 .

82 p.

Dissertação (Mestrado) – – USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Modelagem 2. Mudanças climáticas 3. Segurança alimentar 4. *Phaseolus vulgaris* L . I. Título.

À minha mãe Siméia,

À minha avó Geralda,

E à minha companheira Karoline.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, pela oportunidade do curso de mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Ao Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa científica.

Ao Prof. Dr. Fábio Ricardo Marin, a quem possuo grande estima, dada sua orientação exemplar e por me permitir avançar sobre os meus limites. Seu profissionalismo e compromisso com o desenvolvimento científico, me servem como exemplos de sucesso para as minhas aspirações pessoais.

Ao Dr. Alexandre Bryan Heinemann, pelos ensinamentos trazidos desde a minha graduação e que foram de vital importância na realização deste trabalho, ao qual tive o prazer de recebê-lo como meu co-orientador, e que em nome da Embrapa Arroz e Feijão, pode contribuir significativamente para esta pesquisa.

Aos grupos GEPEMA (Grupo de Experimentação e Pesquisa em Modelagem Agrícola) e AGRIMET (Grupo de Pesquisa e Extensão em Meteorologia dos Cultivos Agrícolas), cujos membros contribuiram consideravelmente para a finalização dentre trabalho, e dos quais eu pude honrosamente fazer parte do corpo de pós-graduandos.

Às grandes amizades que pude construir ao longo desta jornada, principalmente aos meus amigos Evandro, Rodolfo e Tainã.

Aos meus irmãos que sempre me trouxeram motivação para triunfar sobre os meus desafios, Germano, Paulo e Magno.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

SUMÁRIO

RESUMO . . . 7
ABSTRACT . . . 8
Lista de Figuras . . . 9
Lista de Tabelas . . . 11
1 INTRODUÇÃO . . . 13
1.1 Objetivos . . . 14
1.1.1 Gerais . . . 14
1.1.2 Específicos . . . 14
REFERÊNCIAS . . . 15
2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE LOCAL DO MODELO DSSAT/CROPGRO-DRYBEAN PARA O SUDESTE BRASILEIRO . . . 19
Resumo . . . 19
Abstract . . . 19
2.1 Introdução . . . 20
2.2 Material e métodos . . . 21
2.2.1 Descrição dos parâmetros do modelo . . . 21
2.2.2 Descrição do método de análise sensibilidade local . . . 22
2.3 Resultados e discussão . . . 23
2.3.1 Índices de sensibilidade local . . . 23
2.3.2 Análise dos parâmetros . . . 23
2.3.3 Incertezas e limitações . . . 29
2.4 Conclusão . . . 29
REFERÊNCIAS . . . 30
3 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DSSAT/CROPGRO-Drybean PARA DIFERENTES GRUPOS COMERCIAIS DE FEIJÃO-COMUM DO BRASIL . . . 33
Resumo . . . 33
Abstract . . . 33
3.1 Introdução . . . 34
3.2 Material e Métodos . . . 35
3.2.1 Descrição da área de estudo . . . 35
3.2.2 Medidas biométricas . . . 36
3.2.3 Descrição do modelo . . . 36
3.2.4 Calibração do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean . . . 37
3.2.5 Análise estatística de desempenho da modelagem . . . 38
3.2.6 Análise pontual e temporal da variabilidade experimental . . . 39
3.3 Resultados e Discussão . . . 39
3.3.1 Variação ambiental dos experimentos de campo . . . 39
3.3.2 Calibração e avaliação de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean . . . 41
3.3.3 Interação genótipo x ambiente e sua representação pelo modelo . . . 44
3.4 Conclusão . . . 46
REFERÊNCIAS . . . 46
4 PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE FEIJÃO-COMUM EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS . . . 51
Resumo . . . 51

Abstract 51
4.1 Introdução 52
4.2 Material e Métodos 52
4.2.1 Definição das áreas representativas e Zonas Homogêneas 52
4.2.2 Caracterização dos solos predominantes 54
4.2.3 Cenários futuros de mudanças climáticas 54
4.2.4 Ajuste do modelo de crescimento de culturas 55
4.2.5 Análise da produção futura 55
4.3 Resultados 56
4.3.1 Mudanças climáticas esperadas 56
4.3.2 Cenários produtivos 56
4.3.3 Risco produtivo 61
4.3.3.1 Carioca 61
4.3.3.2 Preto 62
4.4 Discussão 63
4.5 Conclusão 65
REFERÊNCIAS 66
5 CONCLUSÕES GERAIS 71
ANEXOS 73

RESUMO

Simulação de cenários agrícolas futuros para a cultura do feijão no Brasil com base em projeções de mudanças climáticas

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta leguminosa que se destaca por ser uma das principais culturas agrícolas do mundo, com forte expressão cultural e econômica na agricultura brasileira. Com base na relevância do feijão no contexto mundial, é importante considerar as projeções futuras de produção dessa leguminosa dentro do debate internacional de mudanças climáticas e previsão do aumento populacional global, de 2 bilhões de habitantes, até o ano de 2050. Levando em consideração que o setor agrícola poderá ser um dos mais afetados com os efeitos das mudanças climáticas previstas para o decorrer do século XXI, o presente trabalho teve como objetivo simular a produção brasileira de feijão-comum para locais que representem, ao mínimo, 80% da quantidade produzida deste grão. Para isso, o modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean foi calibrado para dois grupos comerciais representativos ("Carioca" e "Preto"). Esta tarefa foi caracterizada pelo ajuste do modelo através da análise comparativa com dados observados, coletados a partir de experimentos conduzidos em Piracicaba-SP e Santo Antônio de Goiás-GO. As projeções climáticas foram obtidas por meio da metodologia recomendada pelo projeto internacional AgMiP (*Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*), do qual foram considerados os dados climatológicos estimados por 20 modelos de circulação global (GCM), para os cenários futuros de concentração atmosférica de CO_2 RCP 4.5 e RCP 8.5, em 24 zonas homogêneas que representam as características edafoclimáticas dos principais locais de produção no Brasil. Por fim, combinando-se as informações ambientais com o modelo de culturas, foi possível simular para o período de 2040 a 2070, a produtividade futura para cultura do feijão-comum. Observou-se que as mudanças climáticas acarretarão em aumento da produção nacional para a maioria das regiões produtoras, entretanto haverá aumento do risco de se produzir abaixo da média esperada em regiões de grande importância para a produção nacional, como os cultivos de 1ª safra de feijão "Preto" no Sul do Brasil, e para cultivos de 3ª safra (grupo comercial "Carioca") presentes no Centro-Oeste.

Palavras-chave: Modelagem; Mudanças climáticas; Segurança alimentar; *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

Simulation of future agricultural scenarios for the drybean crops in Brazil based on climate change projections

Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are leguminous plants which represents one of the main world crops, with strong cultural and econnomical expression in Brazil's agriculture. Based on the common beans world relevance, it's important to consider the future projections for this crop production inside the international subject of climate change and the global population increase, predicted to 2 billion inhabitants, untill 2050. Being aware that the agricultural sector would be severely affected by the effects of the predicted climate changes in 21^{st} century, the main goal of this work was simulate the Brazilian production of common beans for locals which represents at least 80% of the grain produced quantity. For that, the model DSSAT/CROPGRO-Drybean was calibrated for two representative commercial groups ("Carioca" and "Black"). This task was caracterized by the adjustment of the model through the comparatively analyse of observed data, colected on field experiments performed in Piracicaba/SP and Santo Antônio de Goiás/GO. The climate projections were obtained through a methodology proposed by the international AgMiP project (*Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project*), which were considered the climatological data estimated by 20 global circulation models (GCM), for scenarios of representative atmospheric CO_2 concentration pathwys RCP 4.5 and RCP 8.5, in 24 homogenic zones representing the edafoclimatic profiles of main producers in Brazil. Lastly, combining all environmental data with the crop model, was possible to simulate for the period of 2040 to 2070, the future producitivity for nacional common bean crops. Was observed that climate changes would accomplish a increase in the mean production for most of the regions, by the other hand, it will also increase the risk of productions above the expected average on key regions, as such the 1^{st} crops of "Black" beans in the south, and 3^{rd} crops (commercial group "Carioca) at the Middle-West.

Keywords: Crop modeling; Climate change; Food security; *Phaseolus vulgaris* L.

LISTA DE FIGURAS

2.1 Taxas de crescimento em função da temperatura do ar para leguminosas, utilizado pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean. Adaptado de BOOTE et al. (1998). 24
2.2 Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros EM-FL, FL-SH e FL-SD. 25
2.3 Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SD-PM, FL-LF e PPSEN. 26
2.4 Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SLAVR, SIZLF e WTPSD. 27
2.5 Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SFDUR, SDPDV e PODUR. 28
2.6 Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação do parâmetro THRSH. . . 29

3.1 Representação da área experimental em Piracicaba/SP (E1 e E2). 35
3.2 Registro das temperaturas máximas e mínimas do ar, e precipitação pluvial, ao longo dos experimentos E1 (A) e E2 (B). 40
3.3 Balanço hídrico climatológico dos cultivos ao decorrer dos experimentos E1 (A) e E2 (B), apresentado o déficit (DEF) e excedente hídrico (EXC), bem como a evapotranspiração de referência (ETc), real (ETr) e potencial da cultura (ETc). O valor de CAD adotada foi de 100 mm. 40
3.4 Variação ao longo do ciclo das variáveis índice de área foliar (IAF)(A), massa seca da parte aérea (MSA)(B) e massa seca de grãos (MSG)(C), para os experimentos E1(1), E2(2) e E3(3), cultivar BRS Esplendor. 42
3.5 Variação ao longo do ciclo das variáveis índice de área foliar (IAF)(A), massa seca da parte aérea (MSA)(B) e massa seca de grãos (MSG)(C), para os experimentos E1(1), E2(2) e E3(3), cultivar Pérola. 43
3.6 Análise descritiva da distribuição dos resultados referentes a simulação do índice de área foliar máximo obtido (IAFmax)(A), Produtividade de grãos (B) e Biomassa total ao fim do ciclo (C), para os três experimentos e as cultivares BRS Esplendor (1) e Pérola (2). 45

4.1 Informação da produção nacional de feijão-comum dos grupos comerciais “Cores” (A) e “Preto” (B), dividido por Estados (1) e por regiões (2). 53
4.2 Distribuição das 24 Zonas Homogêneas que englobam todos os municípios produtores de feijão-comum presentes na área representativa da produção brasileira do grão. 54
4.3 Variação média esperada para a temperatura do ar (A) e volume de chuvas (B), nos cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), tomando como base os valores atuais. 56
4.4 Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão “Carioca”. 57
4.5 Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 2ª safra, com relação a produção atual – Feijão “Carioca”. 58
4.6 Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 3ª safra, com relação a produção atual – Feijão “Carioca”. 59
4.7 Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão “Preto”. 60
4.8 Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão “Preto”. 61

4.9 Variação do risco de se produzir abaixo da média esperada para o período de 2040 a 2070, em 1ª (A), 2ª (B) e 3ª (C) safra, cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2) – Feijão “Carioca”. 62
4.10 Variação do risco de se produzir abaixo da média esperada para o período de 2040 a 2070, em 1ª (A) e 2ª (B) safra, cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2) – Feijão “Preto”. 63

LISTA DE TABELAS

2.1 Lista dos parâmetros de cultivares utilizados pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean. 21
2.2 Intervalos utilizados para os parâmetros na realização da análise de sensibilidade local. 22
2.3 Parâmetros do Nitossolo Vermelho Eutroférrico latossólico para o modelo DSSAT/CROPGRO-SOYBEAN. Profundidade do solo (PROF), ponto de murcha permanente (PPM), capacidade de campo (CCA), ponto de saturação (PSA), fator de crescimento radicular (FCR), condutividade hidráulica saturada (CHS), densidade do solo (DSO), carbono orgânico (COR), teor de argila (ARG), teor de silte (SIL), pH em água (pH_{H_2O}) e capacidade de troca catiônica (CTC). 22
2.4 Índices de sensibilidade local dos parâmetros utilizados pelo modelo. 23
2.5 Temperaturas utilizadas em cada fase fenológica, em ºC. Sendo TB a temperatura basal inferior, TO1 e TO2 são as temperaturas limites da taxa ótima de crescimento, e TM é a temperatura basal superior. 24

3.1 Dados de entrada (propriedades do solo) para o modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean: Profundidade do solo (PROF), ponto de murcha permanente (PPM), capacidade de campo (CCA), ponto de saturação (PSA), fator de crescimento radicular (FCR), condutividade hidráulica saturada (CHS), densidade do solo (DSO), carbono orgânico (COR), teor de argila (ARG), teor de silte (SIL), pH em água (pH_{H_2O}) e capacidade de troca catiônica (CTC). 36
3.2 Lista dos parâmetros de cultivares utilizados pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean. 38
3.3 Médias das temperaturas máxima (TMAX), mínima (TMIN), média (TMED) do ar, bem como o somatório da radiação solar incidente (ΣSRAD) e do volume de chuvas (ΣRAIN) ao longo dos experimentos. 40
3.4 Parâmetros genéticos das cultivares BRS Esplendor e Pérola, calibrados a partir dos experimentos E1, E2 e E3. 41
3.5 Indicadores estatísticos de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para a cultivar BRS Esplendor, grupo comercial preto. Tal que $\overline{M}_{\mathrm{O}}$ e $\overline{M}_{\mathrm{S}}$ são os valores médios dos dados observados e simulados, respectivamente 42
3.6 Indicadores estatísticos de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para a cultivar Pérola, grupo comercial carioca. Tal que $\overline{M}_{\mathrm{O}}$ e $\overline{M}_{\mathrm{S}}$ são os valores médios dos dados observados e simulados, respectivamente 44
3.7 Teste de diferença significativa de Tukey para os valores médios de índice de área foliar máximo (IAF_{max}), produtividade e biomassa total produzida, por cada ciclo produtivo ao longo de 30 anos, com nível de significância (α) de 1%. 45

A.1 Nomenclatura utilizada pelo modelo para descrever os estádios fenológicos. 73
A.2 Descrição das ZH's identificadas, com detalhamento das estações climatológicas que as representam, bem como sua propoção quanto as áreas nacionais de produção de feijão-comum. 74
A.3 Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH. 75
A.4 Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH. 76
A.5 Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH. 77
A.6 Relação detalhada dos Modelos de Circulação Global (GCM) utilizados no trabalho, adaptado de RUANE et al. (2015). 78
A.7 Variação percentual da temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar, e da precipitação pluvial (RAIN), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, em diferentes Zonas Homogêneas (ZH). . . . 79
A.8 Variação da temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar(em ºC), e da precipitação pluvial (RAIN, em %), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, em diferentes Zonas Homogêneas (ZH). 80

A.9 Risco de se produzir abaixo da produção média esperada nas condições atuais (1988 a 2018) e para os cenários de RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070) - Feijão Carioca. 81
A.10 Risco de se produzir abaixo da produção média esperada nas condições atuais (1988 a 2018) e para os cenários de RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070) - Feijão Preto. 81
A.11 Variação percentual da produtividade média de grãos (PGr) e da produtividade média da água (PCh) para os cenários RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070), com relação as condições climáticas atuais (1988 a 2018) - Feijão Carioca. 82
A.12 Variação percentual da produtividade média de grãos (PGr) e da produtividade média da água (PCh) para os cenários RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070), com relação as condições climáticas atuais (1988 a 2018) - Feijão Preto. 82

1 INTRODUÇÃO

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é responsável pela principal fonte de proteínas na dieta de 400 milhões de pessoas que habitam as regiões dos trópicos (CIAT, 2016), o que contribui para caracterizar sua produção como predominante de países subdesenvolvidos, sendo considerada uma atividade voltada para pequenos e médios produtores, em todo o mundo.

O consumo nacional de feijão variou de 3,3 a 3,6 milhões de toneladas entre os anos de 2010 e 2015, e embora a recente alta nos preços tenha reduzido o consumo pela população, os valores ainda ultrapassam as 2,8 milhões de toneladas. A cadeia do feijoeiro possui uma fatia de 1,58% dos grãos produzidos no Brasil, onde a produção na safra 2015/2016 foi de 2512,9 mil toneladas e o esperado para a safra de 2016/2017 é de 3276,7 mil toneladas, representando um aumento de 30,4%, com exportações chegando até 120 mil toneladas (CONAB, 2017). É importante salientar que o Brasil se configura como o maior produtor e consumidor mundial de feijão (FAOSTAT ,2015; IBGE, 2015).

Tal importância socioeconômica para o país, a extensão de terras e da meta de crescimento anual da produção de feijão é importante incluir nesse contexto a importante discussão em torno das mudanças climáticas globais da última década. Tais mudanças climáticas estão relacionadas com o aumento da concentração de CO_2 atmosférico que, segundo LONG et al. (2009), é maior do que era em qualquer momento dos últimos 26 milhões de anos e estima-se que a [CO_2] dobre durante este século. Segundo os referidos autores, plantas de metabolismo C3 como o feijão respondem positivamente, a curto prazo, com o aumento da [CO_2] através do aumento da fotossíntese líquida e diminuição da transpiração. Porém, em longo prazo, este aumento é muitas vezes compensado por regulação negativa da capacidade fotossintética.

Sabe-se, ainda, que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contêm uma série de incertezas oriundas dos diferentes componentes do sistema de análise (e.g. clima, culturas, práticas de manejo). Como alternativa, utiliza-se um conjunto de cenários climáticos possíveis ao invés de apenas uma simulação gerada por um único modelo (MOSS; EDMONDS; HIBBARD, 2010). Para isso, uma das formas cientificamente aceitas para se analisar os impactos das mudanças climáticas na agricultura é o uso de modelos de crescimento de plantas (MCP), baseados em processos biofísicos (ROSENZWEIG et al., 2013). Esses modelos são ferramentas consagradas na literatura científica para testes de hipóteses acadêmicas, bem como de avaliação de cenários e de impacto de mudanças climáticas na agricultura em escala mundial (EITZINGER et al. 2016; RAMIREZ CABRAL et al. 2016; ROSENZWEIG e PARRY, 1994), nacional (ADAMS; ROSENZWEIG; PEART, 1990) e regional (COSTA et al. 2009; MARIN et al, 2012).

A utilização dos MCP's normalmente baseia-se numa abordagem determinística e contam com incertezas associadas aos seus algoritmos, dados de entrada e parâmetros (RÖTTER et al., 2011). No entanto, um considerável avanço foi obtido no âmbito do projeto The agricultural model intercomparison and improvement Project (AgMIP), o qual possibilita a avaliação em grandes áreas, regiões e até mesmo do globo terrestre (ELLIOT et al., 2014). Segundo ROSENZWEING (2011), outro aspecto inovador é a possibilidade de simulações de cenários climáticos futuros e essa abordagem assume que as projeções climáticas futuras carregam diversas incertezas que tornam difícil a seleção de um cenário climático e, portanto, exigem que as simulações sejam realizadas para um conjunto de cenários produtivos. Nessa direção, o trabalho de Asseng, Ewert e Rosenzweig (2013) verificou que o uso de múltiplos modelos em paralelo foi suficiente para reduzir a incerteza das projeções para níveis suficientemente baixos.

Em relação a temática de cenários climáticos futuros, estimativas recentes de temperatura publicadas no quinto relatório do IPCC, mostram aumento no patamar de 2,6 a 4,8 ºC no período de 2081-2100 em relação a 1986-2005, e indicam que a variabilidade e alterações do clima podem resultar em mudança na frequência de eventos extremos. Essas mudanças ocasionarão impactos que poderão ser sentidos pelos produtores até o final dessa década (PINTO et al., 2008), podendo ter uma importância econômica e social que supera de longe sua probabilidade de ocorrência aparente (THORNTON et al., 2009). Segundo estimativas obtidas pelo Modelo Brasileiro do Sistema

Terrestre (BESM), as perdas referentes à cultura do feijão em primeira safra, podem variar de 37% em 2025 a 39% em 2085, sendo que para segunda safra, são ainda piores, com perdas variando de 50,4% e 48,1% respectivamente (MCTI, 2016). Tais projeções, contudo, ressentem-se de não basearem em representações suficientemente detalhadas da fisiologia do feijoeiro e podem ter sido excessivamente pessimistas.

Para contornar tal limitação dos estudos e checar a coerência dessas projeções (e.g. PINTO et al., 2008; MCTI, 2016), a utilização desses modelos de crescimento de culturas conectados com as reais necessidades de discussão sobre o impacto das mudanças climáticas vem sendo alvo de estudos para a cultura do feijão no Brasil. Dentre esses modelos será enfatizado, na presente proposta, o modelo CROPGRO-Drybean (HOOGENBOOM et al. 1993; BOOTE et al. 1998), do sistema de suporte a decisão DSSAT.

O DSSAT/CROPGRO (HOOGENBOOM et al., 2003) é um modelo híbrido que tem como base algoritmos de processos de crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro, incluindo balanço hídrico do solo, biomassa e componentes rendimento. Utiliza-se um passo de tempo diário e foi projetado para simular o acúmulo de biomassa-planta e suas subdivisões (caule, raízes e folhas), absorção e fixação de nitrogênio, fenologia da planta, entre outras variáveis (HOOGENBOOM, AHUJA e ASCOUGH, 2005). O modelo requer parâmetros e dados de entrada que regulam o balanço hídrico do solo (capacidade de campo, ponto de murcha, saturação e profundidade do solo) e também variáveis meteorológicas (como a radiação solar global, temperatura do ar e precipitação) e de irrigação. Umidade relativa e velocidade do vento não são essenciais, mas são recomendados sempre que disponíveis. Nesse estudo será utilizado os resultados do modelo, CROPGRO-Drybean, seguindo as recomendações de ASSENG et al. (2013) para minimizar as incertezas em relação aos processos biofísicos adotados pelo modelo.

Outro aspecto que merece atenção no contexto deste projeto é o efeito da disponibilidade de água no solo sobre a cultura do feijão. Como o projeto pretende ampliar o escopo de simulações de produções futuras de feijão tendo em vista cenários de mudanças climáticas e tratando de diversos aspectos do sistema produtivo do feijão, não seria possível abordar todos eles com base em experimentação. Portanto, nesta proposta, dois experimentos (inverno e verão) foram conduzidos para aumentar o conhecimento sobre as relações hídricas da respectiva cultura. Sabe-se que os MCP´s são modelos compostos de submodelos que representam um escalonamento da unidade menor para a maior, respeitando uma hierarquia fisiológica na organização desses processos. Quanto à questão hídrica, esta abordagem significa que os algoritmos do modelo se baseiam na modelagem numérica de processos fisiológicos que se inicia pela absorção radicular e ascensão da seiva no colmo até a perda de água para a atmosfera através dos estômatos, sendo esse efeito integrado até a escala de uma lavoura. Por se tratar de modelos baseados em processos fisiológicos e biofísicos, é importante que a averiguação da qualidade dos algoritmos esteja baseada em experimentos adequados a esse propósito.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

Simular o crescimento da cultura do feijão ao longo de 30 anos nas principais regiões produtoras do Brasil e comparar os cenários climáticos futuros (2040 a 2070) com a condição atual (1980 a 2010).

1.1.2 Específicos

(i) Conduzir um experimento de campo para obtenção de dados que permitam calibrar um modelo baseado em processos;

(ii) Coletar dados de literatura que possam servir como suporte ao processo de calibração do modelo CROPGRO- Drybean;

(iii) Calibrar o modelo baseado em processo (CROPGRO-Drybean) para estimativa do crescimento e desenvolvimento da cultura do feijão e expressar o nível de incerteza alcançado;

(iv) Simular, para locais adequadamente selecionados, o desempenho da cultura do feijão ao longo de 30 anos, comparando a condição atual aos diferentes cenários de clima futuro.

REFERÊNCIAS

ADAMS, R.M.; ROSENZWEIG, C.; PEART, R.M. Global climate change and US agriculture. Nature, London, v.345, p.219-224, 1990.

ARNELL, N.W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. Glob Environ Chang 14(1):31–52, 2004.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. Nature Climate Change advance online publication, 2013.

Batjes, N.H. 2002. A Homogenized Soil Profile Data Set for Global and Regional Environmental Research (WISE, version 1.1). International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands, 2002.

BOOTE, K.J., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G., 1998. Simulation of crop growth: CROPGRO model, in: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), Agricultural Systems Modeling and Simulation. Marcel Dekker Inc, New York, Gainesville, Florida, pp. 651–692.

BRISTOW, K.L.; CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minumum temperature. Agricultural and Forest Meteorology, Amsterdan, v.31, p.159-166,1984.

BRUINSMA, J. World Agriculture: Towards 2015/2030: An FAO Perspective (Earthscan/James James, 2003). Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-y4252e.pdf>. Acesso em: 22 nov.2015.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira de grãos, Quinto Levantamento, Brasília, fevereiro/2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_02_16_11_51_51_boletim_graos_fevereiro_2017.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2017.

COSTA L C; JUSTINO F; OLIVEIRA L J C; SEDIYAMA G C; FERREIRA W P M; LEMOS C F. 2009. Potential forcing of CO2, technology and climate changes in maize (Zea mays) and bean (Phaseolus vulgaris) yield in southeast Brazil. Environ. Res. Lett. 4

EITZINGER, A., LÄDERACH, P., RODRIGUEZ, B. et al. Mitig Adapt Strateg Glob Change, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro, 2. Ed, 306p. ,2006.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University, 1977. 11p. (Special Report, 80).

FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. Feijão: ecofisiologia e fenologia. Produção de feijão. Piracicaba: ESALQ, p. 23-48, 2007.

GODFRAY, H.C.J; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R. Food security: the challenge of feeding 9 billion peo-

ple. Science, Washington, v.327, p.812-818, 2010.

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; SOUZA, T. L. P. O.; DIDONET, A. D.; DI STEFANO, J. G.; BOOTE, K.J.; JARVIS, A. Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil. Agricultural and Forest Meteorology, v. 225, p. 57–74, 2016

HERRIDGE D. F.; TURPIN, J. E.; ROBERTSON, M. J. Improving nitrogen fixation of crop legumes through breeding and agronomic management: analysis with simulation modelling. Australian Journal of Experimental Agriculture, v.41 , 391–401, 2001.

HOOGENBOOM, G., WHITE, J.W., JONES, J.W., BOOTE, K.J. BEANGRO: A Process-Oriented Dry Bean Model with a Versatile User Interface. Agronomy Journal. v. 86, p. 182–190, 1993.

HOOGENBOOM, G.; AHUJA, L.R.; ASCOUGH, J.C. Development and Evaluation of the RZWQM-CROPGRO Hybrid Model for Soybean Production. Agronomy Journal, Madisonn, v.97, p.1172-1182, 2005.

HUDSON, N.I., AND A.C. RUANE, 2015: Appendix 2. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R in Windows, Version 2.3. In Handbook of Climate Change and Agroecosystems: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP). C. Rosenzweig, and D. Hillel, Eds., ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation Vol. 3. Imperial College Press, 387-440

INTERNATIONAL CENTER FOR TROPICAL AGRICULTURE. About Bean Research. Disponível em: <https://ciat.cgiar.org/what-we-do/breeding-better-crops/beans>. Acesso em: 16 fev. 2017

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Producão agrícola municipal: área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da producão da lavoura temporária. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo9.asp?e=c&p=PA&z=t&o=11>. Acesso em: 06 jun. 2016.

JAVIS, P.G; MCNAUGHTON, K.G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. Advances in ecological research, vol 15, n.49, 1986.

KASTER, M; FARIAS, J.R.B. Regionalização dos testes de Valor de Cultivo e Uso e da indicação de cultivares de soja- terceira aproximação. Embrapa Documentos 330, Londrina, 2012.

LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.D. Crop Yield Gaps: the importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environment and Resources, Amsterdan, v.34, p.179-204, 2009.

LONG, S. P., AINSWORTH, E. A., ROGERS, A., ORT, D. R. (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the Future. Annu. Rev. Plant Biol., 55, 591-628. 2004.

MARIN, F., JONES, J., ROYCE, F., SUGUITANI, C., DONZELLI, J., NASSIF, D., 2011. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. Agronomy Journal 103, 304–311.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; ASSAD, E.D.; PELLEGRINO, G.Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yields in Southern Brazil. Climatic Change, London, v.1, p.101-110, 2012.

MARIN, F. R.; THORBURN, P.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison:Structural

differences and uncertainties under current and potential future climates. Environmental Modelling Software, v. 1, p. 1-2, 2015.

MCTI: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil, Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.mcti.gov.br/documents/10179/1727212/Modelagem+Clim\%C3\%A1tica+e+Vulnerabilidade+Setoriais+\%C3\%A0\%20Mudan\%C3\%A7a+do+Clima+no+Brasil/eeb454eb-95cc-455f-b856-a6df31b846a5>

MORGAN, P., BOLLERO, G. A., RANDALL, N. DOHLEMAN, F.G., LONG, S. Smaller than predicted increase in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air [CO2] elevation. Global Change Biology, 11, 1856–1865. 2005.

MOSS, R.H; EDMONDS, J.A.; HIBBARD, K.A. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, London, v.463, p.747-756, 2010.

MOURTZINIS, S.; SPECHT, J.E.; LINDSEY, L.E; WIEBOLD, W.J; ROSS, J.; NAFZIGER, E.D.; KANDEL, H.J.; MUELLER, N.; DEVILLEZ, P.L.; ARRIGA, F.J.; CONLEY, S.P. Climate induced reduction in US-wide soybean yields underpinned by region and in season specific responses. Nature Plants, Online, Article number: 14026. 02 fev.2015.

PEREIRA, C. R. Análise do crescimento e desenvolvimento da cultura de soja sob diferentes condições ambientais. Viçosa, 2002. 282 p. (Tese de doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2002.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; JUNIOR, J.Z.; EVANGELISTA, S. R. M.; OTAVIAN, A. F.; ÁVILA, A. M. H.; EVANGELISTA, B.; MARIN, F. R.; JUNIOR, C. M.; PELLEGRINO, G. Q.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Embrapa, São Paulo, 2008.

RAMIREZ-CABRAL, N. Y. Z; KUMARA, L.; TAYLO, S. 2016. Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. Agricultural and Forest Meteorology 218–219 (2016) 102–113.

ROSENZWEIG, C. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Progress and Preliminary Results. AGU Fall Meeting Abstracts -1, 02, 2011.

ROSENZWEIG, C.; ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A.C.; MÜLLER, C. ARNETH, A. Assessing Agricultural Risks of Climate Change in the 21st Century in a Global Gridded Crop Model Intercomparison, Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013. p.1-6.

ROSENZWEIG, C., PARRY, M.L. Potential impact of climate change on world food supply. Nature 367, 133–138, 2014.

RÖTTER, R. P.; CARTER, T. R.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. Crop-climate models need an overhaul. Nature Climate Change 1, 175–177, 2011.

SOUZA, A.P., GASPAR, M., SILVA, E.A., ULIAN, E.C., WACLAWOSKY, A.J., NISHIYAMA, M.Y. JR., SANTOS, R.V., TEIXEIRA, M.M., SOUZA, G.M., BUCKERIDGE, M.S. Elevated CO2 increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. Plant Cell Environ 31(8):1116–1127, 2008.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.41, n.9, p.1351-1359, set. 2006

THORNTON, P. K.; JONES, P. G.; ALAGARSWAMY, G.; ANDRESEN, J. Spatial variation of crop yield response to climate change in East Africa. Global Environment Change, v.19, p.54-65, 2009.

VAN WART, J., VAN BUSSEL, L.G.J., WOLF, J., LICKER, R., GRASSINI, P., NELSON, A., BOOGAARD, H., GERBER, J., MUELLER, N.D., CLAESSENS, L., VAN ITTERSUM, M.K., CASSMAN, K.G., 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crops Research 143, 44–55.

VU, J.C.V., ALLEN, L.H.J.R. Stem juice production of the C4 sugarcane (Saccharum officinarum) is enhanced by growth at double-ambient CO2 and high temperature. J Plant Physiol 166(11):1141–1151, 2009.

ZAFALON, M. Com terra mais disputada, o futuro reserva carne mais cara ao Brasil. Disponível: <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/07>. Acesso em 12 dez. 2015.

2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE LOCAL DO MODELO DSSAT/CROPGRO-DRYBEAN PARA O SUDESTE BRASILEIRO

Resumo

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das culturas mais presentes no ambiente tropical, cujo grão é uma das principais fontes de proteína na alimentação humana. No Brasil, o segundo maior produtor deste alimento, seu cultivo é feito em quase toda a extensão territorial do país. O emprego de modelos agrícolas baseados em processos para o estudo dos diversos fatores que compõem o ambiente agrícola tem sido difundido nas diversas áreas das ciências agrárias. Para seu uso adequado, é importante que sejam corretamente elucidados quanto ao seu esquema de funcionamento e quanto aos parâmetros e variáveis que participam das etapas percorridas no processo de simulação das culturas. Nestes modelos, os parâmetros incorporam características biofísicas que têm paralelo nos cultivos reais e que contribuem individualmente nos resultados expressos pelas variáveis de saída. A análise de sensibilidade pode contribuir para determinar quão sensíveis as variáveis de estado de um modelo são em relação aos seus parâmetros. Neste trabalho, analisou-se a sensibilidade local das variáveis de saída produtividade de grãos, duração do ciclo da cultura e índice de área foliar máximo ao longo do ciclo (IAFmax), em relação a 13 parâmetros do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean nas condições do sudeste brasileiro, para a cultura do feijoeiro-comum em regime de 1ª e 3ª safra. a maior sensibilidade do modelo foi expressa em relação a fenologia da cultura, enquanto foi considerada nula para o parâmetro SDPDV (número de sementes por vagem), para todas as variáveis de saída, devido a relação de inversa proporcionalidade com o parâmetro WTPSD (massa de um grão), ao qual apresenta pequena sensibilidade em relação à produtividade de grãos. O parâmetro PPSEN (resposta relativa do desenvolvimento da planta ao fotoperíodo) apresentou sensibilidade nula (3ª safra) ou baixa (1ª safra) para todas as variáveis de saída, explicitando a capacidade do modelo em representar a baixa dependência da planta de feijão ao fotoperíodo em condições de menor duração do comprimento do dia. Os parâmetros fenológicos (EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM, FL-LF), apresentam maior relevância na geração dos valores para as variáveis de saída deste estudo.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade; Modelagem agrícola; Feijão-comum

Abstract

Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are one of most present crops in tropical areas, which the grain is one of the main protein source in human feed. In Brasil, the second largest producer for this food, it's crops are performed at almost the entire territorial country extension. The application of process base crop modeling aimed to study many factor that compose the agricultural environment, has been diffused among areas of agricultural sciences. Thus, it is extremely important that these models are correctly elucidated about their operating scheme and the factor that participate on the steps followed by the process of simulating plants at field conditions. These models, in turn, have several parameters that incorporate characteristics found in real crops, to which individually contribute to the results obtained and expressed in the output's variables. Hence, the use of techniques to quantify the contribution of theses parameters, such as sensitivity analysis, may contribute to determine how sensitive the output variables of a mode are in relation to these parameters and input variables. In order to do so, the local sensitivity of the output variables grain productivity, cycle length and maximum leaf area index (IAFmax) were performed in relation to 13 parameters of the DSSAT/CROPGRO-Drybean model in the local conditions of Brazilian southeast region, for common beans in the 1st and 3rd crop regime. Among the analyzed parameters, the outputs presented greater sensitivity to those referring to crop phenology. The sensitivity was considered null for the parameter SDPDV (number of seed per pod), for all the output variables, due to the ration of inverse proportionality to the parameter WTPSD (mass of a single grain), which presents a small sensitivity in relation to Grain Productivity. The parameter PPSEN (relative plant development response to photoperiod), presented zero

(3rd crop) sensitivity or low (1st crop) for all the output variables, explaining the model's ability to represent the low dependence of the bean plant on the photoperiod conditions of shorter length of day. Phenological parameters (EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM, FL-LF), presents larger relevance on generating the output values for this study.

Keywords: Sensitivity analysis; Crop modeling; Common beans

2.1 Introdução

A utilização de modelos computacionais voltados para sistemas agrícolas tem sido amplamente aplicada para diversas áreas de estudo nas ciências agrárias (BOOTE; JONES; PICKERING, 1996). Seus usos são voltados para diversas questões, tais como a resposta dos cultivos às mudanças climáticas (MARIN; RIBEIRO; MARCHIORI, 2014), aplicações combinadas ao sensoriamento remoto e imageamento por satélites artificiais (DELÉCOLLE et al., 1992), bem como aspectos que envolvem os processos de tomada de decisões relacionadas a prática da agricultura de forma geral. Também, são aplicados como apoio no entendimento do deficit de produtividade potencial de culturas agrícolas, avaliações de adubação, monitoramento do crescimento dos cultivos, zoneamento agrícola, dentre outros (VAN ITTERSUM et al., 2003).

Modelos computacionais baseados em processos, que possuem como objetivo a representação do desenvolvimento dos cultivos agrícolas em condições de campo, dependem de um extenso conjunto de parâmetros que associam as particularidades das espécies abordadas e seus atributos genéticos(BOOTE; MÍNGUEZ; SAU, 2002).

Para que sejam identificados os parâmetros de maior e menor relevância na geração dos resultados obtidos pelos modelos, o uso de ferramentas como análises de sensibilidade são largamente empregadas (SALTELLI; CHAN; SCOTT, 2000), auxiliando na simplificação destes modelos pela exclusão de parâmetros que exercem menor influência nas características simuladas (CAMPOLONGO; TARANTOLA; SALTELLI, 2000). Dentre os diversos modos de utilização destas ferramentas, as análises de sensibilidade locais e globais são as mais comumente utilizadas (SALTELLI et al., 2004).

A análise de sensibilidade local se baseia na variação de um dado parâmetro θ, avaliando a posteriori, as perturbações nos valores obtidos em uma variável de saída X (GUSTAFSON; SRINIVASAN; WASSERMAN, 1996; OAKLEY; O'HAGAN, 2004). Por outro lado, a análise de sensibilidade global observa esta mesma perturbação na variável de saída X causada pela interação dos diferentes parâmetros que compõem o modelo, calculando a contribuição fracionada destes fatores na obtenção do resultado final (HOMMA; SALTELLI, 1996).

As duas metodologias anteriormente citadas são amplamente difundidas e aceitas para o entendimento e compreensão do padrão de funcionamento dos mais diversos modelos computacionais atualmente aplicados. Para determinar o quão sensível o modelo de simulação de culturas STICS (BRISSON et al., 1998) com relação aos seus módulos de processamento e os diferentes parâmetros que os compõem, RUGET et al. (2002) empregaram a análise de sensibilidade local para demonstrar que alguns parâmetros pouco interferem na obtenção das variáveis de resposta estudadas, como mineralização de nutrientes e o crescimento acumulado das raízes ao longo do ciclo. PATHAK et al. (2007) e VAN GRIENSVEN et al. (2006) utilizaram a análise de sensibilidade local dos parâmetros de maior importância, sob condições diferentes de disponibilidade hídrica, como base para a análise de sensibilidade global, quantificando não apenas a interação entre componentes que integram o modelo, mas a influência específica de cada fator.

Sendo assim, baseando-se na temática sobre a compreensão do funcionamento dos modelos aplicados aos sistemas agrícolas, o presente estudo tem por objetivo analisar a sensibilidade local do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean (BOOTE et al., 1998) para as condições de Piracicaba-SP.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Descrição dos parâmetros do modelo

A caracterização de parte das variáveis genéticas que compõem o crescimento e desenvolvimento da cultura do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é descrita, no modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean, por 18 parâmetros, dos quais 5 são relacionados a processos de desenvolvimento do cultivo e os demais aos processos de crescimento, assumidos como sendo específicos de cada cultivar.

A análise de sensibilidade local se deu através da variação de cada parâmetro dentro do espectro do que o modelo poderia representar de forma condizente à realidade. Uma vez que há pouca informação na literatura especializada sobre os limites máximos e mínimos para cada um dos parâmetros, tomou-se como base os valores utilizados para o registro das 199 cultivares cadastradas como padrão para a cultura do feijão dentro da plataforma DSSAT (JONES et al., 2003), aos quais compõem este registro por fazerem parte de trabalhos científicos já publicados, como SEXTON; WHITE; BOOTE (1994) e BOOTE et al. (2008). Para a realização deste estudo, foram selecionados apenas 13 parâmetros (Tabela 2.1), uma vez que os demais não apresentavam variação dentro do banco de cultivares disponível na base da plataforma, considerando-se desta forma, pouco relevante na variabilidade entre os diferentes materiais genéticos para feijoeiro-comum.

Tabela 2.1: Lista dos parâmetros de cultivares utilizados pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean.

Categoria	Parâmetro	Definição
Fenologia	EM-FL	Tempo entre a emergência e o início do florescimento da planta (R1) (dias fototérmicos, d.fot)
	FL-SH	Tempo entre R1 e início da frutificação (R3) (dias fototérmicos, d.fot)
	FL-SD	Tempo entre R1 e a formação da primeira semente (dias fototérmicos, d.fot)
	SD-PM	Tempo entre R5 e a maturação fisiológica (R7) (dias fototérmicos, d.fot)
	FL-LF	Tempo entre R1 e o fim da expansão foliar (dias fototérmicos, d.fot)
	PPSEN	Resposta relativa do desenvolvimento da planta ao fotoperíodo (1 h^{-1})
Desenvolvimento foliar	SLAVR	Área foliar específica (cm^2 g^{-1})
	SIZLF	Área foliar máxima do trifólio (cm^2)
Particionamento biomassa de grãos	WTPSD	Massa máxima por unidade de grãos (g)
	SFDUR	Duração do enchimento de grãos (dias fototérmicos, d.fot)
	SDPDV	Média de sementes por vagem (número por vagem, nº vg^{-1})
	PODUR	Tempo requerido para que a cultivar atinja a carga máxima de vagens (dias fototérmicos, d.fot)
	THRSH	Razão máxima entre semente e semente + vagem, na maturação (%)

Os limites de variação para cada parâmetro utilizado na análise de sensibilidade local estão descritos na Tabela 2.2, bem como a cultivar base. O procedimento foi realizado para duas safras e, portanto, se utilizou de duas calibrações da cultivar Pérola como base, cujos parâmetros definidos foram determinados para os regimes de 1ª e 3ª safra (semeadura realizada em 08/05/2018 e 08/12/2018, respectivamente), visando observar o contraste do material genético em épocas diametralmente opostas com respeito às condições climáticas locais (SENTELHAS et al., 1999).

Os dados meteorológicos utilizados – temperatura do ar máxima e mínima (ºC), chuva (mm) e radiação solar global (MJ m^{-2}) – foram coletados no Posto Meteorológico da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz em Piracicaba, SP (latitude de 22º42'30"S; longitude de 47º38'30"O; altitude de 566 m). A caracterização do solo necessária para simulação com o modelo é referente à área experimental utilizada para os experimentos desta dissertação, cuja classificação, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, é de um Nitossolo Vermelho

Eutroférrico latossólico (SANTOS et al., 2006) e estão apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.2: Intervalos utilizados para os parâmetros na realização da análise de sensibilidade local.

	Base		Intervalos	
Parâmetro	1ª Safra	3ª Safra	Máxima	Mínima
EM-FL	47,50	30	47,50	18,50
FL-SH	5,50	8	12	1,50
FL-SD	18	12,50	24,50	6
SD-PM	14	10	28,50	10
FL-LF	15	18	34	6
PPSEN	0	0	0,30	0
SLAVR	210,70	280	350	210
SIZLF	100,60	150	180	100,40
WTPSD	0,65	0,48	0,66	0,18
SFDUR	12,57	19	22	10
SDPDV	3,65	5,79	5,79	3,20
PODUR	7,51	12	16	3,50
THRSH	83	74	83	74

Tabela 2.3: Parâmetros do Nitossolo Vermelho Eutroférrico latossólico para o modelo DSSAT/CROPGRO-SOYBEAN. Profundidade do solo (PROF), ponto de murcha permanente (PPM), capacidade de campo (CCA), ponto de saturação (PSA), fator de crescimento radicular (FCR), condutividade hidráulica saturada (CHS), densidade do solo (DSO), carbono orgânico (COR), teor de argila (ARG), teor de silte (SIL), pH em água (pH_{H_2O}) e capacidade de troca catiônica (CTC).

PROF	PPM	CCA	PSA	FCR	CHS	DSO	COR	ARG	SIL	pH_{H_2O}	CTC
cm	$cm^3.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$		$cm.h^{-1}$	$g.cm^{-3}$	%	%	%		$cmol.kg^{-1}$
0-17	0.249	0.338	0.494	0.8	0.67	1.48	29.9	53.2	16.8	5.7	6.50
17-52	0.306	0.363	0.457	0.8	0.16	1.40	23.2	63.3	13.3	5.7	6.87
52-108	0.306	0.363	0.457	0.8	0.57	1.26	24.2	59.8	15.9	5.7	7.63

As simulações realizadas com intuito de obter a análise de sensibilidade local dos parâmetros do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean foram executadas utilizando a aplicação Sensivity Analysis contida na plataforma DSSAT versão 4.6.1. Com ela, realizou-se 364 simulações (valor máximo aceito pela aplicação) variando o valor dos parâmetros definidos, dentro espectro previamente determinado para cada um, tomando o valor mínimo como inicial, e o máximo, como final.

2.2.2 Descrição do método de análise sensibilidade local

A sensibilidade dos parâmetros foi obtida utilizando-se a Equação 2.1 adaptada de PATHAK et al. (2007), ao qual foi utilizada em um estudo semelhante para a cultura do algodão (*Gossypium hirsutum* L.), utilizando-se do mesmo modelo como base.

$$\sigma(\frac{X}{\theta}) = \frac{\frac{\sigma X}{\overline{X}}}{\frac{\sigma\theta}{\overline{\theta}}} \tag{2.1}$$

tal que, X é a variável de saída e θ o parâmetro utilizado. O termo $\sigma X/\overline{X}$ representa a fração entre a variância dos valores da variável de saída e a média destes valores, bem como $\sigma\theta/\overline{\theta}$ representa a sensibilidade local da variável de saída X ao parâmetro θ sendo assim, para cada unidade na variação do parâmetro θ, há uma variação de Y unidades na variável de saída X.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Índices de sensibilidade local

Os parâmetros fenológicos (Tabela 2.4) apresentaram maior relevância na sensibilidade das variáveis de saída, principalmente na produtividade. Os parâmetros que correspondem ao desenvolvimento foliar e ao particionamento da biomassa de grãos, apresentaram pouca ou nenhuma relevância quanto a duração do ciclo dos cultivos, em ambas as safras, explicitando que para o modelo, apenas as variações correspondentes a fenologia interferem nesta variável especificamente.

As variáveis de saída abordadas no estudo apresentaram sensibilidade nula em relação a SDPDV. Visto que este parâmetro caracteriza parte do componente produtivo, esperava-se que o mesmo interferisse, nos índices de produtividade de grãos estimada pelo modelo. Entretanto, no processo de calibração, este parâmetro é contrabalanceado por WTPSD, visto que há uma relação inversa entre massa de um grão e a quantidade de grãos presentes em cada vagem.

Tabela 2.4: Índices de sensibilidade local dos parâmetros utilizados pelo modelo.

	Produtividade		Ciclo		IAF_{max}	
Parâmetro	1ª Safra	3ª Safra	1ª Safra	3ª Safra	1ª Safra	3ª Safra
EM-FL	1.03	0.81	0.48	0.56	1.51	1.17
FL-SH	0.05	0.15	0	0	0.01	0.05
FL-SD	0.52	1.05	0.18	0.26	0	0
SD-PM	0.68	0.74	0.21	0.29	0	0
FL-LF	0.03	0.06	0	0	0.14	0.23
PPSEN	0.09	0	0.12	0	0.23	0
SLAVR	0.23	0.29	0	0	1.09	1.16
SIZLF	0.21	0.44	0	0	0.57	0.67
WTPSD	0.09	0.32	0	0	0.17	0.47
SFDUR	0.12	0.08	0	0	0	0
SDPDV	0	0	0	0	0	0
PODUR	0.32	0.38	0	0	0	0.01
THRSH	0.61	0.50	0	0	0	0.03

2.3.2 Análise dos parâmetros

A maior sensibilidade das variáveis de saída aos parâmetros fenológicos (Figura 2.2), se dá pela progressão do ciclo da cultura se basear nestes valores, desta forma, interferindo diretamente no acúmulo de fotoassimilados computado pelo modelo. A progressão no desenvolvimento da planta, bem como a duração dos estágios é dado pela contabilização do acúmulo de dias fototérmicos necessários para a transição dos diferentes estágios de crescimento da planta que, por sua vez, é governado pelos parâmetros fenológicos. Para que o acúmulo seja computado, o modelo leva em consideração os efeitos da temperatura, comprimento do dia, água do solo, nitrogênio e fósforo. A Equação 2.2, para o acúmulo (PROG[X]) é descrita da seguinte maneira:

$$PROG[X] = FT[X] * FUDAY[X] * min(FSW[X], FNSTR[X], FPSTR[X]) \tag{2.2}$$

em que FT[X] é a função, que varia de 0 a 1, onde descreve o efeito da temperatura para a fase X, obtido pela curva gerada em função da temperatura basal (TB, ºC), temperatura ótima 1 e 2 (TO1 e TO2, ºC), temperatura máxima (TM, ºC) e da média da temperatura horária para cada dia, durante o estágio X. A representação dos valores assumidos pela função de temperatura estão descritos na Tabela 2.5 e ilustrados pela Figura 2.1.

Tabela 2.5: Temperaturas utilizadas em cada fase fenológica, em ºC. Sendo TB a temperatura basal inferior, TO1 e TO2 são as temperaturas limites da taxa ótima de crescimento, e TM é a temperatura basal superior.

Fases	TB	TO1	TO2	TM
Vegetativo	5	27	37	45
Início Reprodutivo	5	24	34	44
Final Reprodutivo	6	25	37	60

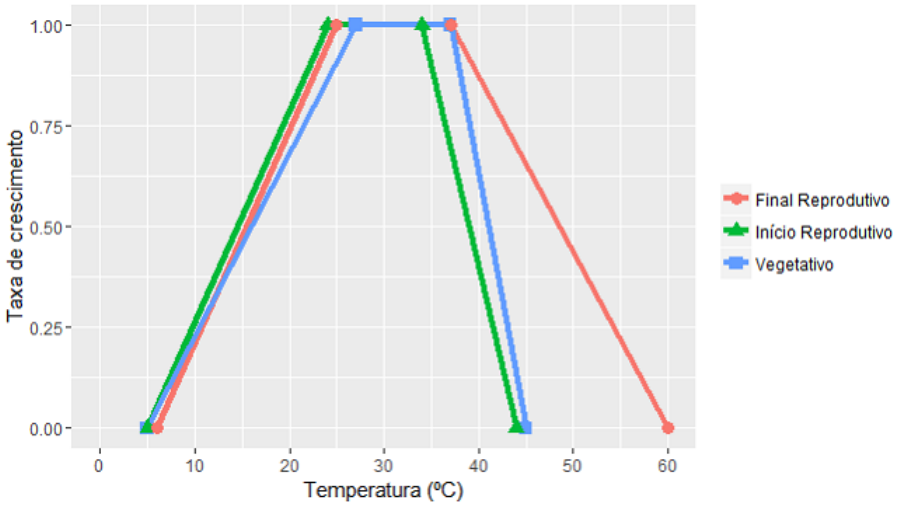

Figura 2.1: Taxas de crescimento em função da temperatura do ar para leguminosas, utilizado pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean. Adaptado de BOOTE et al. (1998).

A função FUDAY[X] descreve o efeito do comprimento do dia no progresso de desenvolvimento da cultura na fase X, ao longo de um dia, enquanto FSW[X], FNSTR[X] e FPSTR[X], são funções que descrevem o estresse atrelado a quantidade de água, nitrogênio e fósforo presente no solo, respectivament, variando de 0 (estresse máximo) à 1 (sem estresse).

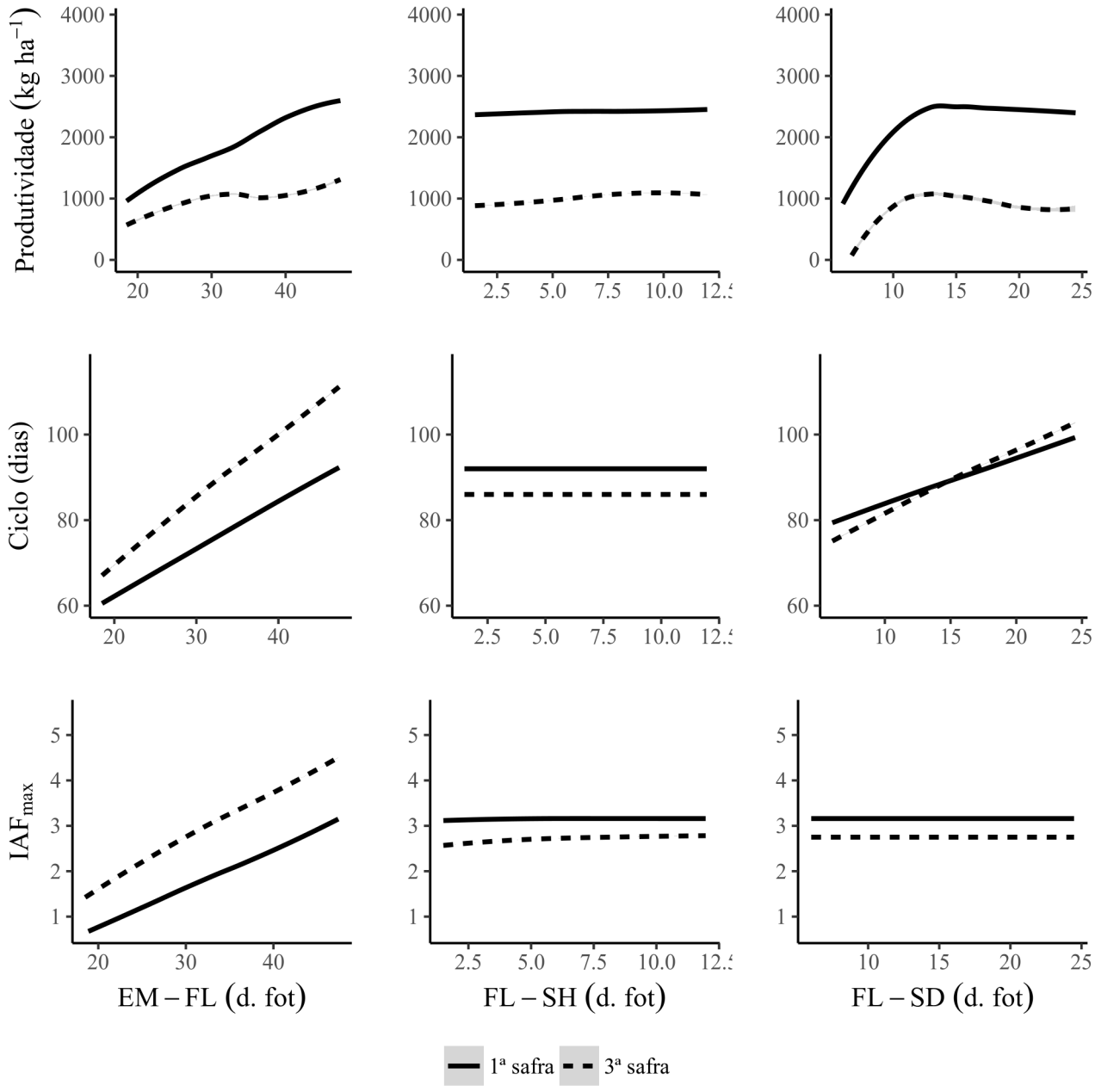

Figura 2.2: Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros EM-FL, FL-SH e FL-SD.

A planta de feijão é pouco dependente da duração do comprimento do dia para que seu estádio de floração seja induzido (EMBRAPA, 2003). Tal característica foi adequadamente simulada pelo modelo e demostrada pela sensibilidade nula das três variáveis de saída ao PPSEN em condições de cultivo em 3ª safra, quando ocorrem os dias com menor duração ao longo ano (Figura 2.3). Disso, é também possível inferir que o fotoperíodo reduzido para estas safras pouco interfere na progressão das etapas de desenvolvimento vegetal. Vale destacar, contudo, que a despeito desta relativa insensibilidade do modelo a função que descreve o efeito do comprimento dia é levada em consideração para os cálculos de progressão de desenvolvimento, uma vez que este aspecto interfere fortemente no metabolismo celular da planta (TAIZ; ZEIGER, 2010).

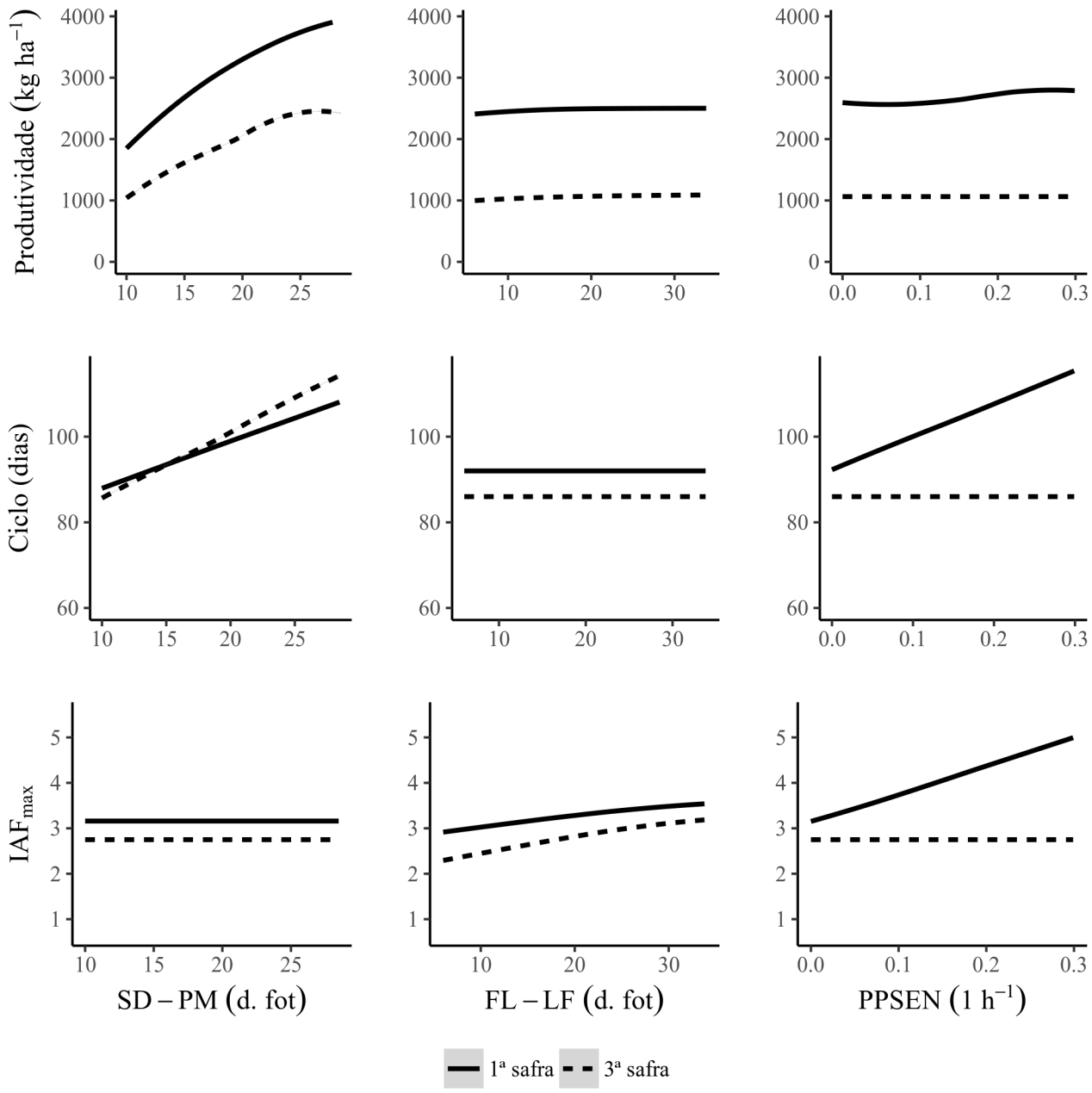

Figura 2.3: Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SD-PM, FL-LF e PPSEN.

Os parâmetros SLAVR e SIZLF estão diretamente relacionados às rotinas de desenvolvimento foliar aplicadas pelo modelo, apresentando resposta semelhante à variabilidade do IAFmax, ao qual é responsável por interferir de maneira proporcional quanto aos índices de Produtividade calculados (GOWER; KUCHARIK; NORMAN, 1999). A massa unitária de grãos (WTPSD) é também limitada pela interação com estes dois outros parâmetros, visto que suas rotinas estão integralmente correlacionadas com a capacidade fotossintética do material genético a ser utilizado no processo de simulação (Figura 2.4).

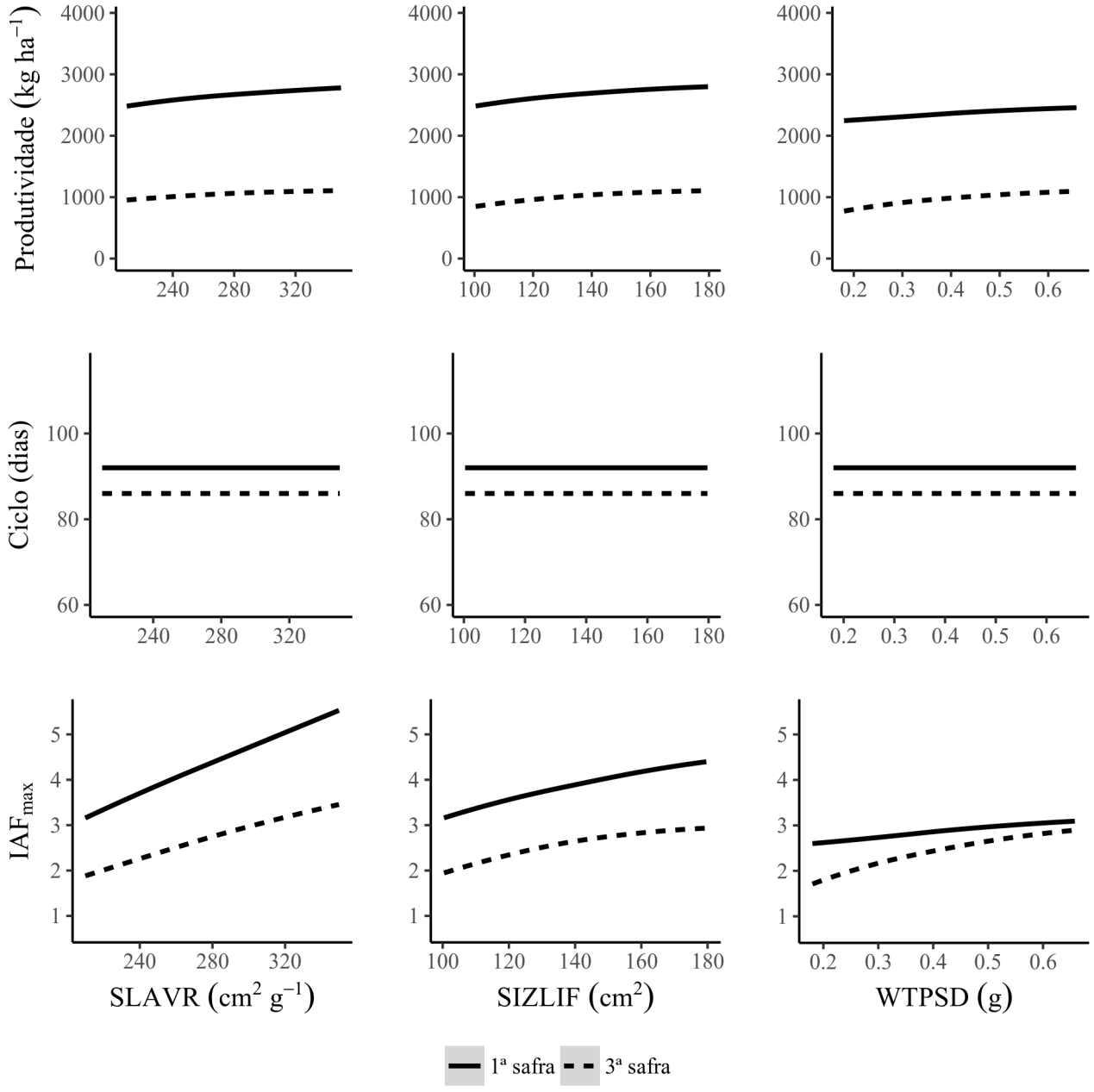

Figura 2.4: Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SLAVR, SIZLF e WTPSD.

Embora a variabilidade dos parâmetros SFDUR e PODUR apresentaram influência nula quanto a duração do ciclo e o IAFmax calculados pelo modelo (Figura 2.5), estes fatores apresentam resposta negativa quanto a produtividade obtida. Uma vez que ciclo não se altera, é possível inferir que o aumento destes parâmetros penaliza o desenvolvimento de órgãos vegetativos, ao passo que ocorre diminuição da atividade fotossintética e na translocação de fotoassimilados para o enchimento de grãos. Essa característica foi experimentalmente observada por ROSALES-SERNA et al. (2004) em cultivos tropicais, demosntrando a redução na duração da fase vegetativa resultou em diminuição do do índice de colheita.

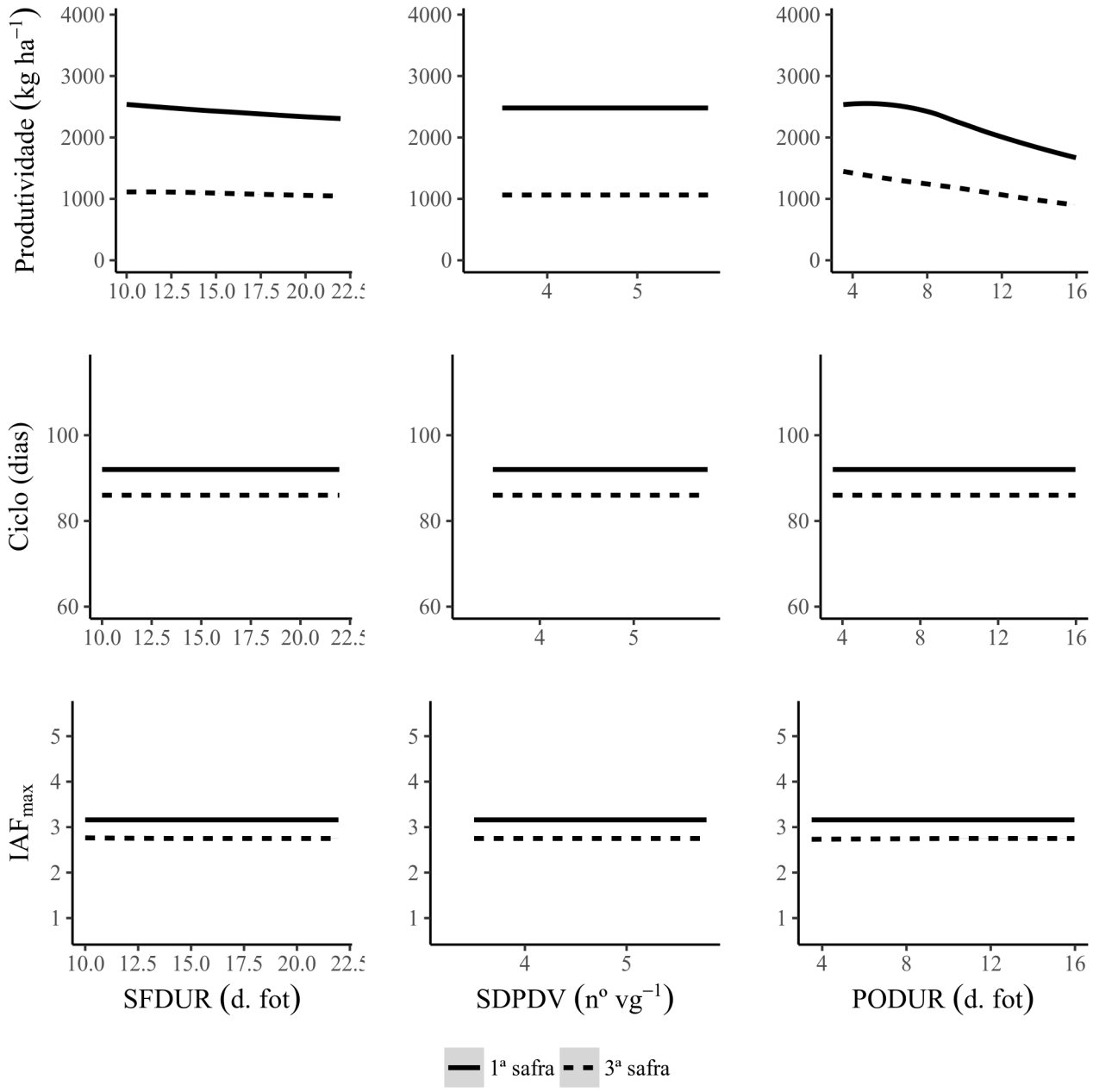

Figura 2.5: Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação dos parâmetros SFDUR, SDPDV e PODUR.

O parâmetro THRSH (Figura 2.6) tem como base informações referentes ao rendimento de colheita e à maturação fisiológica, esperava-se que apenas a variável de saída Produtividade possuísse sensibilidade à variabilidade deste componente genético do modelo, entretanto, para o cultivo conduzido em regime de 3ª safra, o IAFmax apresentou ligeira sensibilidade. Para feijão-vermelho, cultivar Montcalm, VARA PRASAD et al. (2002) mostrou que em condições onde a temperatura média ao longo do ciclo é superior a 28 ºC, ocorre diminuição da fotossíntese líquida e, portanto, menor atividade vegetativa. Desta forma, para a safra de inverno conduzida em Piracicaba/SP, com temperaturas inferiores a 20º C, há a possibilidade de que o aumento na massa de grãos em relação ao de vagens cheias, seja explicado em parte pelo incremento da cobertura foliar.

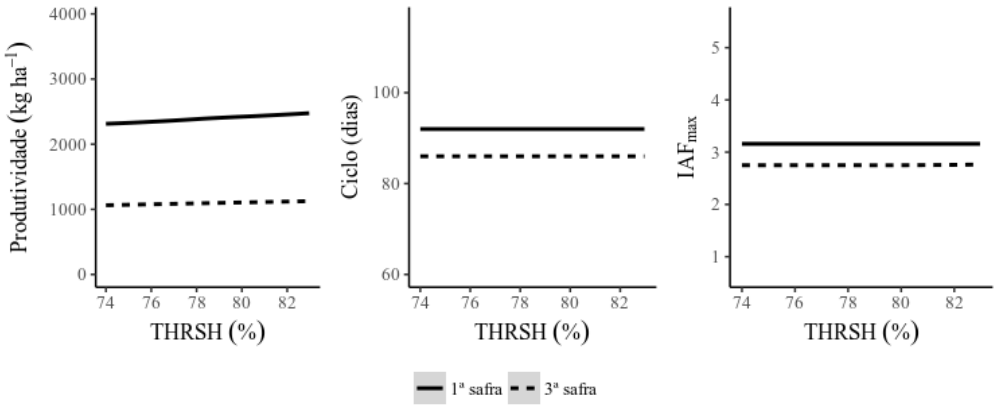

Figura 2.6: Resposta das variáveis de saída produtividade, ciclo e IAFmax à variação do parâmetro THRSH.

2.3.3 Incertezas e limitações

O uso da análise de sensibilidade local aos parâmetros genéticos utilizados pelo modelo se mostra como uma ferramenta imprescindível para o entendimento do funcionamento do mesmo. Entretanto, este tipo de análise mascara a interação entre múltiplos parâmetros como componente das variáveis de saída. O parâmetro PSSEN, por exemplo, mostrou resposta ao modelo apenas onde a calibração foi ajustada para um cultivo com condições de fotoperíodo mais elevado. Desta forma, para que a interação entre os diferentes parâmetros seja melhor compreendida, seria necessário o emprego de uma análise de sensibilidade global.

A análise de sensibilidade global permite a avaliação sistemática dos parâmetros estudados de forma simultânea, fazendo uso de uma abordagem mais completa para elucidar as incertezas e limitações atribuídas ao modelo (WAGNER, 1995). Partindo da análise de sensibilidade local apresentada neste capítulo, novos estudos poderão ser empregados para aprofundar compreensão sobre o esquema operacional utilizado pelo modelo.

2.4 Conclusão

Através do emprego da análise de sensibilidade local, é possível entender a contribuição individual dos diferentes parâmetros compreendidos no processo de calibração dos materiais genéticos, utilizados nas simulações de sistemas agrícolas do modelo CSM-CROPGRO-Drybean quanto a obtenção de informações específicas dos cultivos, como produtividade de grãos, duração de ciclo e índice de área foliar. A reposta das variáveis de saída foram mais afetadas pelos parâmetros fenológicos, como EM-FL, FL-SH, FL-SD, SD-PM e FL-LF, visto que estes não governam apenas o desenvolvimento do próprio cultivo, mas também algumas rotinas computacionais empregadas pelo modelo, do qual há interação com o ambiente da cultura. Os parâmetros de desenvolvimento foliar não possuem relevância para o tamanho do ciclo, embora sejam essenciais na produtividade e no IAFmax, devido a importância significativa dos órgãos vegetativos na fotossíntese e no enchimento de grãos. Foi observado que o modelo apresenta pouca ou nenhuma sensibilidade a alguns parâmetros relacionados ao particionamento da biomassa de grãos, havendo moderada participação nas etapas que envolvem a produtividade. De forma análoga, as variáveis de saída estudadas apresentaram baixa sensibilidade ao parâmetro PPSEN, ou em caso de cultivos em épocas onde o fotoperíodo é mais curto, sensibilidade nula, mostrando que o modelo possui boa capacidade em representar a fotoneutralidade da cultura, embora esta observação também sugira maiores estudos com o uso de análises de sensibilidade globais, que levam em consideração a interação entre os demais parâmetros.

REFERÊNCIAS

BOOTE, K. J. et al. The CROPGRO model for grain legumes. Understanding options for agricultural production., v. 1983, n. 1985, p. 99–128, 1998.

BOOTE, K. J. et al. Experience with Water Balance, Evapotranspiration, and Predictions of Water Stress Effects in the CROPGRO Model. In: Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2008. v. advancesinagricp. 59–103.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy journal, v. 88, n. 5, p. 704–716, 1996.

BOOTE, K. J.; MÍNGUEZ, M. I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. Agronomy Journal, v. 94, n. 4, p. 743–756, 2002.

BRISSON, N. et al. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. Agronomie, v. 18, n. 5–6, p. 311–346, 1998.

CAMPOLONGO, F.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. Sensitivity Anaysis as an Ingredient of Modeling. Statistical Science, v. 15, n. 4, p. 377–395, 1 nov. 2000.

DELÉCOLLE, R. et al. Remote sensing and crop production models: present trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 47, n. 2–3, p. 145–161, 1992.

EMBRAPA. Cultivo do Feijoeiro Comum. Sistemas de Produção. v. 2, jan 2003. Disponível em: `https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/clima.htm`. Acesso em: 20 de jul. 2016.

GOWER, S. T.; KUCHARIK, C. J.; NORMAN, J. M. Direct and indirect estimation of leaf area index, f(APAR), and net primary production of terrestrial ecosystems. Remote Sensing of Environment, v. 70, n. 1, p. 29–51, 1999.

GUSTAFSON, P.; SRINIVASAN, C.; WASSERMAN, L. Local sensitivity analysis. Bayesian statistics, v. 5, p. 197–210, 1996.

HOMMA, T.; SALTELLI, A. Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. Reliability Engineering System Safety, v. 52, p. 1–17, 1996.

JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 2003.

MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. Theoretical and Experimental Plant Physiology, v. 26, n. 1, p. 49–63, 2014.

OAKLEY, J. E.; O'HAGAN, A. Probabilistic sensitivity analysis of complex models: a Bayesian approach. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), v. 66, n. 3, p. 751–769, 1 ago. 2004.

PATHAK, T. B. et al. Use of Global Sensivity Analyzis for CROPGRO Cotton Model Development. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 1, p. 2295–2302, 2007.

ROSALES-SERNA, R. et al. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. Field Crops Research, v. 85, n. 2–3, p. 203–211, 2004.

RUGET, F. et al. Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. Agronomie, v. 2, n. 22, p. 133–158, 2002.

SALTELLI, A. et al. Sensitivity analysis in practice : a guide to assessing scientific models. [s.l.] Wiley, 2004.

SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M. Sensitivity analysis. [s.l.] Wiley New York, 2000. v. 1

SANTOS, H. G. DOS et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. EMBRAPA Solos, n. 2, p. 306, 2006.

SENTELHAS, P. C. et al. BHBRASIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999.

SEXTON, P. J.; WHITE, J. W.; BOOTE, K. J. Yield-Determining Processes in Relation to Cultivar Seed Size of Common Bean. Crop Science, v. 34, n. 1, p. 84, 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant physiology 5th Ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates, 2010.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of Hydrology, v. 324, n. 1–4, p. 10–23, 15 jun. 2006.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 3–4, p. 201–234, 2003.

VARA PRASAD, P. V et al. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (Phaseolus vulgaris L.). Global Change Biology, v. 8, p. 710–721, 2002.

WAGNER, H. M. Global Sensitivity Analysis. Operations Research, v. 43, n. 6, p. 948–969, 1 dez. 1995.

3 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO DSSAT/CROPGRO-DRYBEAN PARA DIFERENTES GRUPOS COMERCIAIS DE FEIJÃO-COMUM DO BRASIL

Resumo

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta leguminosa originária das Américas e presente em território brasileiro desde a pré-história. O feijão é considerado um dos principais componentes da alimentação de milhões de pessoas em todo planeta e o Brasil se apresenta como um dos maiores produtores mundiais. O uso de ferramentas como modelos computacionais pode contribuir para a compreensão da variabilidade dos cultivos nacionais de feijão, sendo de fundamental importância para estudos relacionados às opções de manejo, haja vista a importância estratégica da cultura para a segurança alimentar do Brasil. O modelo CROPGRO-Drybean, da plataforma DSSAT, é um dos mais utilizados pela comunidade científica devido sua eficiência e robustez, embora seja necessário a calibração do mesmo para expressar a resposta dos materiais genéticos aos diferentes ambientes de cultivo. O presente trabalho teve como objetivo calibrar e avaliar o desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para dois grupos comerciais ("Preto", cultivar BRS Esplendor) e ("Carioca ", cultivar Pérola), além de testar a eficiência do mesmo em representar o efeito da variabilidade ambiental. O ajuste do modelo se baseou na comparação dos dados observados com os valores simulados de massa seca da parte aérea (MSA), índice de área foliar (IAF) e massa seca de grãos (MSG). Os indicadores estatísticos mostraram desempenho satisfatório do modelo em simular o desempenho biofísico de ambos os materiais genéticos, nos diferentes ambientes testados, A análise da variabilidade pontual e temporal mostrou que os experimentos foram conduzidos em ambientes destoantes, portanto o bom desempenho do modelo frente aos dados observados, mostra que o mesmo possui capacidade em representar e diferenciar os efeitos ambientais e genotípicos para as cultivares e locais aqui analisados.

Palavras-chave: Modelagem agrícola; Parametrização; Fenótipagem

Abstract

Common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) plants are leguminous from Americas and present at brazilian territory since prehistoric ages. Beans are one of the main food components of millions of people around the globe and Brazil is presented as one of the largest producers in the world. The use of tools such as computer models can contribute to the understanding of the variability of the national common bean crops, which are fundamental to studies related to management options, considering their strategic role for Brazilian food supply security. The CROPGRO-Drybean model from DSSAT platform is one the scientifically strongest models used in the community due it's efficiency and robustness, although it is necessary to calibrate it to represent the genetic materials on different crop environments. The objective of this paper was to evaluate the performance of the DSSAT / CROPGRO-Drybean model for two commercial groups ("Black", BRS Esplendor cultivar) and ("Carioca ", Pérola cultivar), as well as to test its efficiency in relation to the effect of environmental variability. The fit of the model is based on the comparison of the observed data with the simulated values of aerial dry mass (MSA), leaf area index (LAI) and dry grain mass (MSG). The statistical indexes has shown good performance of the model ability to simulate the biophysical performance of both genetic materials, on different environments. The punctual and temporal variability analysis showed that the experiments were performed on dissonant environments, therefore the good model performance in face of observed data, shows the model capability in express and differentiate the environmental and genotype effects for the cultivars and locals analyzed.

Keywords: Crop modeling; Parametrization; Phenotyping

3.1 Introdução

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma planta leguminosa originária de regiões situadas entre o México e o norte da América do Sul, entretanto registros arqueológicos mostram que a cultura está presente no Brasil há cerca de 10000 anos, chegando ao norte de Minas Gerais por migrações humanas (FREITAS, 2006). Atualmente, apenas na região dos trópicos, o grão faz parte da dieta de aproximadamente 400 milhões de pessoas, sendo produzidos em média, 12 milhões de toneladas anualmente em todo o mundo (CIAT, 2016). O Brasil configura-se como o segundo maior produtor mundial de feijão-comum (STATISTA, 2017), produzindo cerca de 3,4 milhões toneladas, apenas na safra 2016/2017 (CONAB, 2018a).

A alta difusão do cultivo de feijão por todo o território brasileiro resultou em uma extensa variabilidade de grupos comerciais com materiais genéticos distintos, dos quais os grupos "Carioca" e "Preto" são os mais produzidos, principalmente nas regiões Centro-Sul do país, onde a produção total deste grão é mais representativa (CONAB, 2018b). Os diferentes ambientes do país onde a cultura se estabeleceu indicam a capacidade das cultivares em se adaptarem a uma ampla gama de climas e de solos do Brasil, Para estudar a resposta dos cultivos agrícolas frente as variáveis ambientais, uma das opções mais práticas e confiáveis se dá pelo uso de modelos computacionais que simulam o crescimento e desenvolvimento das plantas (BOOTE; JONES; PICKERING, 1996).

O uso de modelos corretamente ajustados para as condições reais de campo, permitem a realização de diversas análises sobre o manejo das culturas. HEINEMANN et al., (2016) utilizaram modelos computacionais para estudar o impacto do estresse hídrico provocados pela seca, em cultivos de "inverno" para feijão-comum em Goiás. CHALLINOR et al. (2017) fizeram uso de modelos diferentes para gerar informações sobre os riscos para a adaptação das culturas agrícolas em cenários de mudanças climáticas. RINALDI et al. (2007) aplicaram técnicas de modelagem para determinar estratégicas voltadas ao uso da irrigação e adubação nitrogenada para lavouras de tomate (Solanum lycopersicum) no sul da Itália.

Nesta mesma temática, o modelo genérico CROPGRO (BOOTE et al., 1998) é um dos mais utilizados mundialmente na simulação do desenvolvimento de culturas leguminosas (PATHAK et al., 2007; RINALDI; VENTRELLA; GAGLIANO, 2007; RUANE et al., 2014), sendo derviado a partir da juncao de outros três modelos: SOYGRO (soja) (JONES et al., 1989); BEANGRO (feijão) (HOOGENBOOM et al., 1994); e PNUTGRO (amendoim) (BOOTE et al., 1989). O modelo apresenta uma estrutura modular que agrega sub-rotinas para a contabilidade da progressão fenológica, interação com as informações meteorológicas e de solo do local de estudo, estresse abiótico (nitrogênio, fósforo e condições hídricas), dentre outras (WILKERSON et al., 1983).

O CROPGRO está incorporado a plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), ao qual é composto por mais de 40 modelos de culturas, fazendo uso da mesma estrutura modular para as interações com ferramentas que envolvem a caracterização do ambiente (solos e clima), manejo da cultura, modificações nos parâmetros genéticos adotados pelos modelos, além de possibilitar de forma prática, a avaliação dos mesmos pelo comparativo entre as saídas obtidas através das simulações e os dados observados experimentalmente (JONES et al., 2003).

Para que os modelos possam ser aplicados na representação espacial das características de desenvolvimento dos cultivos, há a necessidade da calibração de seus parâmetros, tomando como base as informações coletadas a partir de experimentos de campo. Esta etapa permite que o modelo apresente o melhor ajuste possível ao demonstrar a realidade dos aspectos inerentes a cultura através de simulações (WALLACH, 2011), sendo possível desta forma melhorar a qualidade dos modelos a serem utilizados, uma vez que a parametrização seja realizada de forma satisfatória (MAKOWSKI et al., 2006). Para tanto, poucos estudos foram conduzidos no Brasil, com intuito de compreender a resposta dos diferentes grupos comerciais às condições ambientais encontradas no país, através do uso de modelos de crescimento de cultura.

Dada a escassez de informações sobre o uso de modelos computacionais para a cultura do feijoeiro-comum no Brasil, em escala nacional, o estudo apresentado neste capítulo tem como objetivos principais: (i) calibrar o modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para dois dos grupos comerciais de feijão-comum mais representativos

da produção brasileira deste grão; (ii) avaliar a capacidade do modelo em simular a variabilidade dos cultivos em ambientes onde a cultura poderia ser implantada.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área de estudo

Para calibração do modelo, foram realizados dois experimentos de campo, no município de Piracicaba-SP. O primeiro experimento (E1) foi realizado na safra de "inverno", com semeadura em 8 de maio de 2017 e colheita em 22 de agosto de 2017 e o segundo experimento (E2) foi conduzido durante a safra das "águas", semeado em 8 de dezembro de 2017 e colhido entre 6 e 13 de março de 2018. Ambos foram conduzidos na área do Posto Meteorológico, da Escola Superior de Agricultra "Luiz de Queiroz", latitude 22º42'32"S, longitude 47º37'45"O, altitude de 548 m. O solo é classificado como Nitossolo Vermelho, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (DOS SANTOS et al., 2013).

O terceiro experimento (E3) foi conduzido em Santo Antônio de Goiás-GO, latitude 16º28'01''S, longitude 49º16'59''O e altitude, no ano de 2015, durante a safra de "inverno", nas instalações da Embrapa Arroz e Feijão, sendo a cultivar BRS Esplendor semeada no dia 6 de maio, enquanto a cultivar Pérola teve sua semeadura no dia 10 de junho. O solo deste experimento foi classificado como Latossolo Vermelho, sendo que todas as propriedades físico-hídricas dos solos presentes em E1, E2 e E3, aos quais foram utilizadas como dados de entrada para o processo de calibração e avaliação do modelo, estão descritas na Tabela 3.1. Os dados meteorológicos por sua vez foram coletados na estação situada nas dependências da unidade.

Para os experimentos E1, E2 e E3, o delineamento experimental foi o de blocos casualizados, cujos tratamentos foram as cultivares BRS Esplendor (ALBRECHT, 2010)(grupo comercial preto) e Pérola (grupo comercial carioca) (YOKOYAMA et al., 1999), com quatro repetições cada.

A semeadura foi realizada em sistema de plantio convencional (solo arado e gradeado) para os experimentos E1 e E2 e plantio direto para E3. Os espaçamentos foram de 0,40 m entrelinha e 15 plantas por linha para E1 e E2 e espaçamento 0,45 m entrelinha e 15 plantas por linha para E3, respectivamente para ambas as cultivares. Os tratamentos foram divididos em 4 blocos, representando uma repetição cada, medindo 7 m de comprimento por 4 m de largura, assim compreendendo uma área de 112 m² para cada um dos tratamentos (cultivares)(Figura 3.1).

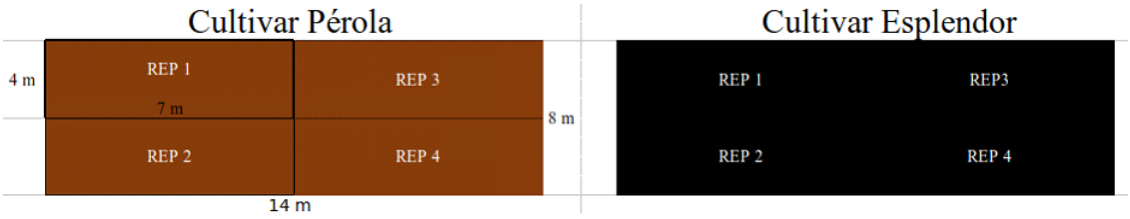

Figura 3.1: Representação da área experimental em Piracicaba/SP (E1 e E2).

Os experimentos foram monitorados com o objetivo de evitar a ocorrência de pragas e doenças sobre as plantas, de modo a minimizar a interferência destes agentes no processo de modelagem, bem como poder contar com a possibilidade de atingir o potencial produtivo do cultivo de estudo (MARIN, 2014). Atributos de solos dos experimentos E1, E2 e E3 estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados de entrada (propriedades do solo) para o modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean: Profundidade do solo (PROF), ponto de murcha permanente (PPM), capacidade de campo (CCA), ponto de saturação (PSA), fator de crescimento radicular (FCR), condutividade hidráulica saturada (CHS), densidade do solo (DSO), carbono orgânico (COR), teor de argila (ARG), teor de silte (SIL), pH em água (pH_{H_2O}) e capacidade de troca catiônica (CTC).

PROF cm	PPM	CCA	PSA	FCR	CHS	DSO	COR	ARG	SIL	pH_{H_2O}	CTC
	$cm^3\ cm^{-3}$				$cm\ h^{-1}$	$g\ cm^{-3}$	%				$cmol\ kg^{-1}$
Nitossolo Vermelho (E1 e E2)											
0-17	0,249	0,338	0,494	0,8	0,67	1,48	29,95	53,2	16,8	5,7	6,50
17-52	0,306	0,363	0,457	0,8	0,16	1,40	23,26	63,3	13,3	5,7	6,87
52-108	0,306	0,363	0,457	0,8	0,57	1,26	24,21	59,8	15,9	5,7	7,63
Latossolo Vermelho (E3)											
0-10	0,288	0,387	0,487	1,0	2,93	1,33	2,04	43,8	24,3	6,2	-
10-20	0,278	0,367	0,477	0,8	4,58	1,36	1,43	48,3	21,4	6,1	-
20-30	0,285	0,370	0,495	0,6	4,13	1,37	1,32	41,8	27,8	6,3	-
30-40	0,285	0,369	0,468	0,3	2,93	1,40	1,07	44,5	24,4	6,0	-
40-100	0,285	0,369	0,468	0,0	2,93	1,40	1,07	44,5	24,4	6,0	-

3.2.2 Medidas biométricas

Com intuito de acompanhar a progressão das atividades de campo e registrar informações relevantes para o processo de ajuste e avaliação do modelo utilizado, foram retiradas amostras vegetais para medias biométricas de desenvolvimento, a partir da segunda semana após a semeadura, nos experimentos E1 e E2.

Desta forma, coletou-se semanalmente amostras referentes a 1 m de linha aleatoriamente selecionada em cada um dos 4 blocos presentes nos 2 tratamentos, totalizando 8 amostras no total. As medições efetuadas foram: (a) contagem de ramificações do caule; (b) número de trifólios; (c) massa seca de folhas; (d) massa seca do caule; (e) massa seca das vagens, quando presente; (f) número de vagens; (g) massa seca de grãos; (h) número de grãos; (i) além da área foliar total, obtida através do software Quant (LIBERATO, 2003) por meio da digitalização das folhas destacadas e ainda turgidas.

Para as aferições feitas a partir da massa seca dos órgãos vegetativos e reprodutivos anteriormente citados, cada peça foi destacada e armazenada em sacos de papel devidamente identificados, sendo posteriormente colocados em estufa de ventilação forçada a 65 ºC, por uma semana. Após a retirada, o material foi então pesado em balança de precisão 0,001 g.

O registro fenológico foi feito de acordo com o sistema proposto por FANCELLI & DOURADO NETO (2007) para a cultura do feijoeiro-comum, sendo posteriormente ajustado para a classificação fenológica da cultura da soja, como descrito por FEHR & CAVINESS (1977), visto que o modelo CROPGRO-Drybean utiliza este sistema de acompanhamento para a execução dos processos de simulação, conforme descrito no Anexo A.

3.2.3 Descrição do modelo

O CROPGRO é um modelo baseado em processos e considera o balanço de carbono na cultura, ciclo do nitrogênio (planta e solo) e o balanço hídrico através da interação entre o a atmosfera, o cultivo e o solo (BOOTE et al., 1998). O desenvolvimento da cultura é dado por um algoritmo que considera a sensibilidade à temperatura,

fotoperíodo, deficiência hídrica e estresse por nitrogênio, nas diferentes fases fenológicas, utilizando uma escala de tempo diária para computar a progressão do cultivo.

O modelo por sua vez, faz uso de dados diários de características climatológicas do ambiente em que o cultivo se encontra, advindo de estações próximas a área de interesse. As informações diárias são subdivididas para a escala horária, com o objetivo de computar apenas os instantes em que as condições ambientais permitem o desenvolvimento da cultura. Sendo assim, a temperatura horária é obtida através de uma rotina computacional que utiliza como dados de entrada as temperaturas máxima e mínima diária, aplicados a uma função seno-exponencial (PARTON & LOGAN, 1981; KIMBALL & BELLAMY, 1986). A distribuição horária da radiação solar e da densidade do fluxo de fótons fotossintéticos é calculado por uma função descrita por SPITTERS (1986), bem como radiação fotossinteticamente ativa, dividida em seus componentes direto e difuso através de um algoritmo que leva em consideração a transmissão atmosférica da luz, calculado a partir dos estudos feitos por ERBS; KLEIN; DUFFIE (1982) e SPITTERS; TOUSSAINT; GOUDRIAAN (1986).

A interceptação da radiação solar é calculada utilizando uma adaptação da lei de Beer-Lambert, para corrigir os efeitos de dosséis incompletos e de plantas de formato elipsoidal nestes dosséis (BOOTE & PICKERING, 1994). Para o cálculo de evapotranspiração, o modelo utiliza como padrão o método descrito por PRIESTLEY & TAYLOR (1972), embora outras opções possam ser selecionadas, como o método da FAO-Penman, como descrito por JENSEN & ALLEN (2016).

Os cálculos dos diferentes componentes que resultam na simulação dos cultivos agrícolas, são realizados em uma arquitetura modular, o que confere maior robustez ao modelo (PORTER; BRAGA; JONES, 2000). Embora confiáveis, estes modelos necessitam de ajustes e testes para condições reais, visto que os mesmos são aplicados a diversos materiais genéticos em inúmeros ambientes. Desta forma, o processo de calibração consiste no ajuste dos parâmetros utilizados pelo modelo, com objetivo de simular, o mais próximo da realidade, os dados observados em experimentos de campo, para um dado genótipo (WALLACH et al., 2001). Tal procedimento, para a cultura do feijoeiro-comum, é de extrema importância em estudos que envolvem o uso de modelos computacionais, visto que o cultivo do grão em território brasileiro é representado por uma larga variedade de grupos comerciais, característicos para as diferentes regiões do país (CAMARGO ROCHA et al., 2010).

3.2.4 Calibração do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean

Utilizando-se dos dados gerados pelas medidas biométricas e se baseando na literatura científica para comparações estatísticas quanto a eficiência de modelagem, foi então efetuada a calibração do modelo para as cultivares BRS Esplendor e Pérola.

Para a realização da calibração, seguiu-se a metodologia proposta por BOOTE (1999), adaptando o procedimento utilizado por MARIN et al. (2011) para ajuste fino dos parâmetros através da ferramenta computacional GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) (JONES et al., 2011). Desta forma, utilizou-se os dados coletados nas análises biométricas dos experimentos E1 e E2 para o acerto manual dos parâmetros, aproximando as estimativas do modelo o mais próximo possível da realidade, em seguida, foram adicionadas as informações referentes ao experimento E3 para o ajuste automático.

A relação dos parâmetros utilizados pelo modelo para representar as características genéticas de cada cultivar, estão descritas na Tabela 3.2.

Foram comparados os dados simulados e observados ao longo do ciclo, para ambas as cultivares nos 3 experimentos, com relação a 3 variáveis de saída: índice de área foliar (IAF, ou razão entre a área foliar do dossel e a área ocupada por unidade de planta), massa seca da parte aérea (MSA, kg ha^{-1}) e massa seca de grãos (MSG, kg ha^{-1}).

Tabela 3.2: Lista dos parâmetros de cultivares utilizados pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean.

Parâmetro	Descrição
ECO#	Código para identificação do ecótipo ao qual a cultivar pertence
CSDL	Comprimento crítico do dia curto (em horas)
PPSEN	Resposta relativa do desenvolvimento da planta ao fotoperíodo (1 h^{-1})
EM-FL	Tempo entre a emergência e o início do florescimento da planta (R1) (dias fototérmicos, d.fot)
FL-SH	Tempo entre R1 e início da frutificação (R3) (dias fototérmicos, d.fot)
FL-SD	Tempo entre R1 e a formação da primeira semente (dias fototérmicos, d.fot)
SD-PM	Tempo entre R5 e a maturação fisiológica (R7) (dias fototérmicos, d.fot)
FL-LF	Tempo entre R1 e o fim da expansão foliar (dias fototérmicos, d.fot)
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar (mg CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)
SLAVR	Área foliar específica (cm^2 g^{-1})
SIZLF	Área foliar máxima do trifólio (cm^2)
XFRT	Fração máxima do crescimento diário que é dividida em sementes e casca (adimensional)
WTPSD	Massa máxima por unidade de grãos (g)
SFDUR	Duração do enchimento de grãos (dias fototérmicos, d.fot)
SDPDV	Média de sementes por vagem (número por vagem, nº vg^{-1})
PODUR	Tempo requerido para que a cultivar atinja a carga máxima de vagens (dias fototérmicos, d.fot)
THRSH	Razão máxima entre semente e semente + vagem, na maturação (%)
SDPRO	Fração de proteína nas sementes (massa de proteína por massa de semente)
SDLIP	Fração de óleo nas sementes (massa de óleo por massa de semente)

3.2.5 Análise estatística de desempenho da modelagem

Os indicadores de desempenho estatístico utilizados para avaliar a performance do modelo foram: (i) coeficiente de determinação (R2, Equação 3.1); (ii) desvio médio absoluto (DMA, Equação 3.2); (iii) erro quadrático médio (RMSE, Equação 3.3); índice de concordância de Wilmott (d, Equações 3.4 e 3.5) (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012) e o coeficiente de eficiência de modelagem de Nash-Sutcliffe (NS, Equação 3.6) (NASH; SUTCLIFFE, 1970).

O coeficiente de determinação R^2 pode ser descrito da seguinte maneira:

$$R^2 = [\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i - \overline{S})^2}}]^2 \tag{3.1}$$

tal que n é o número de observações, O_i é o valor observado e S_i o valor simulado, sendo $\overline{O}$ e $\overline{S}$ a média dos valores observados e simulados, respectivamente. O valor de R^2 varia de 0 à 1, representando que a dispersão dos dados simulados é nula ou idêntica aos observados, respectivamente.

O desvio médio absoluto, DMA, é calculado por:

$$DMA = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mid (O_i - S_i) \mid}{n} \tag{3.2}$$

Já o erro quadrático médio (RMSE) é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - S_i)^2}{n}} \tag{3.3}$$

Por sua vez, o índice "d" de Willmott, testa a concordância entre os dados obtidos por um preditor (modelo) com relação ao que foi observado, variando de -1 (nenhuma concordância) a 1 (concordância perfeita). O procedimento para o cálculo índice "d" utilizado neste trabalho é uma revisão do método inicialmente proposto por Willmott (1984), onde os extremos eram definidos entre 0 e 1, respectivamente. O método mais atual possui uma abordagem mais rigorosa, atribuindo maior confiabilidade ao teste aplicado. Sendo assim:

Se $\sum_{i=1}^{n} \mid S_i - O_i \mid \leq \sum_{i=1}^{n} \mid O_i - \overline{O} \mid$, então:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \mid S_i - O_i \mid}{\sum_{i=1}^{n} \mid O_i - \overline{O} \mid} \tag{3.4}$$

Se $\sum_{i=1}^{n} \mid S_i - O_i \mid > \sum_{i=1}^{n} \mid O_i - \overline{O} \mid$, então:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} \mid O_i - \overline{O} \mid}{\sum_{i=1}^{n} \mid S_i - O_i \mid} - 1 \tag{3.5}$$

Por fim, o coeficiente de eficiência de modelagem de Nash-Sutcliffe (NS) analisa a performance do modelo em expressar os dados observados, variando de 1 (perfeito) a -∞, tal que valores abaixo de 0 indicam que o modelo não é melhor que a média artimetica dos dados observados, assumido como modelo de referência neste indicador. Desta forma, NS é dado pela seguinte equação:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \tag{3.6}$$

3.2.6 Análise pontual e temporal da variabilidade experimental

Os experimentos E1 e E2 foram conduzidos em condição de sequeiro, a reposição de água necessária para o desenvolvimento do cultivo foi exclusivamente dependente da chuva. Essa análise consiste em demonstrar se há necessidade da implementação de experimentos em diferentes épocas do ano para avaliar se a cultura apresenta alguma variabilidade experimental, e por fim, evidenciar a capacidade do modelo a ser utilizado em simular os diferentes ambientes. O experimento E3, no entanto, foi conduzido em condição irrigada, de modo que a umidade do solo era monitorada utilizando-se a sonda Diviner2000®, e quando constatado que os níveis de umidade estavam próximos ao PPM, o sistema de irrigação era acionado para suprir o volume de água necessário até que se atinja a CCA.

Após a adequada calibração e avaliação do modelo, realizou-se uma simulação utilizando as calibrações oriundas dos experimentos E1, E2 e E3 utilizando uma série de 30 anos de dados em condições idênticas de manejo, com o objetivo de observar se a variabilidade entre os experimentos é explicado por suas localizações e características climáticas.

Para determinar se houve diferença entre os experimentos, utilizou-se o teste de diferença significativa de Tukey para os valores médios de índice de área foliar máximo, produtividade de grãos e biomassa total produzida, obtido através das simulações, para ambas as cultivares deste estudo, com nível de significância (α) de 1%.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Variação ambiental dos experimentos de campo

A estadia das plantas em campo variou de 107 dias, em E1, a 84 dias em E2. Para este experimento, a duração do ciclo esperado de 85 à 95 dias foi observado para as cultivares BRS Esplendor (EMBRAPA, 2017a) e Pérola (EMBRAPA, 2017b), entretanto para E1, houve o prolongamento do período de cultivo, dada baixa disponibilidade hídrica para o período em Piracicaba/SP (SENTELHAS et al., 1999), além da limitação dada a ocorrência de temperaturas abaixo de 18º C, ocasionando em atraso no desenvolvimento pelo baixo acumulo de graus-dia necessários para que as plantas encerrem seu ciclo biológico (WUTKE et al., 2000)(Tabela 3.3).

O volume de chuvas foi considerado satisfatório em E1, visto que foram observadas precipitações bem distribuídas, variando de 130,2 mm a 147,1 mm, em regiões com temperaturas médias superiores as registradas no presente experimento, de modo que o clima favoreceu o desenvolvimento da cultura (YOKOYAMA et al., 1999). As chuvas ocorreram principalmente na emergência (10 a 13 dias após a semeadura, 128,6 mm), próximo ao início da floração (28 a 36 dias após a semeadura, 17,5 mm) e ao fim da maturação (99 a 104 dias após a semeadura, 50,6 mm). Embora tenha havido ocorrência de chuvas em estádios de grande importância para o bom andamento em

Tabela 3.3: Médias das temperaturas máxima (TMAX), mínima (TMIN), média (TMED) do ar, bem como o somatório da radiação solar incidente (ΣSRAD) e do volume de chuvas (ΣRAIN) ao longo dos experimentos.

Experimento	TMAX (ºC)	TMIN (ºC)	TMED (ºC)	ΣSRAD (MJ m^{-2})	ΣRAIN(mm)
E1	25,6	11,9	18,8	1386,8	197
E2	30,5	19,1	24,8	1616	441,2
E3 (BRS Esplendor)	27,7	16,2	21,9	1301,8	37,8
E3 (Pérola)	29,2	16,4	22,8	1417,3	5

uma lavoura de feijoeiro-comum (FIEGENBAUM et al., 1991), o cultivo recebeu apenas 197 mm dos 270 mm do volume de água demandados para as condições ideais de desenvolvimento ao longo do ciclo (Figura 3.2).

Quanto ao experimento E2, houve menor variabilidade das variáveis meteorológicas, com temperatura média em torno de 24,8 ºC, pouco acima da faixa ótima de 18 a 24 ºC descrito por VIEIRA (1967). As chuvas foram bem distribuídas ao longo do ciclo e em quantidade suficiente (441,2 mm total) para suprir os 333,64 mm demandados pela cultura.

O detalhamento da variação de temperatura do ar e chuvas ao longo dos experimentos pode ser observado na Figura 3.2, bem como o balanço hídrico climatológico do cultivo (THORNTHWAITE & MATHER, 1955) (Figura 3.3), explicitando a evapotranspiração real (ETr), potencial da cultura (ETc) e a de referência (ETo), além dos períodos onde houve deficiência de chuva para atender a demanda hídrica plena da cultura (DEF) e excedente hídrico (EXC), ao qual não é armazenado pelo solo (ANGELOCCI; SENTELHAS; PEREIRA, 2002).

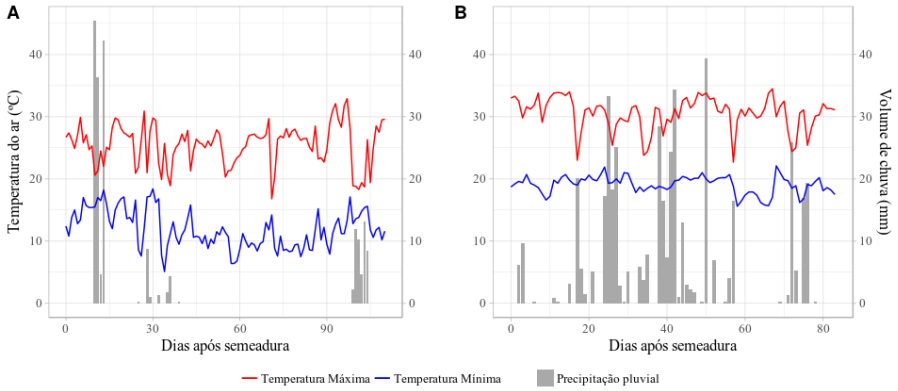

Figura 3.2: Registro das temperaturas máximas e mínimas do ar, e precipitação pluvial, ao longo dos experimentos E1 (A) e E2 (B).

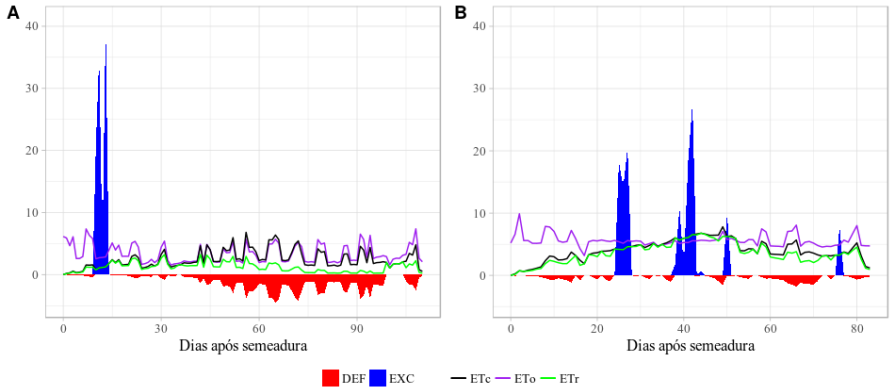

Figura 3.3: Balanço hídrico climatológico dos cultivos ao decorrer dos experimentos E1 (A) e E2 (B), apresentado o déficit (DEF) e excedente hídrico (EXC), bem como a evapotranspiração de referência (ETc), real (ETr) e potencial da cultura (ETc). O valor de CAD adotada foi de 100 mm.

3.3.2 Calibração e avaliação de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean

As informações registradas em E1, E2 e E3 indicam que os experimentos foram conduzidos em condições diversas e, com isso, permitindo avaliar de modo mais efetivo a habilidade do modelo em reproduzir os efeitos de tais condições sobre a cultura do feijão. Assim, os parâmetros ajustados para o modelo estão descritos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros genéticos das cultivares BRS Esplendor e Pérola, calibrados a partir dos experimentos E1, E2 e E3.

Cultivar	CSDL	PPSEN	EM-FL	FL-SH	FL-SD	SD-PM	FL-LF	LFMAX	SLAVR
BRS Esplendor	12.17	0.00	34.30	5.50	7.172	19.11	18.00	1.00	272.1
Pérola	12.17	0.00	34.44	8.00	8.943	16.99	18.00	1.00	280.0
	SIZLF	XFRT	WTPSD	SFDUR	SDPDV	PODUR	THRSH	SDPRO	SDLIP
BRS Esplendor	133.9	1.00	0.235	21.46	3.227	7.740	76.0	0.235	0.01
Pérola	150.0	1.00	0.480	19.00	5.790	12.00	74.0	0.235	0.03

O modelo apresentou bom desempenho em representar as condições observadas para a cultivar BRS Esplendor (Figura 3.4), embora sejam escassas as informações sobre a calibração e avaliação de modelos computacionais, utilizando materiais genéticos do grupo comercial preto, para comparações externas a este estudo.

Para a cultivar Ouro Negro, também pertencente ao grupo comercial preto, OLIVEIRA (2007) obteve resultados mais precisos quanto a MSG, com estimativas do desvio médio absoluto (DMA) variando entre 12 e 112 kg ha^{-1}. A calibração para BRS Esplendor realizada a partir de E1, E2 e E3, apresentou precisão inferior quanto a esta variável, com valores estimados entre 90 a 166 kg ha^{-1}.

Os índices de desempenho de modelagem para os dados coletados em Piracicaba (E1 e E2) apresentaram melhores resultados em relação ao experimento em Santo Antônio de Goiás (E3) (Tabela 3.5), havendo superestimativa do IAF e MSA, próximo ao fim do ciclo de cultivo, embora os indicadores estatísticos para estas variáveis tenham demonstrado boa performance por parte do modelo (R^2=0,835 e 0,846; d= 0,796 e 0,465 NS= 0,710 e 0,465 respectivamente).

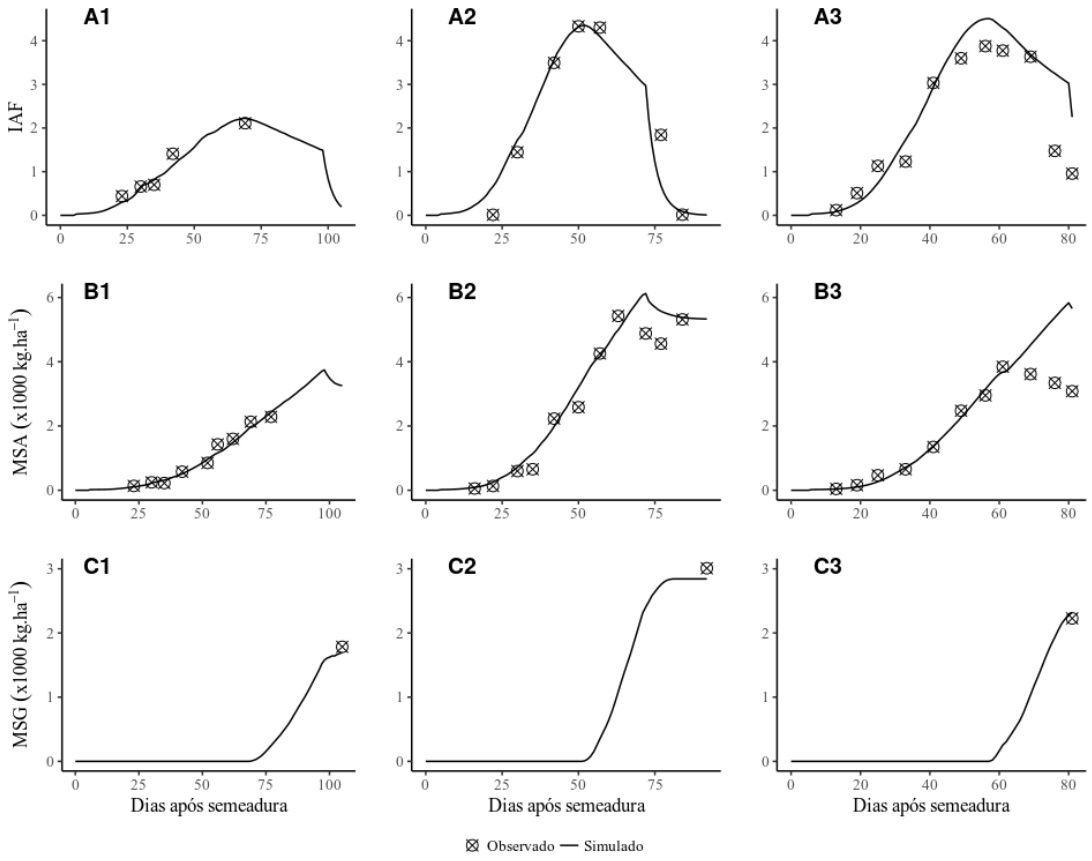

Figura 3.4: Variação ao longo do ciclo das variáveis índice de área foliar (IAF)(A), massa seca da parte aérea (MSA)(B) e massa seca de grãos (MSG)(C), para os experimentos E1(1), E2(2) e E3(3), cultivar BRS Esplendor.

Tabela 3.5: Indicadores estatísticos de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para a cultivar BRS Esplendor, grupo comercial preto. Tal que $\overline{M}_{\mathrm{O}}$ e $\overline{M}_{\mathrm{S}}$ são os valores médios dos dados observados e simulados, respectivamente

Variável	$\overline{M}_{\mathrm{O}}$	$\overline{M}_{\mathrm{S}}$	R^2	DMA	RMSE	d	NS
E1							
IAF	$1,064$	$1,022$	$0,952$	$0,133$	$0,153$	$0,881$	$0,939$
MSG (kg ha^{-1})	1784	1694	–	90	90	–	–
MSA (kg ha^{-1})	1053	1018	$0,974$	111	$131,244$	$0,923$	$0,972$
E2							
IAF	$2,205$	$2,162$	$0,909$	$0,351$	$0,522$	$0,888$	$0,909$
MSG (kg ha^{-1})	3008	2842	–	166	166	–	–
MSA (kg ha^{-1})	2790	3055	$0,950$	407	$562,601$	$0,893$	$0,926$
E3							
IAF	$2,122$	$2,529$	$0,835$	$0,543$	$0,749$	$0,796$	$0,710$
MSG (kg ha^{-1})	2227	2322	–	95	95	–	–
MSA (kg ha^{-1})	1998	2468	$0,846$	584	$1033,313$	$0,465$	$0,465$

A cultivar Pérola apresentou índices estatísticos ligeiramente melhores para a maioria das variáveis de saída obtidos das simulações (Figura 3.5), comparado aos dados observados, havendo uma discrepância considerável com relação à E3, onde a MSG apresentou desvio médio absoluto de 1113 kg ha^{-1}. Há dúvidas quanto a justificativa sobre esta diferença, pois não se pode determinar com apenas uma observação se o modelo foi deficiente em representar esta reposta especificamente para este material genético, ou se houve falha na coleta de dados, embora haja boa confiabilidade estatística quanto os demais resultados referentes a este experimento (Tabela 3.6).

Para a cultivar do grupo comercial carioca IAC-Carioca, SANTOS (2015) encontrou valores semelhantes de IAF e MSA, embora com precisão menor do que a calibração realizada para a cultivar Pérola (E1, E2 e E3) (R^2 entre 0,7 e 0,9; "d" acima de 0,9), com valores de DMA oscilando entre 0,59 e 0,98 para IAF, e 825 e 1331 kg ha^{-1} para MSA, com base nos resultados de 4 experimentos. O mesmo estudo encontrou diferenças menores entre valores simulados e observados quanto a MSG, variando entre 36 e 122 kg ha^{-1}.

Com relação a cultivar Pérola, após a calibração do modelo CROPGRO-Drybean e a análise comparativa de desempenho com 3 experimentos, OLIVEIRA (2007) encontrou diferenças entre dados observados e simulados variando entre 92 e 106 kg ha-1. A avaliação de performance do modelo para esta variável de saída em E1 e E2 apresentou precisão ligeiramente inferior aos estudos anteriormente citados, com relação ao material genético Pérola, variando 102 a 240 kg ha^{-1}.

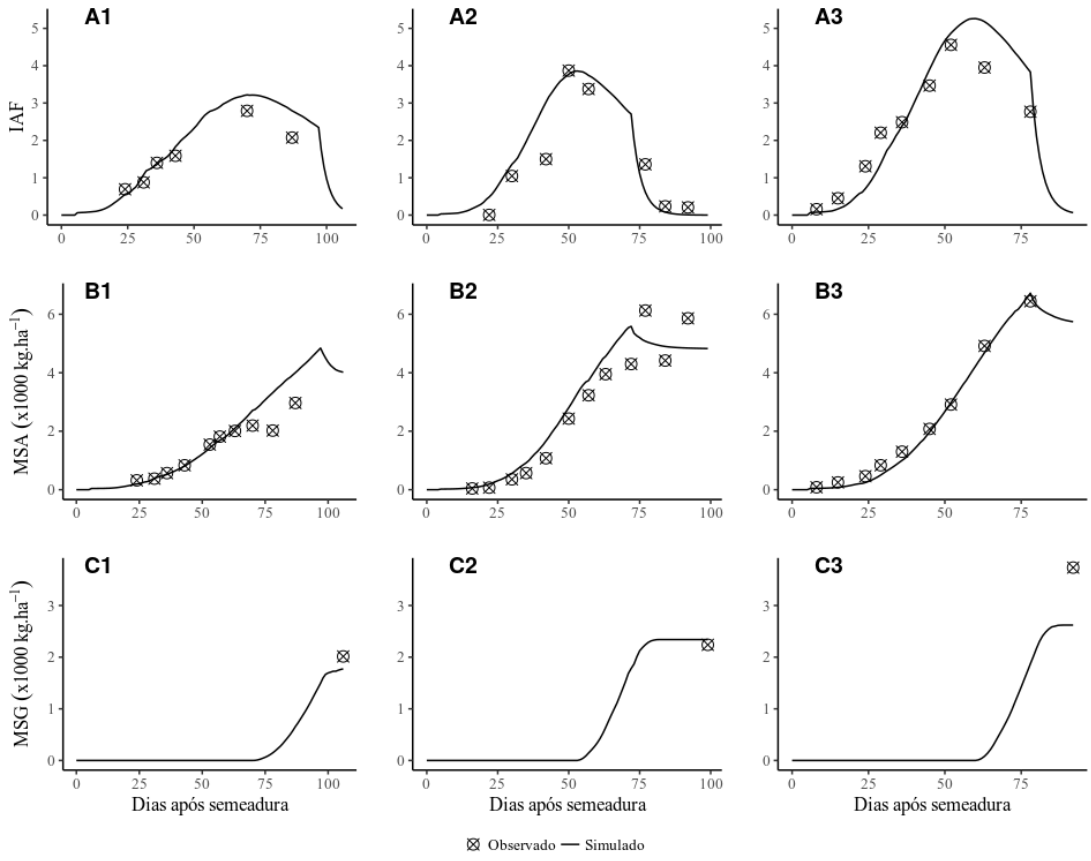

Figura 3.5: Variação ao longo do ciclo das variáveis índice de área foliar (IAF)(A), massa seca da parte aérea (MSA)(B) e massa seca de grãos (MSG)(C), para os experimentos E1(1), E2(2) e E3(3), cultivar Pérola.

Tabela 3.6: Indicadores estatísticos de desempenho do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean para a cultivar Pérola, grupo comercial carioca. Tal que $\overline{M}_{\mathrm{O}}$ e $\overline{M}_{\mathrm{S}}$ são os valores médios dos dados observados e simulados, respectivamente

Variável	$\overline{M}_{\mathrm{O}}$	$\overline{M}_{\mathrm{S}}$	R^2	DMA	RMSE	d	NS
E1							
IAF	$1,570$	$1,805$	$0,955$	$0,295$	$0,369$	$0,746$	$0,731$
MSG (kg ha^{-1})	2014	1774	–	240	240	–	–
MSA (kg ha^{-1})	1464	1715	$0,914$	340	$554,409$	$0,774$	$0,574$
E2							
IAF	$1,449$	$1,635$	$0,830$	$0,485$	$0,654$	$0,779$	$0,769$
MSG (kg ha^{-1})	2239	2341	–	102	102	–	–
MSA (kg ha^{-1})	2702	2909	$0,914$	552	$666,241$	$0,858$	$0,905$
E3							
IAF	$2,372$	$2,500$	$0,921$	$0,547$	$0,672$	$0,771$	$0,779$
MSG (kg ha^{-1})	3734	2621	–	1113	1113	–	–
MSA (kg ha^{-1})	2142	2026	$0,996$	192	$216,300$	$0,945$	$0,989$

Os indicadores estatísticos mostraram que o modelo possui capacidade suficiente de representar com precisão e acurácia as informações coletadas em campo, ao qual evidencia a robustez da ferramenta com relação a aplicabilidade da calibração realizada em simulações com ambientes diversos.

3.3.3 Interação genótipo x ambiente e sua representação pelo modelo

As diferenças significativas entre experimentos baseados em repetições e casualidade (ZIMMERMANN, 2014) podem ser utilizados para comprovar a eficiência do modelo ao longo do tempo e em diferentes ambientes. LOBELL; SCHLENKER; COSTA-ROBERTS (2011) fizeram uso de modelos já calibrados para observar as diferenças produtivas no trigo (Triticum spp.), milho ($Zea\ mays$), soja ($Glycine\ max$) e arroz ($Oryza\ sativa$), justificadas pela variação climática no período de 1980 a 2008. Para tanto, visto que o modelo apresentou desempenho satisfatório em representar as condições experimentais observadas, foi possível determinar a variabilidade entre experimentos, tomando como base as simulações para os 30 anos anteriores.

A análise descritiva da distribuição dos resultados referentes ao índice de área foliar máxima (IAFmax, adimensional), produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e biomassa total ao fim do ciclo (kg ha^{-1})(Figura 3.6), obtidos pelas simulações do modelo, mostram diferenças consideráveis entre os experimentos, em ambas as cultivares. Respostas semelhantes foram observados apenas nos experimentos E2 e E3, para o material genético BRS Esplendor com relação ao IAFmax, onde suas respectivas medianas se encontram entre o 1º e 3º quartis de ambos.

O agrupamento realizado pelo teste de médias de Tukey mostrou que para a maior parte das variáveis, há diferença significativa na variabilidade experimental em todos os experimentos. Apenas a variável IAFmax na cultivar BRS Esplendor se mostrou estatisticamente semelhante em E2 e E3, de modo que as demais variáveis apresentam diferença significativa entre elas. A discrepância na distribuição dos dados descritos no diagrama de caixa (Figura 6), permitiu que a análise de agrupamento de médias fosse realizada com nível de significância estatística (α) de 1%, ou seja, dois ou mais experimentos são considerados semelhantes estatisticamente, caso a média dos dados obtidos de um experimento esteja contida no intervalo de confiança (onde estão 99% dos dados) do outro (Tabela 3.7).

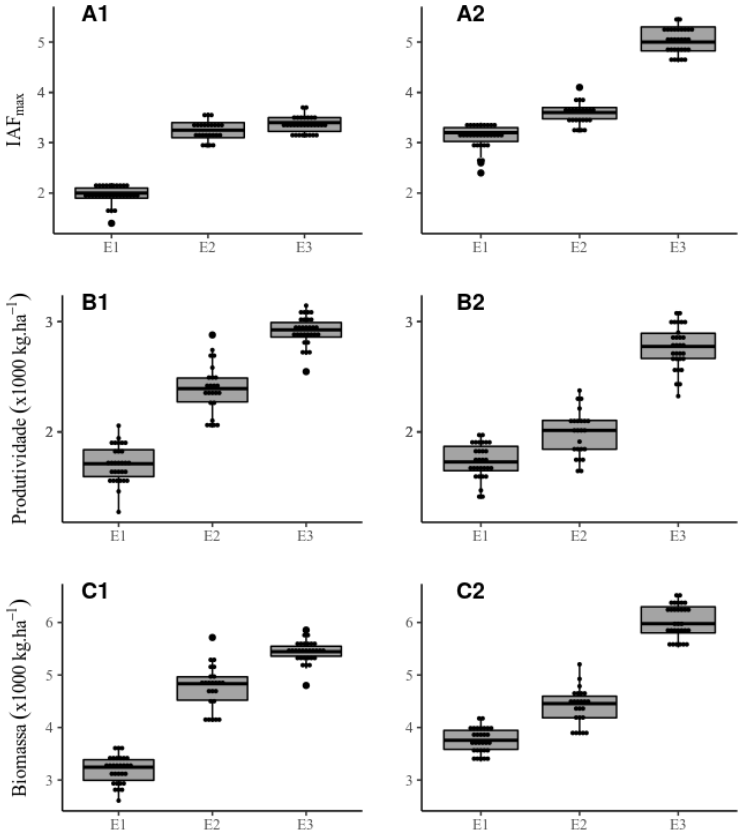

Figura 3.6: Análise descritiva da distribuição dos resultados referentes a simulação do índice de área foliar máximo obtido (IAFmax)(A), Produtividade de grãos (B) e Biomassa total ao fim do ciclo (C), para os três experimentos e as cultivares BRS Esplendor (1) e Pérola (2).

Tabela 3.7: Teste de diferença significativa de Tukey para os valores médios de índice de área foliar máximo (IAF$_{max}$), produtividade e biomassa total produzida, por cada ciclo produtivo ao longo de 30 anos, com nível de significância (α) de 1%.

Experimento	IAF$_{max}$	Produtividade (kg ha^{-1})	Biomassa (kg ha^{-1})
BRS Esplendor			
E1	$1,96 \pm 0,18$a	$1709,06 \pm 168,77$a	$3195,73 \pm 263,30$a
E2	$3,23 \pm 0,19$b	$2390,58 \pm 226,71$b	$4763,87 \pm 414,91$b
E3	$3,36 \pm 0,15$b	$2921,50 \pm 131,66$c	$5439,36 \pm 205,00$c
Pérola			
E1	$3,13 \pm 0,23$a	$1735,06 \pm 154,18$a	$3751,00 \pm 232,28$a
E2	$3,57 \pm 0,22$b	$1985,83 \pm 204,97$b	$4398,75 \pm 353,39$b
E3	$5,04 \pm 0,25$c	$2766,90 \pm 196,01$c	$6036,80 \pm 310,01$c

Comparando-se os dados observados experimentalmente e as informações obtidas através de simulações, em experimentos que apresentam diferenças pontuais e locais, é possível notar a eficiência do modelo CROPGRO-Drybean em representar os diferentes ambientes, o que reforça o pressuposto de que estas ferramentas podem ser empregadas na caracterização dos cultivos nacionais de feijoeiro-comum, grupos comerciais carioca e preto, aplicado aos possíveis cenários climáticos atribuídos ao ambiente dos quais as plantas estarão sujeitas em seu ciclo produtivo.

3.4 Conclusão

O modelo apresentou boa confiabilidade em representar as informações relativas ao índice de área foliar, massa da parte aérea e massa seca de grãos. A variabilidade espacial e temporal dos experimentos, bem como as diferenças relativas as variáveis climáticas, foram percebidas pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean, evidenciando a capacidade desta ferramenta em representar, dadas as condições e ambientes contrastantes, os cultivos nacionais de feijoeiro-comum, dos grupos comerciais preto e carioca.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, J. C. BRS Estilo: nova cultivar de feijoeiro comum do grupo comercial preto para o Distrito Federal. Embrapa Arroz e Feijão, v. 6, p. 1–4, 2010.

ALI, S. et al. Correlation of Environmental Conditions with Okra Yellow Vein Mosaic Virus and Bemisia tabaci Population Density. International Journal of Agriculture and Biology, v. 7, n. 1, p. 142–144, 2005.

ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guairá: Agropecuária, 2002.

BOOTE, K. J. et al. PNUTGRO, peanut crop growth simulation model. Florida Agricultural Experiment Station Journal, n. 8420, 1989.

BOOTE, K. J. et al. The CROPGRO model for grain legumes. Understanding options for agricultural production., v. 1983, n. 1985, p. 99–128, 1998.

BOOTE, K. J. Concepts for calibrating crop growth models. DSSAT version, v. 3, n. 4, p. 179–200, 1999.

BOOTE, K. J. et al. Experience with Water Balance, Evapotranspiration, and Predictions of Water Stress Effects in the CROPGRO Model. In: Response of Crops to Limited Water: Understanding and Modeling Water Stress Effects on Plant Growth Processes. [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2008. v. advancesinagricp. 59–103.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. Agronomy journal, v. 88, n. 5, p. 704–716, 1996.

BOOTE, K. J.; PICKERING, N. B. Modeling Photosynthesis of Row Crop Canopies. HortScience, v. 29, p. 1423–1434, 1994.

CAMARGO ROCHA, V. P. et al. Adaptabilidade e estabilidade da característica produtividade de grãos dos grupos comerciais carioca e preto de feijão. Semina: Ciências Agrárias, v. 31, n. 1, 2010.

CHALLINOR, A. J. et al. Improving the use of crop models for risk assessment and climate change adaptation. Agricultural Systems, v. 159, p. 296–306, 2017.

CHANG, J. Climate and Agriculture. [s.l.] Routledge, 2017.

CIAT. Beans | CIAT. Disponível em: <https://ciat.cgiar.org/what-we-do/breeding-better-crops/beans/>. Acesso em: 25 set. 2018.

CONAB. Monitoramento agrícola- Safra 2017/2018. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, v. 5, n. 9, p. 1–178, 2018a.

CONAB. Monitoramento agrícola- Safra 2017/2018. Acompanhamento da safra brasileira: grãos, v. 5, n. 12, p. 155, 2018b.

DOS SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. ed. [s.l.] Brasília, DF: Embrapa, 2013.

EMBRAPA. Feijão - BRS Esplendor - Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/produto-servico/582/feijao---brs-esplendor>. Acesso em: 21 set. 2018a.

EMBRAPA. Feijão - Pérola - Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/produto-servico/520/feijao---perola>. Acesso em: 21 set. 2018b.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. Solar Energy, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1 jan. 1982.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Produção de feijão. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Departamento de Agricultura, 2007.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Special Report, v. 80, 1977.

FIEGENBAUM, V. et al. Influência do Déficit Hídrico Sobre os Componentes de Rendimento de Três Cultivares de Feijão. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 26, n. 2, p. 275–280, 1991.

FREITAS, F. D. O. Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 41, n. 7, p. 1199–1203, 2006.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G. Regional irrigation requirements for dry bean based on the simulation model CROPGRO and a geographic information system. ANNUAL REPORT-BEAN IMPROVEMENT COOPERATIVE, v. 44, p. 41–42, 2001.

HEINEMANN, A. B. et al. Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil. Agricultural and Forest Meteorology, v. 225, p. 57–74, 2016.

HOOGENBOOM, G. et al. BEANGRO: A Process-Oriented Dry Bean Model with a Versatile User Interface. Agronomy Journal, v. 86, n. 1, p. 182, 1994.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. (EDS.). Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016.

JONES, J. W. et al. SOYGRO V5. 42, soybean crop growth simulation model. User's Guide. Florida Agricultural Experiment Station Journal, v. 8304, p. 83, 1989.

JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 2003.

JONES, J. W. et al. Estimating DSSAT Cropping System Cultivar-Specific Parameters Using Bayesian Techniques. In: Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2011. v. advancesinagricp. 365–394.

KIMBALL, B. A.; BELLAMY, L. A. Generation of diurnal solar radiation, temperature, and humidity patterns. Energy in Agriculture, v. 5, n. 3, p. 185–197, nov. 1986.

LIBERATO, J. R. Desenvolvimento e avaliação do Software Quant para quantificação de doenças de plantas por análise de imagens. [s.l.] Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 2003.

LOBELL, D. B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J. Climate trends and global crop production since 1980. Science (New York, N.Y.), v. 333, n. 6042, p. 616–20, 29 jul. 2011.

MAKOWSKI, D. et al. Parameter estimation for crop models. [s.l.] Elsevier, Amsterdam, 2006.

MARIN, F. R. et al. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. Agronomy Journal, v. 103, n. 2, p. 304, 2011.

MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. [s.l.] Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, 2014.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1 abr. 1970.

OLIVEIRA, E. C. DE. Desempenho do modelo CROPGRO-Dry bean em estimar a data de semeadura e a produtividade do feijoeiro. [s.l.] Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2007.

PARTON, W. J.; LOGAN, J. A. A model for diurnal variation in soil and air temperature. Agricultural Meteorology, v. 23, p. 205–216, 1 jan. 1981.

PATHAK, T. B. et al. Use of Global Sensivity Analyzis for CROPGRO Cotton Model Development. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 1, p. 2295–2302, 2007.

PORTER, C.; BRAGA, R.; JONES, J. W. An approach for modular crop model development. International Consortium for Agricultural Systems Applications, v. 2440, p. 13, 2000.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using alrge-scale parameters. Monthly weather review, v. 100, n. 2, p. 91–92, 1972.

RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. Agricultural Water Management, v. 87, n. 1, p. 91–105, 10 jan. 2007.

RUANE, A. C. et al. Carbon-temperature-water change analysis for peanut production under climate change: A prototype for the AgMIP coordinated climate-crop modeling project (C3MP). Global Change Biology, v. 20, n. 2, p. 394–407, 2014.

SANTOS, M. G. DOS. Calibração e teste do modelo CROPGRO para a cultura do feijão. [s.l.] Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2015.

SCARPELLINI, J. R. et al. Controle químico da mosca-branca Bemisia Tabaci (Gennadius , 1889) biótipo B (Hemiptera: Aleyrodidae) na cultura do feijoeiro. Arquivos do Instituto Biológico, v. 69, n. 3, p. 23–27, 2002.

SENTELHAS, P. C. et al. BHBRASIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999.

SPITTERS, C. J. T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part II. Calculation of canopy photosynthesis. Agricultural and Forest Meteorology, v. 38, n. 1–3, p. 231–242, 1 out. 1986.

SPITTERS, C. J. T.; TOUSSAINT, H. A. J. M.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. Agricultural and Forest Meteorology, v. 38, n. 1–3, p. 217–229, 1 out. 1986.

STATISTA. Dry beans: production volume by country worldwide 2017 | Statistic. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/722054/dry-beans-production-volume-by-country-worldwide/>. Acesso em: 25 set. 2018.

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

VAN RAIJ, B. et al. (EDS.). Boletim 100: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. [s.l.] IAC, Instituto Agronômico de Campinas, 1997.

VIEIRA, C. O feijoeiro-comum: cultura, doenças e melhoramento. Viçosa: UFV, 1967.

WALLACH, D. et al. Parameter Estimation for Crop Models. Agronomy Journal, v. 93, n. 4, p. 757, 2001.

WALLACH, D. Crop Model Calibration: A Statistical Perspective. Agronomy Journal, v. 103, n. 4, p. 1144, 2011.

WILKERSON, G. G. et al. Modeling Soybean Growth for Crop Management. Transactions of the ASAE, v. 26, n. 1, p. 0063–0073, 1983.

WILLMOTT, C. J. On the Evaluation of Model Performance in Physical Geography. In: Spatial Statistics and Models. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 443–460.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. International Journal of Climatology, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 2012.

WUTKE, E. B. B. et al. Estimativa de temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 8, n. 1, p. 55–61, 2000.

YOKOYAMA, L. P. et al. Nível de aceitabilidade da cultivar de feijão “Pérola”: avaliação preliminar. Embrapa Arroz e Feijão, p. 21, 1999.

ZIMMERMANN, F. J. P. Estatística aplicada à pesquisa agrícola. Embrapa Informação Tecnológica, p. 582, 2014.

4 PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE FEIJÃO-COMUM EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Resumo

O Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), um grão de alta importância para a alimentação de milhões de pessoas, principalmente em países em desenvolvimento. As mudanças climáticas previstas para o século XXI são tidas como uma possível ameaça a segurança alimentar do planeta, visto que se espera um considerável aumento populacional e, portanto, uma crescente demanda por alimentos. Neste contexto, buscou-se projetar o impacto das mudanças climáticas sobre os cultivos de feijoeiro-comum baseado numa abordagem que permita representar de modo consistente a produção brasileira deste grão. Foram considerados os cenários representativos de concentração de CO_2 atmosférico RCP 4.5 e RCP 8.5, apresentados pelo 5º relatório do IPCC, gerados a partir de 20 modelos de circulação global da atmosfera, para toda a área de estudo. Tais séries climáticas foram combinadas ao modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean previamente calibrado para dois grupos comerciais distintos e representativos de feijão no Brasil ("Preto" e "Carioca"), permitindo assim estabelecer um panorama produtivo para a cultura no período de 2040 a 2070. Considerando as 3 safras anuais e ambos os grupos comerciais, espera-se um aumento da produção brasileira entre 9,8% e 12,7% para os cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente. O aumento da eficiência fotossintética ocasionado pelo incremento da concentração atmosférica de CO2 foi identificado como principal causa do ganho produtivo. Entretanto, a depleção metabólica ocasionado pelo aumento de temperatura poderá aumentar o risco de se produzir abaixo da média esperada, principalmente para os cultivos de 1ª safra (ou "verão") na região Sul e 3ª safra (ou "inverno") nas regiões centrais.

Palavras-chave: Segurança alimentar; Modelagem agrícola; Simulação

Abstract

Brazil is one of the main world producers of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as grain has a high nutrition value for human feed,. The climate changes predicted to the 21st century are seen as possible threat to planet's food security, which is expected a considerable population increase, and hence, a crescent demand for food, mainly in developing countries. The aim of this study was to project the impact of climate change over common bean cropping systems using a consistent approach for upscaling and well represent the Brazilian production of this grain. It was considered the representative CO2 concentration pathways scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, presented by the 5th IPCC Assessment Report, obtained by 20 atmospheric global circulation models, for the whole approached area. Once the climatic data were combined with the DSSAT/CROPGRO-Drybean crop model, previously calibrated for two commercial groups of common beans in Brazil ("Black" and "Colors"). We found that the three main cropping systems used in Brazil, for both commercial groupsthe a production would increase by 9,8% and 12,7% for RCP 4.5 and 8.5 scenarios, respectively. The increase of photosynthesis efficiency due the addition of atmospheric CO2 concentration was identified as the main cause of productive gain. By the other hand, the metabolic depletion justified by the mean air temperature raise, could increase the risk of productions above the average expected, mainly for 1st ("summer") cropping systems in the south and 3rd ("winter") cropping systems at central regions.

Keywords: Food security; Crop modeling; Simulations

4.1 Introdução

Buscar entender os impactos das mudanças climáticas sobre os cultivos agrícolas têm sido o alvo de estudo em vários trabalhos científicos da atualidade, envolvendo temas que abordam desde os prospectos políticos, econômicos e sociais ocasionados por estas mudanças (SHOGREN; TOMAN, 2010; STERN, 2008), até as possíveis alterações dos ecossistemas naturais frente ao novo panorama climático (CRAMER et al., 2001). Contudo, para países em desenvolvimento e altamente dependentes do setor agropecuário, como o Brasil, os efeitos de um clima adverso para o qual as culturas não estão adaptadas, poderá implicar em uma transformação relevante quanto ao cenário agrícola atual (HOWDEN et al., 2007; MENDELSOHN; DINAR, 1999).

O Brasil é atualmente o segundo maior produtor mundial de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.)(FAO, 2016), um produto de alta relevância para a alimentação humana como uma das principais frontes de proteína para mais de 400 milhões de pessoas que vivem em regiões tropicais (CIAT, 2016). Para tanto, estudos que envolvem a interação das mudanças climáticas e as culturas agrícolas, são também retratados sob a ótica da segurança alimentar, uma vez que se espera um incremento populacional de aproximadamente 3 bilhões de pessoas, até a metade do século 21 (GODFRAY et al., 2010; WHEELER; VON BRAUN, 2013).

Dentro do assunto relacionado as alterações climatológicas esperadas para o século 21, a cultura do feijão-comum tem sido abordada em estudos recentes. HEINEMANN et al. (2017) realizaram um estudo acerca das situações de estresse hídrico provocado pela baixa umidade, do qual se prevê aumento da probabilidade de ocorrência em até 70% para cultivos de ambiente seco e em cenários de mudança climática extrema. BEEBE et al. (2011), reforçam ainda que estudos sobre o impacto das mudanças climáticas voltadas ao cultivo de feijão-comum em países em desenvolvimento, são decisivos para direcionar os programas de melhoramento genético nestas regiões. MCCLEAN et al. (2011), propõem uma agenda multidisciplinar com o objetivo de incrementar a produtividade da cultura, visando diminuir as incertezas sobre futuros cenários relacionados a segurança alimentar. Os trabalhos mostrados nesta breve revisão ressaltam a necessidade de se discutir os riscos associados a produção brasileira de feijão no âmbito das mudanças climáticas previstas, sendo, portanto, imprescindível para o planejamento agrícola nacional.

Essas projeções, contudo, podem conter uma série de incertezas provenientes do objeto de estudo (e.g, materiais genéticos, manejo dos cultivos, clima, etc) (MARIN, 2014), do qual recomenda-se o uso de um conjunto de cenários possíveis, obtidos a partir dos vários modelos climáticos de circulação global (GCM) já empregados intensamente nesta linha de estudo (ROSENZWEIG et al., 2018). Esta metodologia vem sendo recomendada pelo projeto Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP), combinando projeções climáticas futuras com modelos agrícolas baseados em processos biofísicos (MBP) (ROSENZWEIG et al., 2013). As ferramentas utilizadas para a geração destes cenários possuem grande relevância científica, sendo amplamente testadas quanto sua eficiência em representar a realidade, bem como no entendimento do efeito das mudanças climáticas na agricultura (LOBELL et al., 2008; MARIN; RIBEIRO; MARCHIORI, 2014).

Neste contexto, buscando contribuir para debate internacional sobre o futuro da segurança alimentar, o presente capítulo tem como objetivo simular a variabilidade da produção nacional de feijão-comum frente as mudanças climáticas esperadas, para o período de 2040 a 2070. Os objetivos específicos do trabalho são: (i) analisar o quão as alterações previstas para o clima futuro serão responsáveis por mudanças no cenário produtivo nacional; (ii) identificar as regiões produtoras com maior risco de ter sua produção negativamente afetada por estas mudanças.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Definição das áreas representativas e Zonas Homogêneas

Para que o estudo seja considerado minimamente representativo para a produção nacional de feijão, buscou-se delimitar uma área que correspondesse ao menos 80% do total produzido ao decorrer das safras. Segundo

dados da CONAB (2018), as regiões Sul (S), Centro-Oeste (CO) e Sudeste (SE), acrescido a produção referente ao Estado da Bahia (BA) pertencente a região Nordeste (NE), representam aproximadamente 81,15% do montante produzido nas safras dos dois últimos anos. Nestas regiões predomina-se os cultivos de feijão dos grupos "Preto" e "Cores", sendo o primeiro cultivado principalmente na região Sul, e o segundo possuindo alta relevância nos estados de Minas Gerias (MG) (maior produtor), Paraná (PR), Goiás (GO), São Paulo (SP), Mato Grosso (MT) e Bahia (BA), onde se concentra cerca de 75% da produção deste grupo na região NE (Figura 4.1).

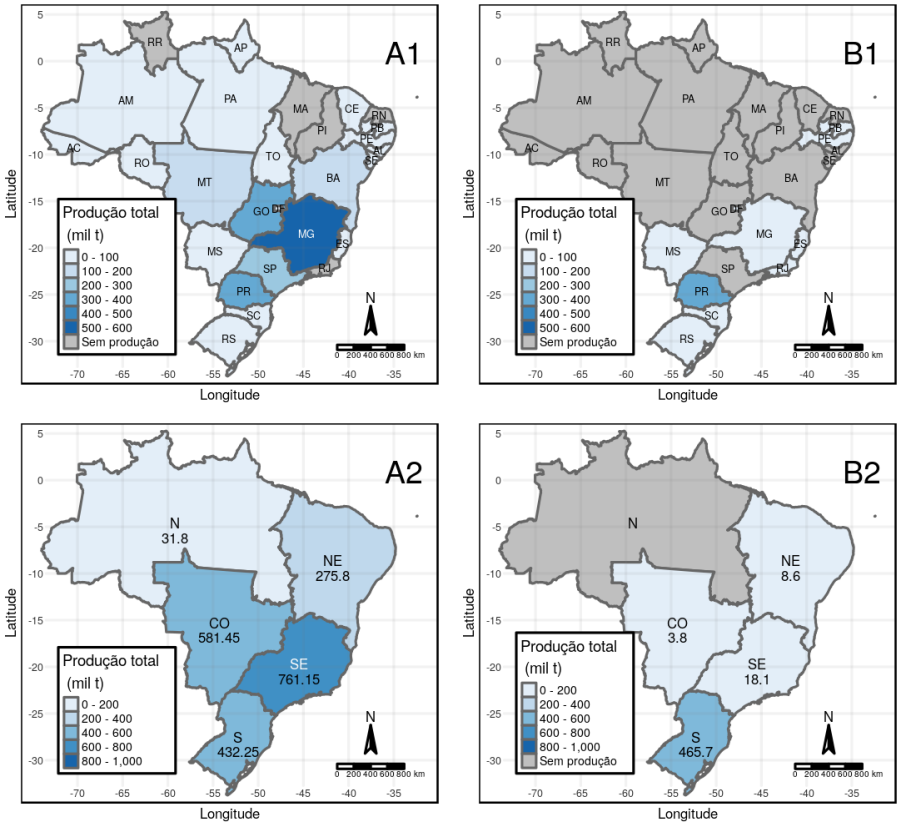

Figura 4.1: Informação da produção nacional de feijão-comum dos grupos comerciais "Cores" (A) e "Preto" (B), dividido por Estados (1) e por regiões (2).

Uma vez definidos as principais regiões e estados produtores do Brasil, foram consultadas as bases públicas de informações referentes a produção municipal da cultura (mesmo que em pequena quantidade), entre os anos de 2011 e 2016 (IBGE, 2018). A base consultada não difere os dados produtivos por grupo comercial, mas sim por safra (1ª, 2ª e 3ª safra) individualmente para cada município brasileiro, permitindo que sejam excluídos os locais dentro da área de seleção onde não há histórico de atividade produtora no período citado. Portanto, para cada safra e grupo comercial, foram elaborados mapas de representação dos cenários produtivos futuros, incluindo apenas os municípios com algum registro de produção.

Após identificação dos municípios produtores, o passo seguinte se dá pela determinação das zonas homogêneas (ZH) correspondentes para cada localidade. A simplificação pela homogeneização das características edafoclimáticas semelhantes em uma dada região do planeta, é um trabalho já realizado e descrito pela metodologia proposta por VAN WART et al. (2013). A classificação segundo o critério de zonas homogêneas, se baseia na caracterização de uma região a partir de 3 argumentos: 1) GDD – Taxa de crescimento das culturas em Graus-dia, cuja temperatura basal é fixada em 0º C. A classificação para este argumento, varia de 1 à 10; 2) ARIDITY – Índice anual de aridez, calculada pela razão entre média anual da precipitação pluvial total e a média anual da evapotranspiração potencial dos cultivos. Varia de 0 à 9; 3) SEASONALIT – Sazonalidade (taxa de variação mês a mês) da temperatura e evapotranspiração potencial dos cultivos. Varia de 01 a 03. A partir desta informação numérica, são

determinadas as zonas homogêneas, de modo que os municípios classificados com a mesma numeração, possuem condições de solo e clima semelhantes. Este número de classificação é construído pela junção dos argumentos que compõem uma zona homogênea. Por exemplo, 7601 significa que GDD é igual à 7, ARIDITY tem valor 6, enquanto SEASONALITY é dado como 01.

A partir das informações de localização dos municípios contidos nas principais regiões produtoras de feijão-comum no Brasil, foram identificadas 24 ZH's, representados na Figura 4.2, tal que cada cor representa no mapa uma zona homogênea diferente em cada região onde ocorre pelo menos uma safra por ano. A relação simplificada, contendo a descrição das estações meteorológicas, bem como os solos representativos de cada ZH e seus 10 municípios de maior produção, estão detalhados no Anexo B e C.

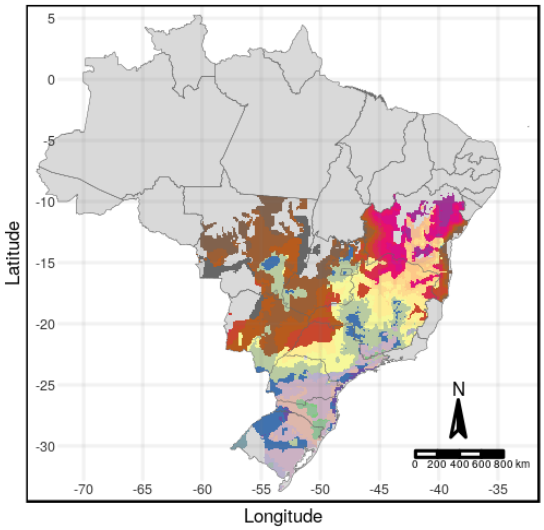

Figura 4.2: Distribuição das 24 Zonas Homogêneas que englobam todos os municípios produtores de feijão-comum presentes na área representativa da produção brasileira do grão.

4.2.2 Caracterização dos solos predominantes

Para que os modelos possam gerar as simulações, é imprescindível que os solos de cada local selecionado sejam caracterizados e alocados de acordo com os padrões de leitura utilizados pelo modelo. Com o intuito de automatizar tal tarefa e melhorar a eficiência do procedimento para novas simulações, fez-se uso do Mapa de Solos da EMBRAPA (EMBRAPA, 2014) e da plataforma WISE (BATJES, 2002), executando o cruzamento destas informações através de scripts de automação. Com as informações de ambos os bancos de dados e efetuada a conversão da taxonomia utilizada pela WRB/FAO (FAO, 1998) para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006), obteve-se o arquivo na formatação correta para ser lido e processado pelos modelos, indicando para cada local a classificação e as características pedológicas que compõem a diferenciação para cada tipo de solo.

4.2.3 Cenários futuros de mudanças climáticas

Para a geração dos cenários climáticos no período de 2040 à 2070, foi utilizada a ferramenta elaborada pelo projeto Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP) (HUDSON; RUANE, 2013), ao qual conta com a possibilidade de utilizar até 20 modelos de circulação global (GCM), para estimar as características climatológicas espacialmente regionalizadas (temperaturas máximas e mínimas, e o volume de chuvas, em escala diária) para cada ZH previamente selecionada, com base nas projeções futuras referentes às concentrações CO_2 atmosférico, tal como realizado na fase 5 do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) (TAYLOR et

al., 2012). A descrição de cada GCM, a partir das informações detalhadas por RUANE et al. (2015), estão descritos no Anexo D.

Os cenários futuros de concentração de CO_2 atmosférico são representados pela sigla RCP (Representative Concentration Pathways), do qual são projeções dos cenários socioeconômicos e de emissão de gases-estufa (VAN VUUREN et al., 2011), baseado no forçamento radiativo da atmosfera previsto até o fim o século XXI (SHINDELL, 2013). Para o presente trabalho, foram escolhidos os RCP's 4.5(1) (cenário 1, de concentração baixa) e 8.5(2) (cenário 2, extremo de concentração) (MOSS et al., 2010).

Visto que os RCP's representam um expressivo número de conjuntos de cenários futuros de concentração de CO_2 atmosférico, foram considerados para os RCP 4.5 e 8.5, valores de concentração de 526 ppm (CLARKE et al., 2007; SMITH; WIGLEY, 2006; WISE et al., 2009) e 628 ppm (RIAHI et al., 2011), respectivamente, tomando como base os valores médios encontrados na literatura especializada, previstos para o período considerado neste estudo.

4.2.4 Ajuste do modelo de crescimento de culturas

Uma vez definidos os locais de produção, com suas respectivas caracterizações edafoclimáticas, faz-se necessário o ajuste de um modelo computacional que possa simular o efeito das condições climáticas nos cultivos de feijão-comum dentro da área representativa. O modelo escolhido foi o CROPGRO-Drybean (BOOTE et al., 1998), inserido na plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (JONES et al., 2003), do qual foi utilizado em diversas publicações recentes que envolvem o estudo do impacto das mudanças climáticas sobre os cultivos agrícolas atuais (AMOUZOU et al., 2018; BATTISTI et al., 2017; HEINEMANN et al., 2017), dado a sua confiabilidade e acurácia, uma vez que o mesmo foi testado e empregado em inúmeros trabalhos científicos ao redor do mundo (BOOTE; JONES; HOOGENBOOM, 1998).

Para efetuar as simulações de maneira representativa aos cultivos nacionais de feijão-comum, dois materiais genéticos foram previamente calibrados ao modelo e testados com intuito de verificar a eficácia em representar as condições observadas no campo (Capítulo 3). Os genótipos pertenciam aos grupos "Preto" (cultivar BRS Esplendor) e cores (subgrupo "Carioca", cultivar Pérola), respectivamente.

Após a seleção das cultivares e adição das informações referentes a caracterização do solo para cada uma das 24 ZH's, foram inseridos os dados meteorológicos das mesmas, referentes as condições climáticas atuais (1980-2010) (INMET, 2015) e para os cenários futuros RCP 4.5 e 8.5, do qual dispunham de 20 séries (uma para cada GCM) para 30 anos de dados (2040-2070). As datas de semeadura definidas foram 08/12 (1ª safra), 08/02 (2ª safra) e 08/05 (3ª safra). O modelo foi ajustado para simular as 3 safras anuais, para ambos os genótipos, de modo que aqueles locais onde não há histórico de atividade em alguma(s) safra(s) e/ou um determinando grupo, tiveram saídas excluídas após a comparação com as bases públicas municipais.

4.2.5 Análise da produção futura

No total, foram efetuadas 174960 simulações, do qual os resultados de produtividade de grãos referentes aos cenários climáticos futuros, tiveram seus valores de média e desvio padrão utilizados na comparação da variação mínima, média e máxima com relação a produtividade média atual. Para elaborar uma projeção mais detalhada dos cultivos futuros, foi quantificada a probabilidade de se produzir abaixo da média esperada para o período de 2040 a 2070, com relação aos valores atuais de probabilidade, aqui referido como "risco produtivo". O risco foi calculado pela razão entre a frequência de produções abaixo da média e o número total de anos com produção em uma determinada safra. O procedimento foi realizado para condições futuras e atuais, subtraindo-se os dois valores para determinar se, para cada cenário, houve aumento ou diminuição do risco.

4.3 Resultados

4.3.1 Mudanças climáticas esperadas

Os cenários 1 e 2 mostraram aumento da temperatura média em todas as ZH's, com variação aproximada de 1,23 a 2,06º C para RCP 4.5 e de 1,75 a 2,86 ºC para o RCP 8.5, valores superiores aos projetados pelo Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas, da Organização das Nações Unidas (IPCC, 2014) para a temperatura da superfície terrestre na metade do século XXI (0,9 a 2,0 ºC e 1,4 a 2,6 ºC, respectivamente). Com relação ao volume de chuvas, o mesmo relatório informa que regiões situadas em latitudes maiores apresentarão acréscimo na precipitação anual, enquanto haverá decréscimo em regiões de baixa latitude e de clima mais seco. Este quadro condiz com os cenários climáticos gerados pelos modelos considerados neste estudo, visto que nas zonas homogêneas identificadas ao sul do Brasil (entre latitudes 22º e 33º S) haverá aumento do volume acumulado de chuvas anualmente, ocorrendo diminuição nas regiões centrais do país (latitudes entre 9º e 22º S), com relação média histórica observada para valores atuais (Figura 4.3).

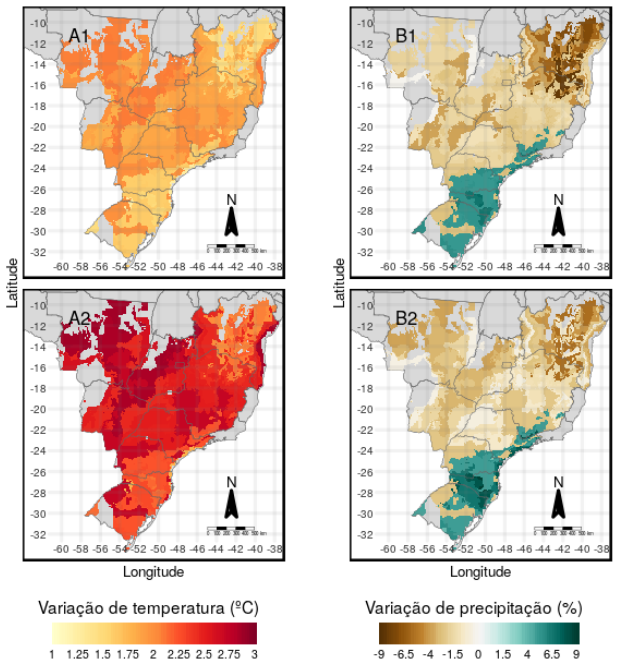

Figura 4.3: Variação média esperada para a temperatura do ar (A) e volume de chuvas (B), nos cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), tomando como base os valores atuais.

4.3.2 Cenários produtivos

Tal como representado na Figura 4.4, a 1ª safra do grupo cores (aqui representado pelo sub-grupo comercial Carioca), decorre principalmente nos estados de MT, GO, MG, BA, SP, PR, SC e RS, sendo a safra de maior produção nacional (CONAB, 2018).

Os Estados presentes nas regiões centrais do Brasil apresentaram os cenários mais negativos ou neutros na produção do grão. Nesta região, contudo, a 1ª safra de feijão é pouco expressiva nestes locais, visto que a mesma ocorre em paralelo a safra de soja, que é a cutlura prioritária na maior parte da região (DALL'AGNOL et al., 2007). Os municípios mais produtivos (Cristalina-GO e Unaí-MG), apresentaram cenários de estabilidade, havendo ligeira diminuição ou aumento da produção total nesta safra.

Os estados do Sul do Brasil, apresentaram em média, os cenários com maior aumento produtivo, sendo possível esperar que para as projeções climáticas futuras previstas, a região contará com as melhores condições ambientais para a manutenção e expansão dos cultivos nacionais de feijão-comum Carioca, em 1ª safra.

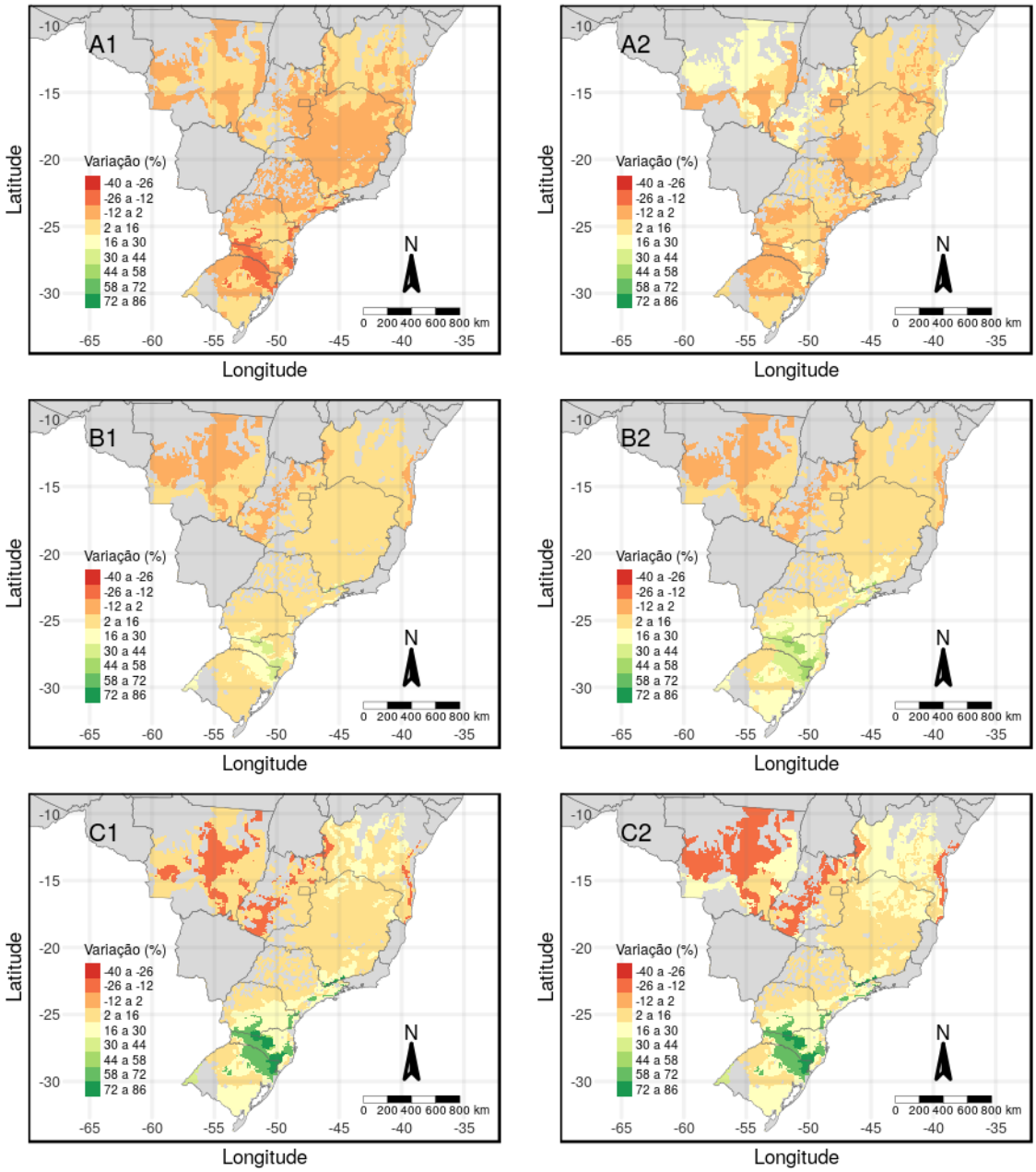

Figura 4.4: Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão "Carioca".

A 2ª safra do grupo cores, decorre principalmente nos mesmos estados da 1ª safra, com exceção do RS, e incluindo o MS, sendo este o único período ao qual este estado apresenta alguma produção desta cultura (CONAB, 2018). Em ambos os cenários produtivos, a maioria das áreas apresentaram aumento ou estabilidade na produção esperada (Figura 4.5).

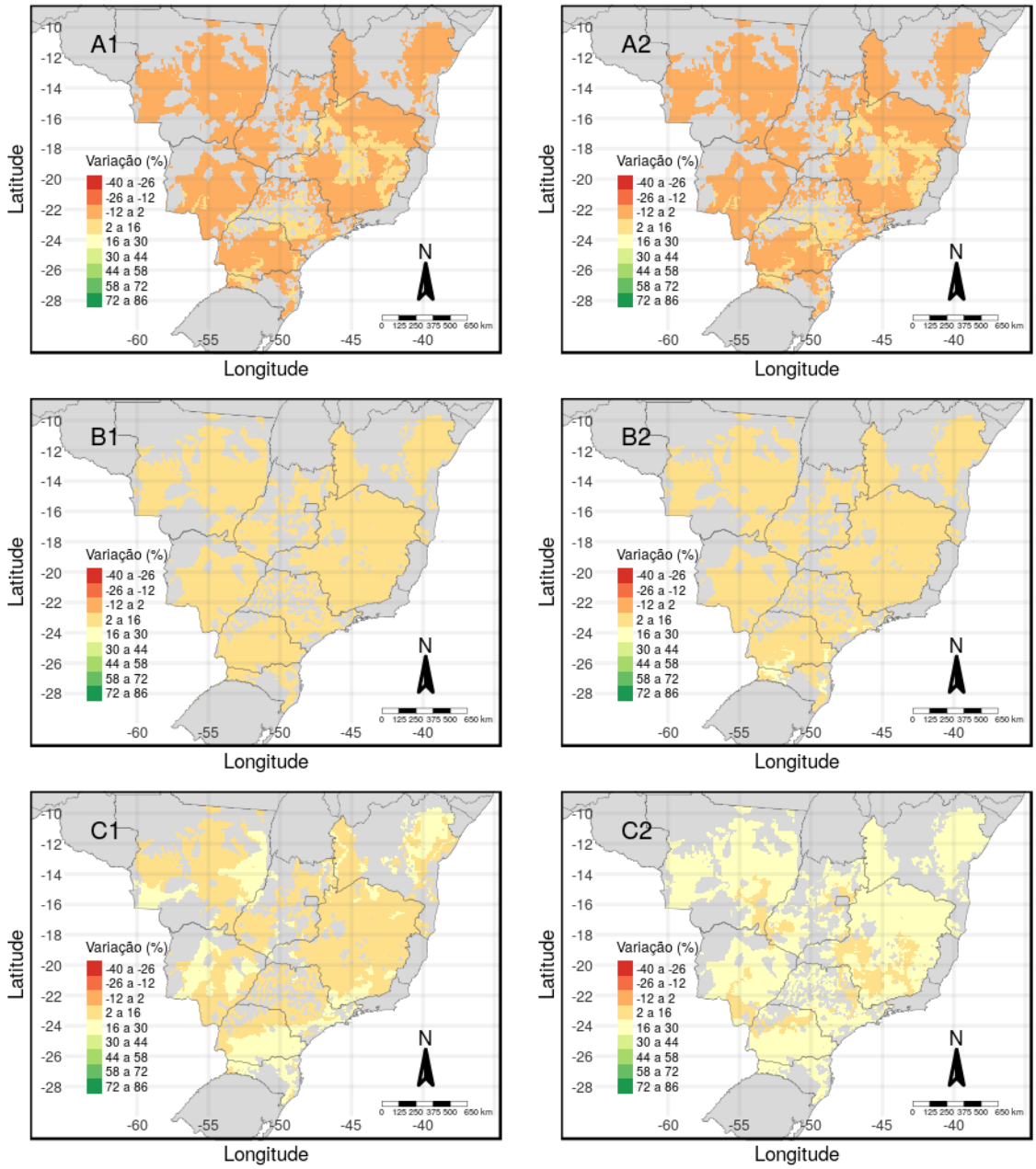

Figura 4.5: Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 2ª safra, com relação a produção atual – Feijão "Carioca".

Os cultivos de 3ª safra para feijão Carioca (Figura 4.6) apresentaram a maior variação média, com relação as condições climáticas atuais. Do ponto de vista da variabilidade prevista, esta safra poderá contar com os maiores incrementos produtivos, podendo aumentar em mais de 30% (RCP 8.5) os ganhos de produção para locais importantes, como o norte do PR e o interior de MG e GO.

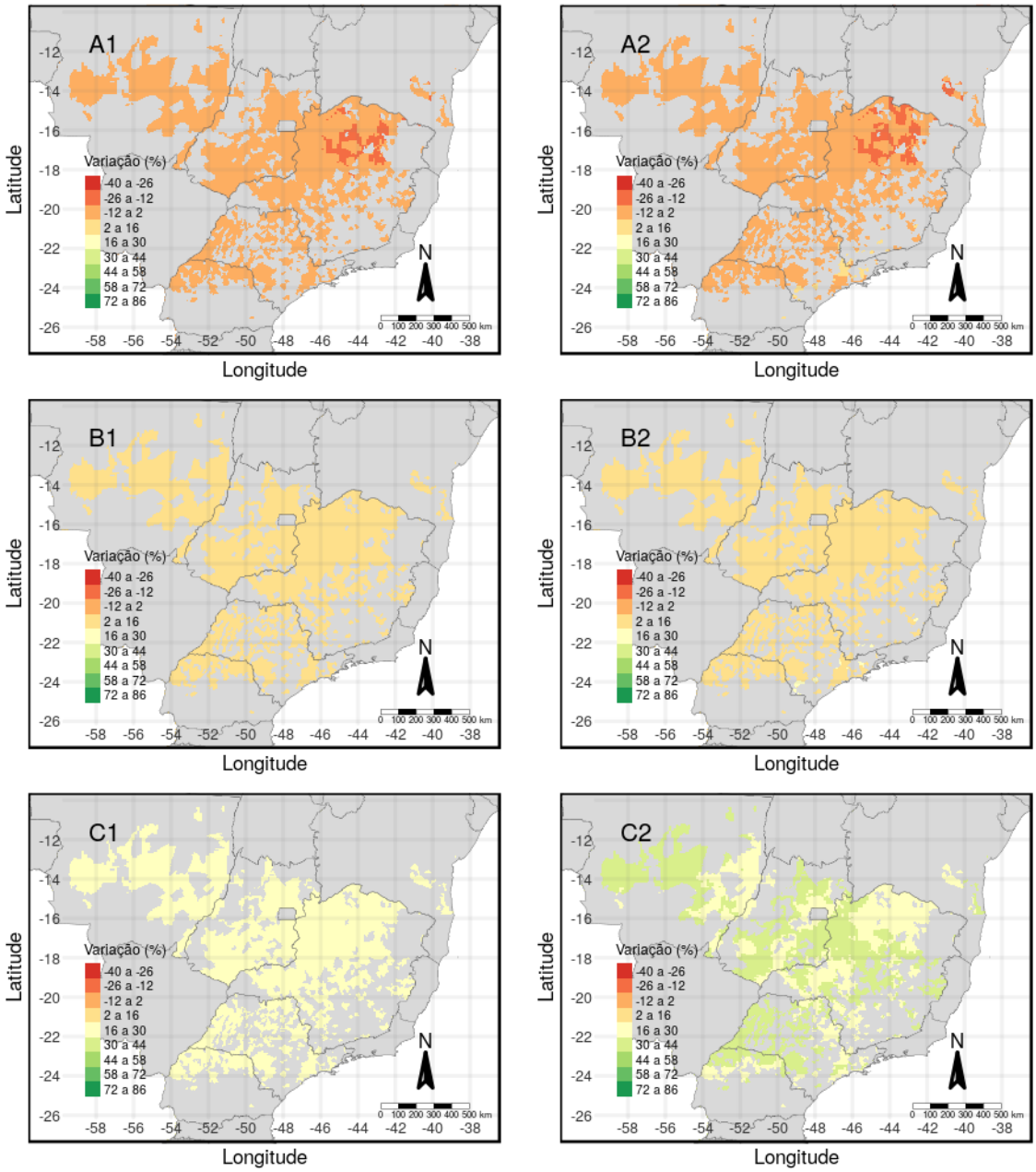

Figura 4.6: Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 3ª safra, com relação a produção atual – Feijão "Carioca".

As safras de feijão "Preto" na região Sul do Brasil (Figura 4.7) mostraram os cenários médios de maior ganho produtivo, em relação as safras de feijão "Carioca". A 1ª safra apresentou valores médios acima de 30% em ambos os cenários para zonas produtoras localizadas no interior de SC, norte de RS e sul do PR. As previsões de variação mínima para estas localidades estimaram valores de diminuição produtiva de até 6%, embora para os demais locais produtores nesta região, constaram-se variação mínima de aumento de até 10%. Os cenários de maior variação apresentaram ganhos expressivos, chegando a valores entre 50 e 75% a mais da atual capacidade produtiva.

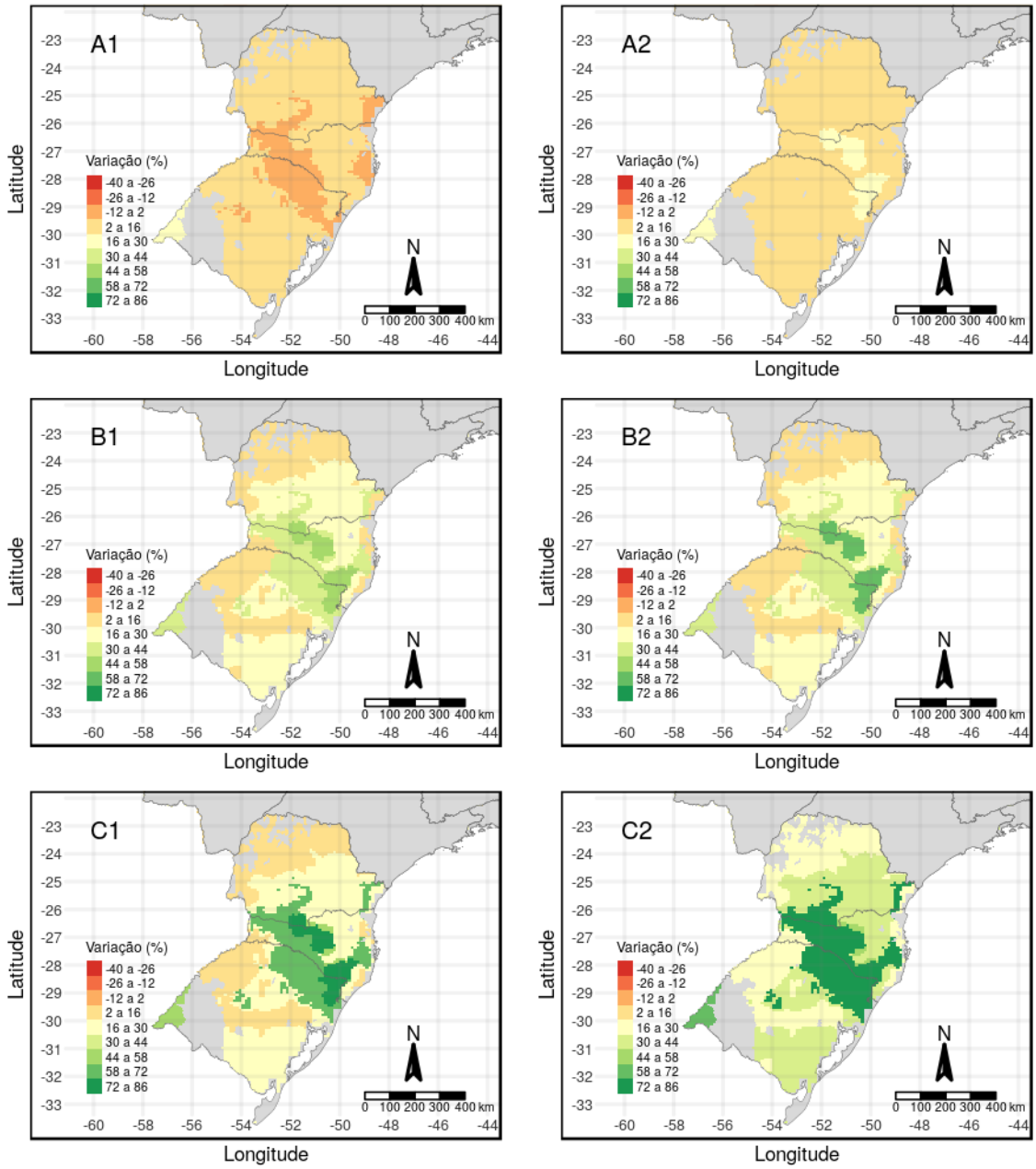

Figura 4.7: Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão "Preto".

A 2ª safra apresentou cenários de menor variação produtiva de feijão "Preto" para a região Sul brasileira. De modo geral, esta safra apresenta as menores médias de incremento produtivo, do qual a variação mínima representou diminuição de quase 10% para maior parte dos municípios produtores. A variação máxima não mostrou ganhos consideráveis como na 1ª safra, chegando a valores que oscilava entre 20 e 30% (Figura 4.8).

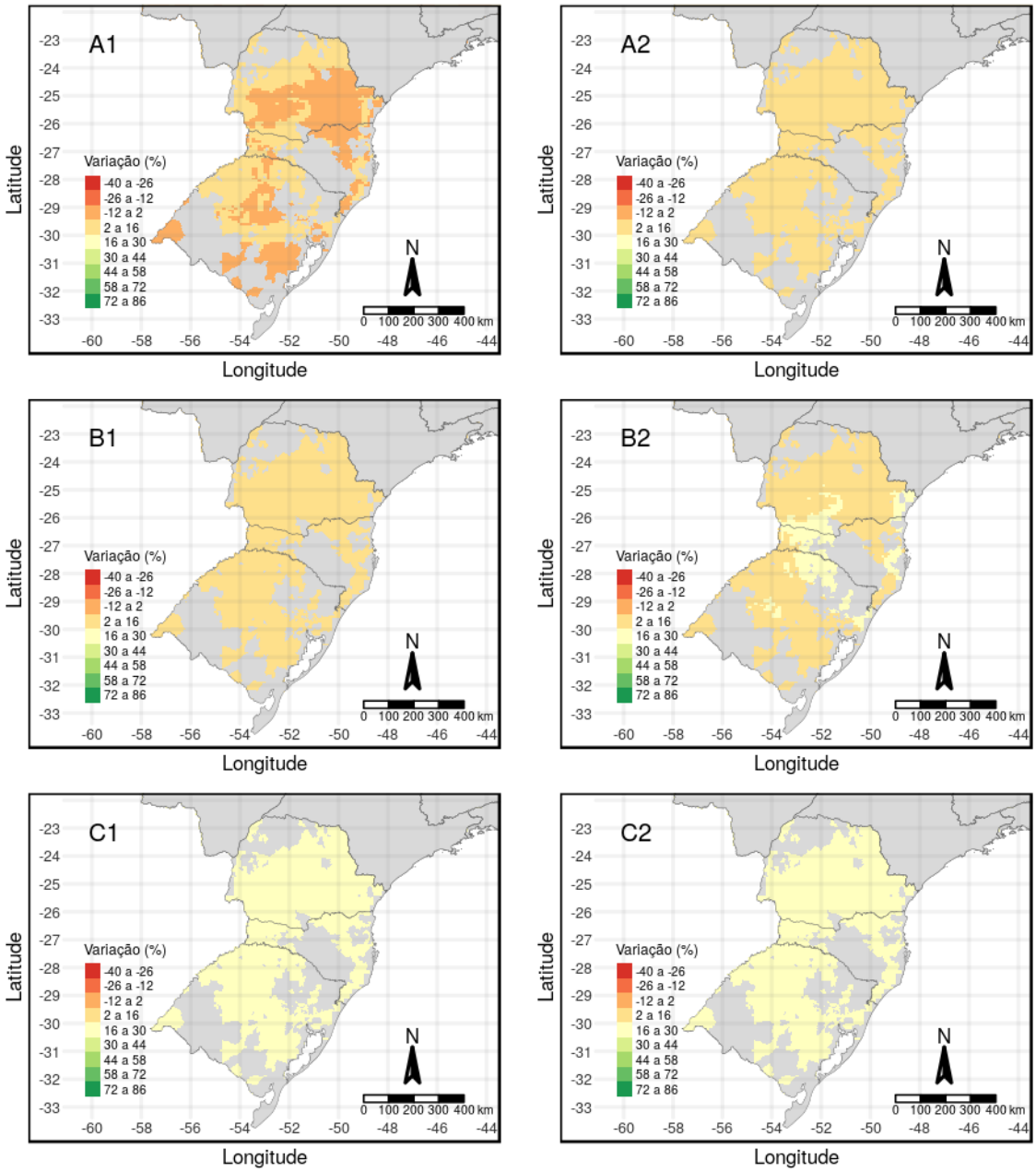

Figura 4.8: Variação mínima (A), média (B) e máxima (C) prevista, para os cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2), em cultivos de 1ª safra, com relação a produção atual – Feijão "Preto".

4.3.3 Risco produtivo

4.3.3.1 Carioca

As localidades mais ao centro do Brasil (estados de MT, GO, BA, MG e centro-oeste de SP) apresentaram os cenários de maior diminuição de risco durante a 1ª safra, com probabilidades de se produzir mais do que a média esperada até 25% menor (RCP 8.5 para o interior da Bahia, municípios da ZH 7201, Anexo C), quando comparado com valores atuais. Para esta mesma safra, embora as predições mostrem aumento da produção média para os estados do Sul (PR, SC e RS), estima-se que haverá também aumento de até 26% quanto ao risco de se produzir abaixo deste valor (RCP 4.5, ZH's 7801, 6801, 6901, 6701, etc) (Figura 4.9 A).

Por outro lado, a 2ª safra (Figura 4.9 B) apresentou cenários de aumento do risco produtivo para as áreas de produção no interior paulista e na divisa entre os estados de GO e MG, onde se localizam os maiores produtores

nacionais da cultura. Entretanto, os municípios situados no sul de GO e interior do MT, apresentaram diminuição do risco produtivo, principalmente no cenário 2, dado que esta safra possui maior importância econômica para estes locais uma vez que o cultivo de feijão-comum sucede as áreas produtoras de soja presentes nesta região (INCAPER, 2010).

A 3ª safra apresentou cenários de aumento do risco produtivo para localidades que tiveram aumento deste fator nas safras anteriores (Figura 4.9 C), sendo, portanto, a janela de cultivo menos indicada para áreas com produção no norte do PR, interior do MT e divisa GO-MG.

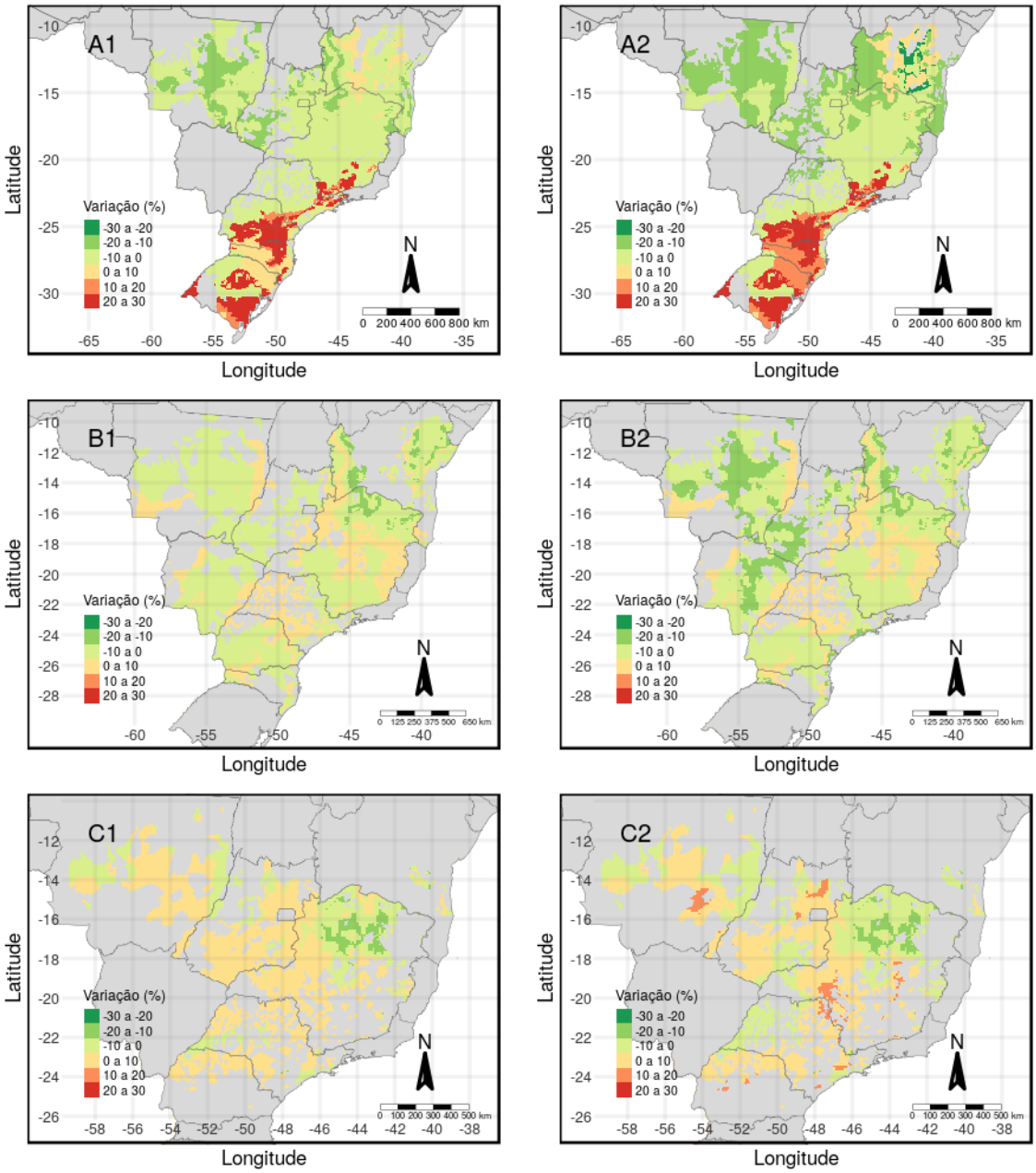

Figura 4.9: Variação do risco de se produzir abaixo da média esperada para o período de 2040 a 2070, em 1ª (A), 2ª (B) e 3ª (C) safra, cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2) – Feijão "Carioca".

4.3.3.2 Preto

Os cultivos em 1ª safra de feijão-comum preto (Figura 4.10 A) na região Sul do Brasil (principal produtor deste grupo comercial) (CONAB, 2018) apresentaram aumento expressivo do risco produtivo, em ambos os

cenários. O norte do PR e o oeste de SC e RS mostraram ligeira diminuição de 3 a 8% do risco produtivo, com relação aos valores atuais.

As estimativas para 2ª safra (Figura 4.10 B) apresentaram cenários de leve redução de risco para áreas produtoras prejudicadas na safra anterior, no centro dos estados do PR e RS, e norte de SC. Entretanto, os municípios produtores que apresentaram diminuição de risco na 1ª safra, poderão ter sua capacidade produtiva deplecionada em até 12% (RCP 4.5) na 2ª, devido à variabilidade climatológica prevista a partir dos GCM's.

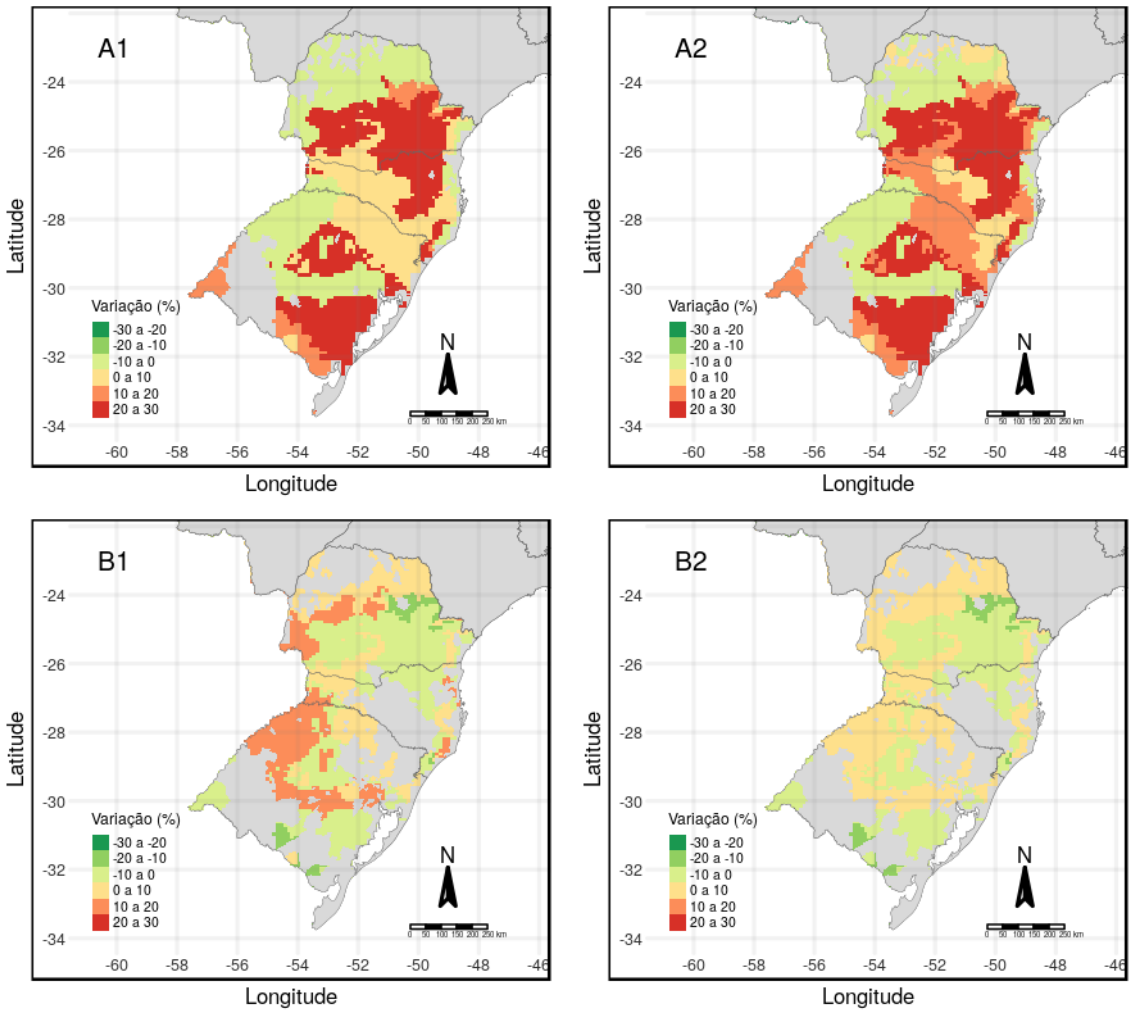

Figura 4.10: Variação do risco de se produzir abaixo da média esperada para o período de 2040 a 2070, em 1ª (A) e 2ª (B) safra, cenários RCP 4.5 (1) e 8.5 (2) – Feijão "Preto".

4.4 Discussão

Os cenários gerados a partir dos 20 GCM's apresentaram, proporcionalmente, maior aumento das temperaturas mínimas com relação as máximas. Os modelos de circulação global seguem uma metodologia probabilística para estimar a precipitação pluvial para as regiões escolhidas, apresentando aumento no volume precipitado para locais com chuvas mais bem distribuídas ao longo ano, e diminuição onde se constatam chuvas em épocas mais definidas (Sul e Centro-Oeste brasileiro, respectivamente, SENTELHAS et al., 1999). O panorama climático previsto por estes modelos aplicados neste trabalho, está de acordo com o descrito pela literatura especializada, demonstrando a capacidade dos mesmos em limitar e predizer as variáveis climatológicas em uma escala regional (local) (MEARNS et al., 2003; WILKS, 2012; ROSENZWEIG et al., 2018).

Em média, ambos os cenários representativos de concentração de CO_2 mostraram ganhos de produtividade para a maioria das áreas produtivas identificadas, ao longo das 3 safras, evidenciando que para o modelo CROPGRO-Drybean, as variações futuras esperadas para chuvas e temperatura do ar, possuem menor impacto na estimativa de peso de grãos quando comparado ao aumento previsto da concentração atmosférica de gás carbônico.

Analisando-se o código-fonte do modelo, é possível identificar que as equações que delimitam as etapas de desenvolvimento de órgãos reprodutivos (e, portanto, da produção de grãos) são atreladas a rotinas que consideram a disponibilidade de CO_2 no ambiente de cultivo. A taxa de crescimento de vagens (GROP, g planta dia^{-1}) é dada pela seguinte equação:

$$GROP = CARBO + (STMWT - SWMIN) \tag{4.1}$$

em que CARBO é o fator que descreve a disponibilidade de carboidratos na planta (adimensional), STMWT é a massa seca de caule (g m$^-$2), enquanto SWMIN é a massa seca mínima atingível pelo caule (g m^{-2}), sendo estas variáveis estimadas pelo modelo. A variável CARBO, por sua vez, é descrito por:

$$CARBO = AMAX1(PCARB * CO2FP * TFP * WFP * NFP * RSFP * SLPF) \tag{4.2}$$

sendo esta uma função determinada pelo valor máximo (AMAX1) entre as variáveis PCARB, do qual é descrito pela produção potencial de matéria seca sob água ideal, nitrogênio e temperatura (kg ha^{-1}); CO2FP, o fator que descreve a interação da disponibilidade de CO_2 no ambiente para o processo de fotossíntese; TFP, WFP, NFP, RSFP como fatores que descrevem a relação da temperatura do ar, disponibilidade hídrica, nitrogênio, reserva de carboidratos, respectivamente, a este mesmo processo; e por fim SLPF, que representa a taxa relativa de redução de crescimento em solos de baixa fertilidade.

O valor estimado de GROP participa de uma cascata de rotinas computacionais que determinam a massa seca de vagens ao final do ciclo reprodutivo, compondo a biomassa total atingida pelos cultivos. Considerando que o feijoeiro-comum é uma planta de metabolismo C3, o aumento da concentração de CO_2 induz a redução da condutância estomática pela diminuição da abertura dos estômatos (BOOTE; PICKERING; ALLEN, 1997; FIELD; JACKSON; MOONEY, 1995; TUBIELLO; EWERT, 2002). Deste modo, o incremento na disponibilidade de gás carbônico, bem como perda reduzida por parte da transpiração da quantidade de água presente no mesofilo, poderá resultar no aumento da eficiência fotossintética, acarretando maiores ganhos de produtividade, do qual também reflete na elevação da biomassa total acumulada.

O modelo por sua vez, demonstra os ganhos produtivos através do aumento da produtividade da água da cultura (DMP_EP, kg m^{-3}), sendo esta a quantidade de biomassa produzida por volume de água demandado durante o ciclo, descrito pela Equação 4.3.

$$DMP_EP = BIOMAS/CEPR \tag{4.3}$$

tal que BIOMAS é o acúmulo de biomassa (kg ha^{-1}), incrementada pelo aumento da eficiência fotossintética e CEPR sendo o acúmulo de transpiração ao longo do ciclo (mm), do qual possui um valor reduzido pela diminuição da condução estomática.

O comparativo da produtividade de grãos e da água, com relação as condições climáticas atuais e os cenários futuros, está disponível para consulta no Anexo G.

Embora os cenários mostrem aumento na produção média em todas as safras, as previsões não devem ser encaradas de uma forma otimista, como um todo. Comparando-se o risco de a produção estar abaixo da média no período de 2040 a 2070, em relação ao mesmo risco para as condições atuais (1988 a 2018), é possível estabelecer um panorama mais detalhado sobre o efeito das mudanças climáticas nos cultivos nacionais de feijão-comum. Tal análise se faz necessária, pois em termos de segurança alimentar, o planejamento das safras deve ser pensado para

atender a demanda futura por alimentos, ao qual espera-se que aumentará expressivamente em meados do século 21 (FEDOROFF et al., 2010; GODFRAY et al., 2010).

Os estados do Sul do Brasil, mesmo apresentando os cenários futuros de maior aumento da produção média frente as mudanças climáticas, são também os locais que apresentaram maior aumento do risco produtivo, em todas as safras. Esta constatação prevê um impacto econômico negativo para a região, uma vez que atualmente, ela responde por cerca de 27% da produção nacional de feijão (CONAB, 2018).

A ocorrência de safras com produção abaixo da média, se dá pelo efeito da temperatura do ar nas diferentes fases de desenvolvimento do cultivo. JIFON & WOLFE (2005) mostraram que temperaturas acima do faixa ótima (15 a 26 ºC) nos estádios finais de desenvolvimento do feijoeiro-comum, podem ocasionar em redução na massa seca de grãos em até 18%, mesmo em ambientes com concentração elevada de CO_2 atmosférico. PRASAD et al. (2002) constaram que o aumento nos níveis de gás carbônico atmosférico não compensa os efeitos prejudiciais da temperatura do ar elevada sobre os processos fisiológicos nos estádios reprodutivos. Resultados semelhantes foram observados também para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) (ALLEN; BAKER; BOOTE, 1996) e amendoim (*Arachis hyoigaea* L.) (PRASAD et al., 2003).

Os cultivos de 3ª safra de feijão Carioca apresentaram aumento de risco produtivo em até 10% para a maior parte das áreas abrangidas, em ambos os cenários. A safra de "inverno" (ou 3ª safra), teve sua prática estimulada com intuito de se aproveitar as áreas produtivas irrigadas na entressafra, e principalmente, para que os preços do produto se mantenham estáveis ao longo ano para o consumidor final (PORTES, 2012). O aumento do risco de se produzir abaixo da média nesta safra, poderá ocasionar em flutuações recorrentes dos preços, afetando diretamente a demanda pelo produto, que em casos mais extremos, poderá forçar os produtores a substituírem a prática do cultivo de feijão-comum nesta época do ano por culturas mais rentáveis.

Os materiais genéticos atuais podem apresentar respostas diversas as mudanças climáticas nas diferentes localidades em que o feijão-comum é cultivado devido à plasticidade fenotípica dos mesmos. Sendo assim, estudos como o conduzido neste trabalho, servem como guia para os programas nacionais de melhoramento aplicados à cultura. NICOTRA et al. (2010) reforçam que o entendimento do desempenho dos genótipos atuais frente os cenários climáticos futuros é crucial para o desenvolvimento de novas cultivares. CECCARELLI et al. (2010) afirmam que programas de melhoramento levam em consideração os efeitos do estresse biótico e abiótico, sendo este segundo provocado por fatores ambientais, como o clima por exemplo, do qual os estudos sobre suas alterações são determinantes para quantificar o estresse pelo qual os materiais genéticos futuros deverão suportar. Outros trabalhos científicos nesta mesma temática foram abordados para diversas culturas, explicitando a importância desta temática para a segurança alimentar no século 21 (BRAUN; ATLIN; PAYNE, 2010; CHAPMAN et al., 2012; ORTIZ et al., 2008).

Desta forma, espera-se que os resultados aqui apresentados sirvam de auxílio para programas de melhoramento genético no desenvolvimento de cultivares adaptadas para as condições climáticas previstas, bem como oferecer aos órgãos competentes, informações que subsidiem ações governamentais que garantam a continuidade dos cultivos nacionais de feijão-comum.

4.5 Conclusão

As simulações com o modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean mostraram aumento da produção média no período citado para a maioria das localidades estudadas, nas 3 safras anuais, para as cultivares Pérola e BRS Esplendor, com relação as condições climáticas atuais. O aumento produtivo se justifica pelo incremento das concentrações de CO_2 esperadas para os cenários de mudanças climáticas, ao qual se prevê aumento da eficiência fotossintética, dada as características do metabolismo de uma planta C3. Embora seja esperado aumento da produção média, o risco climático se elevou principalmente para os cultivos realizados na região Sul e aqueles praticados na 3ª safra (grupo Carioca). Espera-se que os resultados auxiliem os futuros programas de melhoramento genético, além dispor aos órgãos governamentais, informações para políticas públicas que garantam a manutenção das

lavouras de feijão-comum no Brasil.

REFERÊNCIAS

ALLEN, L. H.; BAKER, J. T.; BOOTE, K. J. The CO2 Fertilization Effect: Higher Carbohydrate Production and Retention as Biomass and Seed Yield. In: Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes. [s.l.] Food Agriculture Org., 1996. p. 65–100.

AMOUZOU, K. A. et al. CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water- and N- use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. Agricultural Systems, v. 165, p. 85–96, 1 set. 2018.

BATJES, N. H. A homogenized soil profile data set for global and regional environmental research. WISE, version 1.1. International Soil Reference and Information Centre, 2002.

BATTISTI, R. et al. Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. European Journal of Agronomy, v. 83, p. 1–14, 1 fev. 2017.

BEEBE, S. et al. Genetic improvement of common beans and the challenges of climate change. In: Crop adaptation to climate change. Richmond, Australia: Blackwell Publishing Ltd, 2011. p. 356–369.

BOOTE, K. J. et al. The CROPGRO model for grain legumes. Understanding options for agricultural production., v. 1983, n. 1985, p. 99–128, 1998.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth: CROPGRO model. 1998.

BOOTE, K. J.; PICKERING, N. B.; ALLEN, L. H. Plant Modeling: Advances and Gaps in Our Capability to Predict Future Crop Growth and Yield in Response to global Climate Change. In: Advances in Carbon Dioxide Effects Research. [s.l.] American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1997. v. asaspecialp. 179–228.

BRAUN, H.-J.; ATLIN, G.; PAYNE, T. Multi-location testing as a tool to identify plant response to global climate change. In: Climate change and crop production. [s.l.] CABI Wallingford, UK, 2010. v. 1p. 115–138.

CECCARELLI, S. et al. Plant breeding and climate changes. The Journal of Agricultural Science, v. 148, n. 06, p. 627–637, 16 dez. 2010.

CHAPMAN, S. C. et al. Plant adaptation to climate change -opportunities and priorities in breeding. Crop and Pasture Science, v. 63, n. 3, p. 251, 18 jun. 2012.

CIAT. Beans | CIAT. Disponível em: <https://ciat.cgiar.org/what-we-do/breeding-better-crops/beans/>. Acesso em: 25 set. 2018.

CLARKE, L. et al. Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. US Department of Energy Publications, 1 jul. 2007.

CONAB. Monitoramento agrícola- Safra 2017/2018. Acompanhamento da safra brasileira: Grãos, v. 5, n. 9, p. 1–178, 2018.

CRAMER, W. et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO 2 and climate change: results from six dynamic global vegetation models. Global Change Biology, v. 7, n. 4, p. 357–373, 1 abr. 2001.

DALL'AGNOL, A. et al. O complexo agroindustrial da soja brasileira. Embrapa Soja-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2007

EMBRAPA. Sistema de Informação de Solos Brasileiros. Disponível em: <https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 15 out. 2018.

FAO. World reference base for soil resources. [s.l.] Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

FAO. FAOSTAT. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 27 jul. 2018.

FEDOROFF, N. V et al. Radically rethinking agriculture for the 21st century. Science (New York, N.Y.), v. 327, n. 5967, p. 833–4, 12 fev. 2010.

FIELD, C. B.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A. Stomatal responses to increased CO2: implications from the plant to the global scale. Plant, Cell and Environment, v. 18, n. 10, p. 1214–1225, 1 out. 1995.

GODFRAY, H. C. J. et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science (New York, N.Y.), v. 327, n. 5967, p. 812–8, 12 fev. 2010.

HEINEMANN, A. B. et al. Climate change determined drought stress profiles in rainfed common bean production systems in Brazil. Agricultural and Forest Meteorology, v. 246, n. March, p. 64–77, 2017.

HOWDEN, S. M. et al. Adapting agriculture to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 104, n. 50, p. 19691–6, 11 dez. 2007.

HUDSON, N.; RUANE, A. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R in Windows. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project, p. 0–43, 2013.

IBGE. Área plantada, área colhida, quantidade produzida e rendimento médio de feijão, 1a, 2a e 3a safras. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1002>. Acesso em: 15 maio. 2018.

INCAPER. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2009-2011. Vitória, ES: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, 2010.

INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/bdmep>. Acesso em: 15 maio. 2018.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, n. 1, p. 151, 2014.

JIFON, J. L.; WOLFE, D. W. High Temperature-induced Sink Limitation Alters Growth and Photosynthetic Acclimation to Elevated CO2 in Bean (Phaseolus vulgaris L.). Journal of the American Society for Horticultural Science, v. 130, n. 4, p. 515–520, 1 jul. 2005.

JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 2003.

LOBELL, D. B. et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. Science (New York, N.Y.), v. 319, n. 5863, p. 607–10, 1 fev. 2008.

MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. [s.l.] Tese de Livre Docência, Universidade de São Paulo, 2014.

MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. Theoretical and Experimental Plant Physiology, v. 26, n. 1, p. 49–63, 2014.

MCCLEAN, P. E. et al. Crop improvement in the era of climate change: An integrated, multi-disciplinary approach for common bean (Phaseolus vulgaris). Functional Plant Biology, v. 38, n. 12, p. 927–933, 2011.

MEARNS, L. O. et al. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Regional Climate Model Experiments. IPCC Guidelines, p. 38, 2003.

MENDELSOHN, R.; DINAR, A. Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter? The World Bank Research Observer, v. 14, n. 2, p. 277–293, 1 ago. 1999.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 11 fev. 2010.

NICOTRA, A. B. et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. Trends in Plant Science, v. 15, n. 12, p. 684–692, 1 dez. 2010.

ORTIZ, R. et al. Climate change: Can wheat beat the heat? Agriculture, Ecosystems Environment, v. 126, n. 1–2, p. 46–58, 1 jun. 2008.

PORTES, T. DE A. Como surgiu o feijão de terceira safra ou feijão de inverno? Um pouco de história. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/sistema/uploads/artigos/02-10-12_feijao.pdf>. Acesso em: 5 nov. 2018.

PRASAD, P. V. V. et al. Super-optimal temperatures are detrimental to peanut (Arachis hypogaea L.) reproductive processes and yield at both ambient and elevated carbon dioxide. Global Change Biology, v. 9, n. 12, p. 1775–1787, 2003.

PRASAD, P. V. V. et al. Effects of elevated temperature and carbon dioxide on seed-set and yield of kidney bean (Phaseolus vulgaris L.). Global Change Biology, v. 8, p. 710–721, 2002.

RIAHI, K. et al. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. Climatic Change, v. 109, n. 1–2, p. 33–57, 13 nov. 2011.

ROSENZWEIG, C. et al. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. Agricultural and Forest Meteorology, v. 170, p. 166–182, 2013.

ROSENZWEIG, C. et al. Coordinating AgMIP data and models across global and regional scales for 1.5°C and 2.0°C assessments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 376, n. 2119, 2018.

RUANE, A. C. et al. AgMIP Climate Data and Scenarios for Integrated Assessment. In: Handbook of Climate Change and Agroecosystems. [s.l: s.n.]. p. 45–78, 2015.

SANTOS, H. G. DOS et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. EMBRAPA Solos, n. 2, p. 306, 2006.

SENTELHAS, P. C. et al. BHBRASIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999.

SHINDELL, D. Radiative Forcing in the AR5. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, p. 1–11, 2013.

SHOGREN, J. F.; TOMAN, M. A. Climate Change Policy. In: Public Policies for Environmental Protection. [s.l.] Routledge, 2010. p. 135–178.

SMITH, S. J.; WIGLEY, T. M. L. Multi-Gas Forcing Stabilization with Minicam. [s.l.] International Association for Energy Economics, 2006. v. 27

STERN, N. The economics of climate change. American Economic Review, v. 98, n. 2, p. 1–37, 2008.

TAYLOR, K. E. et al. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 93, n. 4, p. 485–498, 1 abr. 2012.

TUBIELLO, F. N.; EWERT, F. Simulating the effects of elevated CO2 on crops: approaches and applications for climate change. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 1–2, p. 57–74, 1 dez. 2002.

USDA. Grain: World Markets and Trade. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>.

VAN VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, v. 109, n. 1–2, p. 5–31, 5 nov. 2011.

VAN WART, J. et al. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. Field Crops Research, v. 143, p. 44–55, 2013.

WHEELER, T.; VON BRAUN, J. Climate change impacts on global food security. Science (New York, N.Y.), v. 341, n. 6145, p. 508–13, 2 ago. 2013.

WILKS, D. S. Stochastic weather generators for climate-change downscaling, part II: Multivariable and spatially coherent multisite downscaling. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, v. 3, n. 3, p. 267–278, 2012.

WISE, M. et al. Implications of limiting CO2 concentrations for land use and energy. Science (New York, N.Y.), v. 324, n. 5931, p. 1183–6, 29 maio 2009.

5 CONCLUSÕES GERAIS

(i) o uso da análise de sensibilidade local do modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean permitiu identificar os parâmetros que possuem maior relevância nas respostas obtidas pelas simulações, assim como auxilia no entendimento dos processos biofísicos computados pelo modelo.

(ii) a calibração realizada para dois ambientes distintos, mostrou que o modelo tem desempenho satisfatório em representar a variabilidade ao qual os cultivos nacionais de feijão-comum estão sujeitos.

(iii) embora sejam esperados aumentos significativos de temperatura do ar para cenários climáticos futuros, o incremento da concentração atmosférica de CO_2 contribuirá para o aumento da produtividade média dos cultivos de feijão-comum, no período de 2040 a 2070.

(iv) mesmo com os efeitos benéficos do CO_2 para os cultivos, a temperatura do ar elevada ainda poderá trazer problemas para os cultivos nacionais, visto que para algumas safras de grande relevância econômica para certas regiões, haverá aumento do risco de ocorrer anos de safra com produção abaixo do esperado.

(v) o alvo dos programas de melhoramentos genético deve ser a manutenção da estabilidade dos cultivos frente as mudanças climáticas, com o intuito de manter as flutuações de preços em níveis aceitaveis, garantindo assim o futuro da periodicidade das safras.

ANEXOS

Anexo A - Descrição da progressão fenológica utilizada pelo modelo DSSAT/CROPGRO-Drybean.

Tabela A.1: Nomenclatura utilizada pelo modelo para descrever os estádios fenológicos.

Código	Descrição
NVEG0	Emergência
NVEG1	1º dia com 50% das plantas COM folha unifoliada completamente desenrolada
JPEND	Dia em que o período juvenil termina e a planta torna-se sensível ao fotoperiodismo
NR0	Dia em que ocorre a indução floral
NR1	Dia em que 50% das plantas possuem pelo menos 1 flor
NR3	Dia em que 50% das plantas possuem pelo menos 1 vagem
NR5	Dia em que 50% das plantas iniciam a formar sementes
NDSET	Tempo normal em que uma vagem cheia deve ser obtida sem nenhum estresse hídrico
NR7	Dia em que 50% das plantas alcançam a maturação
NDVST	Dia em que o último nó ramo primário é formado
NDLEAF	Dia em que a expansão foliar cessa

Anexo B - Detalhamento das ZH's

Tabela A.2: Descrição das ZH's identificadas, com detalhamento das estações climatológicas que as representam, bem como sua propoção quanto as áreas nacionais de produção de feijão-comum.

Estações climatológicas representativas	ZH	Latitude	Longitude	Classificação do Solo	Clima[a]	Área (1000 ha)
BURITIS-MG	8501	-15, 51	-46, 44	Cambissolo Háplico	23, 3 ºC 1136 mm	176 (6%)
BURITIZEIRO-MG	7401	-17, 31	-45, 25	Latossolo Vermelho-Amarelo	24 ºC 1012 mm	74 (2%)
CAMPOS NOVOS-SC	5901	-27, 37	-51, 27	Cambissolo Háplico	17, 6 ºC 1669 mm	32 (1%)
CANELINHA-SC	7901	-27, 25	-48, 77	Argissolo Vermelho	20, 8 ºC 1442 mm	20 (1%)
CASTRO-PR	6701	-24, 82	-49, 87	Argissolo Vermelho	18, 7 ºC 1347 mm	42 (1%)
CHAPECÓ-SC	6901	-27, 14	-52, 66	Latossolo Vermelho	19, 1 ºC 1803 mm	89 (3%)
CRISTALINA-GO	7601	-16, 73	-47, 52	Cambissolo Háplico	22, 6 ºC 1094 mm	203 (6%)
CURITIBANOS-SC	5801	-27, 28	-50, 60	Nitossolo Vermelho	17, 3 ºC 1661 mm	5 (0%)
EUCLIDES DA CUNHA-BA	8101	-10, 43	-38, 93	Cambissolo Háplico	24, 6 ºC 624 mm	59 (2%)
FÁTIMA-BA	8201	-10, 53	-38, 23	Argissolo Vermelho	24, 6 ºC 767 mm	103 (3%)
ITABERÁ-SP	6601	-23, 87	-49, 19	Argissolo Vermelho	19, 9 ºC 1268 mm	5 (0%)
ITAQUI-RS	7702	-29, 16	-56, 08	Gleissolo Háplico	20, 9 ºC 1521 mm	10 (0%)
JABORANDI-BA	8301	-13, 93	-45, 22	Latossolo Amarelo	24, 7 ºC 1042 mm	92 3%)
JUSSARA-GO	9601	-15, 68	-51, 27	Latossolo Vermelho-Amarelo	25, 5 ºC 1491 mm	106 (3%)
LUÍS EDUARDO MAGALHÃES-BA	8601	-12	-45, 91	Latossolo Amarelo	23, 7 ºC 1288 mm	251 (8%)
MACAÚBAS-BA	7201	-13, 16	-42, 68	Argissolo Vermelho	24, 1 ºC 669	35 (1%)
PRIMAVERA DO LESTE-MT	7701	-15, 20	-54, 18	Neossolo Quartzarenico	24, 3 ºC 1555 mm	336 (11%)
PRUDENTÓPOLIS-PR	6801	-25, 19	-51, 09	Neossolo Regolítico	18 ºC 1530 mm	209 (7%)
SANTO ANTÔNIO DO LESTE-MT	7801	-14, 70	-53, 68	Neossolo Quartzarenico	24 ºC 1640 mm	171 (5%)
SÃO DESIDÉRIO-BA	8401	-12, 96	-45, 07	Latossolo Amarelo	24, 5 ºC 1160 mm	59 (2%)
SAPEZAL-MT	8801	-12, 93	-58, 70	Neossolo Quartzarenico	24, 7ºC 1591 mm	181 (6%)
SORRISO-MT	8701	-12, 70	-55, 69	Latossolo Vermelho-Amarelo	24, 8 ºC 1749 mm	355 (11%)
TAPIRAMUTÁ-BA	7301	-11, 92	-40, 81	Latossolo Amarelo	23, 3 ºC 754 mm	69 (2%)
UNAÍ-MG	7501	-16, 52	-46, 67	Cambissolo Háplico	22, 6 ºC 1094 mm	163 (5%)
Total						2848 (90%)

Nota: Valores em parenteses representam a proporção de área da ZH em relação a área total produzida no Brasil, em %.
[a] Valores obtidos da temperatura média do ar e da precipitação anual.

Anexo C - Detalhamento dos principais locais de produção presentes nas ZH's

Tabela A.3: Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH.

ZH	Município	Estado	Produção	ZH	Município	Estado	Produção
5801	Curitibanos	SC	16900	5901	Campos Novos	SC	37130
	Fraiburgo	SC	10554		Vacaria	RS	19290
	São José do Cerrito	SC	9800		Abelardo Luz	SC	16166,60
	Lages	SC	6288		Ouro Verde	SC	5080,33
	Canoinhas	SC	4644,40		Bituruna	PR	4306,67
	Paula Freitas	PR	4199		Muitos Capões	RS	3915
	Irineópolis	SC	4130		Brunópolis	SC	3165,33
	Lebon Régis	SC	3468,67		Vargem	SC	3128,67
	Frei Rogério	SC	2952,33		Bom Jesus	RS	2904
	Ponte Alta	SC	2170		Palmas	PR	2487,60
6601	Itaberá	SP	21735,33	6701	Castro	PR	65164,60
	Arapoti	PR	17876,67		Tibagi	PR	50566,07
	Cerro Azul	PR	7212,73		Ivaí	PR	36026,07
	Itapetininga	SP	5680,50		Reserva	PR	33663,93
	Ervália	MG	1839,70		Lapa	PR	33617,07
	Santa Margarida	MG	1187,70		Palmeira	PR	30966,27
	Espera Feliz	MG	801,37		Itapeva	SP	29083,30
	Matipó	MG	769,30		Campo Largo	PR	20356,07
	Divino	MG	753,70		São Mateus do Sul	PR	19819,27
	Salto de Pirapora	SP	563,33		Quitandinha	PR	18020,93
6801	Prudentópolis	PR	72784,73	6901	Chapecó	SC	3357,67
	Irati	PR	60291,40		Ipuaçu	SC	2915,67
	Vitorino	PR	32947,40		Xanxerê	SC	1991,60
	Pato Branco	PR	32213,73		Xaxim	SC	1475,60
	Cruz Machado	PR	27500		Campina Grande do Sul	PR	1351,93
	Bom Sucesso do Sul	PR	24905,73		Quilombo	SC	1113,07
	Cândido de Abreu	PR	23070,33		Jóia	RS	835,33
	Renascença	PR	17879,67		Entre Rios do Sul	RS	692,97
	Cascavel	PR	17388,60		Cruzaltense	RS	682,30
	Corbélia	PR	16143,40		Pinhalzinho	SC	650
7201	Mirangaba	BA	686,97	7301	Barra do Choça	BA	3949,33
	São João do Paraíso	MG	573		Mucugê	BA	1565,67
	Macaúbas	BA	528,83		Riacho de Santana	BA	1461
	Paramirim	BA	441,33		Capitão Enéas	MG	949,47
	Rio do Pires	BA	428,03		Encruzilhada	BA	926,13
	Rio de Contas	BA	414		Tapiramutá	BA	884,63
	Tremedal	BA	400,67		Guanambi	BA	879
	Matina	BA	387,17		Rio Pardo de Minas	MG	806,03
	Igaporã	BA	377		Mundo Novo	BA	581,83
	Condeúba	BA	347,17		Piatã	BA	571,33

Tabela A.4: Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH.

ZH	Município	Estado	Produção	ZH	Município	Estado	Produção
7401	Brasilândia de Minas	MG	3710,33	7501	Unaí	MG	91335,67
	Riachinho	MG	2115,17		Paracatu	MG	45215
	Ibicoara	BA	1505,50		Guarda-Mor	MG	18385
	Coração de Jesus	MG	1363,87		Itaí	SP	16350
	Buritizeiro	MG	1191,30		Paranapanema	SP	14785
	Bocaiúva	MG	790,30		Bonfinópolis de Minas	MG	13256,67
	Montes Claros	MG	643,50		Casa Branca	SP	12045,83
	Urucuia	MG	466,53		Cabeceira Grande	MG	11243,33
	Itambacuri	MG	369,33		Manduri	SP	7742,67
	Água Boa	MG	361,30		Taquarituba	SP	6802
7601	Cristalina	GO	60073,33	7701	Primavera do Leste	MT	41680,70
	Luziânia	GO	40126,17		Brasília	DF	39651,50
	Cabeceiras	GO	13456,87		Água Fria de Goiás	GO	25188
	Campo Alegre de Goiás	GO	10919,53		Jataí	GO	18777
	Patos de Minas	MG	10570		Rio Verde	GO	14978,37
	Coromandel	MG	9412		São João d'Aliança	GO	12964
	Silvânia	GO	7693,70		Ibiá	MG	9153,33
	Formosa	GO	5993,70		Medeiros	MG	7500,47
	Bambuí	MG	5943,37		Planaltina	GO	7101
	Lagoa Formosa	MG	5842,87		Caiapônia	GO	7013,33
				7702	Itaqui	RS	324
7801	Vicente Dutra	RS	6666,87	7901	Imbituba	SC	71,60
	Santo Antônio do Leste	MT	4590,20		Araquari	SC	24
	São Miguel do Iguaçu	PR	3883,40		Cananéia	SP	23,50
	Caiçara	RS	2453,83		Paranaguá	PR	18
	Santo Augusto	RS	2200,33		Guaratuba	PR	16
	Seberi	RS	1990,70		Canelinha	SC	12,73
	Boa Vista das Missões	RS	1789,37		Camboriú	SC	11,67
	Iraí	RS	1380,83		Florianópolis	SC	7,67
	São Miguel das Missões	RS	1355,50		Itariri	SP	3
	Frederico Westphalen	RS	1237,80		Balneário Barra do Sul	SC	1,33
8101	Euclides da Cunha	BA	27499	8201	Fátima	BA	4765
	Adustina	BA	4227,50		Bom Jesus da Lapa	BA	1709,83
	Tucano	BA	1935,20		Cícero Dantas	BA	1587,80
	Sento Sé	BA	1747,67		Wanderley	BA	1512,33
	Sátiro Dias	BA	1578,70		Manga	MG	1272,13
	Jeremoabo	BA	1277		Santa Rita de Cássia	BA	1266
	Paripiranga	BA	1038,50		Jacobina	BA	1169,50
	Jaguarari	BA	681,17		Paratinga	BA	1169,50
	Sítio do Quinto	BA	655,50		Antas	BA	1160,30
	Nova Soure	BA	654		Pedro Alexandre	BA	977,80

Tabela A.5: Relação simplificada dos 10 municípios de maior produção, em toneladas, por ZH.

ZH	Município	Estado	Produção	ZH	Município	Estado	Produção
8301	São Romão	MG	5548,50	8401	São Desidério	BA	30226,47
	Jaborandi	BA	3597,33		Barreiras	BA	24463,30
	Riachão das Neves	BA	2581,67		Arinos	MG	2132
	Formosa do Rio Preto	BA	2557,30		Cabaceiras do Paraguaçu	BA	861
	Cristópolis	BA	2006,67		Cocos	BA	476,67
	Inhambupe	BA	1727,50		Santanópolis	BA	454,70
	Baianópolis	BA	1139,50		Aporá	BA	396,20
	Correntina	BA	992,67		Acajutiba	BA	249
	Serra do Ramalho	BA	812		Pacaembu	SP	179,17
	Santo Estêvão	BA	746,50		Castilho	SP	156,83
8501	Buritis	MG	17870	8601	Luís Eduardo Magalhães	BA	19740,33
	Formoso	MG	6008		Paraúna	GO	7073,50
	Morrinhos	GO	4791,67		Itiquira	MT	2340
	Itapura	SP	1477,47		Sidrolândia	MS	1612,80
	Sítio d'Abadia	GO	1418,33		Canarana	MT	1287
	Feira de Santana	BA	1389,80		Nova Andradina	MS	1136
	Vicentinópolis	GO	1336,50		Santa Helena de Goiás	GO	1125,83
	Planura	MG	946,80		Rio Brilhante	MS	865,80
	Suzanápolis	SP	854		Palmeiras de Goiás	GO	450
	Irará	BA	817,20		Ribas do Rio Pardo	MS	449
8701	Sorriso	MT	53047,80	8801	Sapezal	MT	9676,47
	Nova Ubiratã	MT	20410		Tapurah	MT	5655,20
	Lucas do Rio Verde	MT	15739,33		Diamantino	MT	5079,30
	Campos de Júlio	MT	9584,80		Brasnorte	MT	4440
	Vera	MT	6607,33		Nova Mutum	MT	4012,17
	Ipiranga do Norte	MT	6435		Nova Maringá	MT	3928,87
	Campo Novo do Parecis	MT	6114,33		Tabaporã	MT	2400,30
	Querência	MT	4779,50		Itanhangá	MT	1676,70
	Sinop	MT	4044,33		Porto dos Gaúchos	MT	1375
	Itaberaí	GO	3209,17		Juara	MT	1360
9601	Jussara	GO	9226,63				
	Montes Claros de Goiás	GO	4762,47				
	Britânia	GO	2919,50				
	Santa Fé de Goiás	GO	2398,53				
	Ribeirão Cascalheira	MT	1857,47				
	Matrinchã	GO	1081,33				
	Rosário Oeste	MT	396,70				
	Canabrava do Norte	MT	194,80				
	Bonópolis	GO	137				
	Nova Lacerda	MT	51,50				

Anexo D - Sobre os GCM's

Tabela A.6: Relação detalhada dos Modelos de Circulação Global (GCM) utilizados no trabalho, adaptado de RUANE et al. (2015).

GCM	Instituição	Resolução Horizontal
ACCESS1-0	CSIRO & BOM	1,25º x 1,875º
BCC-CSM1-1	Beijing Climate Center	∼ 2,8º x 2,8º
BNU-ESM	Beijing Normal University (BNU)	∼ 2.8º x 2.8º
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis	∼ 2.8º x 2.8º
CCSM4	NCAR	∼ 0.9º x 1.25º
CESM1-BGC	NSF, DOE & NCAR	∼ 0.9º x 1.25º
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO	∼ 1.9º x 1.875º
GFDL-ESM2G	NOAA	∼ 2.0º x 2.5º
GFDL-ESM2M	NOAA	∼ 2.0º x 2.5º
HadGEM2-CC	UK Meteorological Office — Hadley Centre	1,25º x 1,875º
HadGEM2-ES	UK Meteorological Office — Hadley Centre	1,25º x 1,875º
INMCM4.0	INM	1.5º x 2º
IPSL-CM5A-LR	IPSL	∼ 1.9º x 3.75º
IPSL-CM5A-MR	IPSL	∼ 1.3º x 2.5º
MIROC5	University of Tokyo, NIES & JAMSTEC	∼ 1.4º x ∼ 1.4º
MIROC-ESM	University of Tokyo, NIES & JAMSTEC	∼ 2.8º x ∼ 2.8º
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute	∼ 1.9º x 1.875º
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute	∼ 1.9º x 1.875º
MRI-CGCM3	Japanese Meteorological Research Institute	∼ 1.1º x 1.125º
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre	∼ 1.9º x 2.5º

Anexo E - Mudanças climáticas previstas

Tabela A.7: Variação percentual da temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar, e da precipitação pluvial (RAIN), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, em diferentes Zonas Homogêneas (ZH).

	RCP 4.5			RCP 8.5		
ZH	TMAX	TMIN	RAIN	TMAX	TMIN	RAIN
5801	$6,93 \pm 1,74$	$10,87 \pm 3,10$	$6,76 \pm 10,85$	$9,77 \pm 2,36$	$15,67 \pm 1,76$	$8,69 \pm 13,59$
5901	$7,04 \pm 1,80$	$11,25 \pm 3,25$	$6,30 \pm 11,36$	$9,79 \pm 2,33$	$16,22 \pm 1,91$	$7,83 \pm 14,30$
6601	$6,48 \pm 2,71$	$9,86 \pm 3,24$	$4,18 \pm 8,99$	$9,48 \pm 2,51$	$14,53 \pm 1,92$	$3,56 \pm 10,51$
6701	$7,35 \pm 2,50$	$10,80 \pm 3,37$	$5,44 \pm 8,92$	$9,90 \pm 3,19$	$15,49 \pm 2,15$	$5,30 \pm 10,37$
6801	$7,21 \pm 1,86$	$11,21 \pm 3,11$	$5,02 \pm 10,66$	$10,04 \pm 2,37$	$16,08 \pm 1,75$	$4,71 \pm 11,52$
6901	$6,89 \pm 1,97$	$10,76 \pm 3,33$	$5,23 \pm 10,72$	$9,42 \pm 2,53$	$15,73 \pm 1,95$	$6,35 \pm 12,42$
7201	$6,09 \pm 1,58$	$8,17 \pm 1,93$	$-4,52 \pm 15,04$	$7,78 \pm 1,90$	$10,94 \pm 1,69$	$-0,85 \pm 19,10$
7301	$6,14 \pm 1,62$	$7,64 \pm 1,93$	$-8,39 \pm 13,28$	$7,92 \pm 1,98$	$10,42 \pm 1,93$	$-5,78 \pm 16,03$
7401	$6,83 \pm 2,47$	$8,79 \pm 1,91$	$-2,49 \pm 9,79$	$8,52 \pm 2,35$	$11,99 \pm 1,96$	$-1,49 \pm 9,80$
7501	$7,04 \pm 1,95$	$9,87 \pm 2,46$	$-1,66 \pm 10,95$	$9,39 \pm 2,65$	$13,23 \pm 1,89$	$-1,32 \pm 9,63$
7601	$7,12 \pm 1,97$	$9,71 \pm 2,46$	$-1,71 \pm 9,70$	$9,50 \pm 2,58$	$13,23 \pm 1,84$	$-0,99 \pm 9,32$
7701	$7,23 \pm 2,28$	$9,52 \pm 2,61$	$-2,51 \pm 8,19$	$9,80 \pm 2,84$	$13,11 \pm 1,72$	$-2,55 \pm 7,51$
7702	$5,45 \pm 1,99$	$9,35 \pm 2,92$	$5,25 \pm 7,77$	$7,97 \pm 2,43$	$13,63 \pm 1,52$	$4,51 \pm 8,75$
7801	$7,36 \pm 2,33$	$9,53 \pm 2,64$	$-2,92 \pm 8,11$	$9,98 \pm 2,91$	$13,09 \pm 1,87$	$-2,72 \pm 8,68$
7901	$5,08 \pm 1,74$	$7,17 \pm 2,37$	$6,06 \pm 9,52$	$7,10 \pm 1,97$	$10,43 \pm 1,94$	$7,56 \pm 12,41$
8101	$5,36 \pm 1,12$	$6,79 \pm 1,68$	$-7,43 \pm 14,55$	$7,33 \pm 1,69$	$9,73 \pm 1,62$	$-5,86 \pm 20,46$
8201	$5,23 \pm 1,17$	$6,62 \pm 1,70$	$-6,26 \pm 15,18$	$7,02 \pm 1,75$	$9,62 \pm 1,75$	$-4,24 \pm 19,28$
8301	$6,33 \pm 1,81$	$8,40 \pm 1,95$	$-3,96 \pm 9,91$	$8,33 \pm 2,07$	$12,00 \pm 2,06$	$-2,46 \pm 12,62$
8401	$6,36 \pm 1,79$	$8,61 \pm 1,97$	$-4,60 \pm 9,15$	$8,46 \pm 2,15$	$11,90 \pm 2,00$	$-2,94 \pm 14,04$
8501	$6,84 \pm 1,92$	$9,43 \pm 2,38$	$-1,29 \pm 11,03$	$9,12 \pm 2,56$	$12,85 \pm 1,92$	$-0,48 \pm 9,17$
8601	$6,57 \pm 1,87$	$8,79 \pm 2,12$	$-3,94 \pm 9,82$	$8,73 \pm 2,21$	$12,22 \pm 2,12$	$-1,85 \pm 15,95$
8701	$7,68 \pm 3,41$	$9,19 \pm 2,61$	$-1,89 \pm 8,13$	$10,25 \pm 3,85$	$12,89 \pm 2,22$	$-3,29 \pm 8,19$
8801	$7,69 \pm 3,27$	$9,05 \pm 2,35$	$-2,00 \pm 6,98$	$10,70 \pm 5,02$	$12,73 \pm 2,01$	$-3,85 \pm 7,36$
9601	$7,05 \pm 2,78$	$8,80 \pm 2,89$	$-0,17 \pm 9,08$	$8,90 \pm 2,23$	$11,95 \pm 1,84$	$-0,42 \pm 8,82$

Tabela A.8: Variação da temperatura máxima (TMAX) e mínima (TMIN) do ar(em ºC), e da precipitação pluvial (RAIN, em %), para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, em diferentes Zonas Homogêneas (ZH).

	RCP 4.5			RCP 8.5		
ZH	TMAX	TMIN	RAIN	TMAX	TMIN	RAIN
5801	$1,47 \pm 0,37$	$1,44 \pm 0,41$	$6,76 \pm 10,85$	$2,08 \pm 0,50$	$2,08 \pm 0,37$	$8,69 \pm 13,59$
5901	$1,54 \pm 0,39$	$1,50 \pm 0,43$	$6,30 \pm 11,36$	$2,14 \pm 0,51$	$2,16 \pm 0,42$	$7,83 \pm 14,30$
6601	$1,57 \pm 0,66$	$1,53 \pm 0,50$	$4,18 \pm 8,99$	$2,29 \pm 0,61$	$2,26 \pm 0,47$	$3,56 \pm 10,51$
6701	$1,69 \pm 0,57$	$1,55 \pm 0,48$	$5,44 \pm 8,92$	$2,28 \pm 0,73$	$2,22 \pm 0,49$	$5,30 \pm 10,37$
6801	$1,60 \pm 0,41$	$1,55 \pm 0,43$	$5,02 \pm 10,66$	$2,23 \pm 0,53$	$2,23 \pm 0,39$	$4,71 \pm 11,52$
6901	$1,64 \pm 0,47$	$1,56 \pm 0,48$	$5,23 \pm 10,72$	$2,24 \pm 0,60$	$2,28 \pm 0,46$	$6,35 \pm 12,42$
7201	$1,77 \pm 0,46$	$1,58 \pm 0,37$	$-4,52 \pm 15,04$	$2,26 \pm 0,55$	$2,11 \pm 0,49$	$-0,85 \pm 19,10$
7301	$1,66 \pm 0,44$	$1,49 \pm 0,38$	$-8,39 \pm 13,28$	$2,14 \pm 0,54$	$2,03 \pm 0,52$	$-5,78 \pm 16,03$
7401	$1,93 \pm 0,70$	$1,73 \pm 0,38$	$-2,49 \pm 9,79$	$2,41 \pm 0,67$	$2,36 \pm 0,56$	$-1,49 \pm 9,80$
7501	$1,90 \pm 0,53$	$1,80 \pm 0,45$	$-1,66 \pm 10,95$	$2,54 \pm 0,71$	$2,42 \pm 0,51$	$-1,32 \pm 9,63$
7601	$1,92 \pm 0,53$	$1,77 \pm 0,45$	$-1,71 \pm 9,70$	$2,56 \pm 0,70$	$2,42 \pm 0,50$	$-0,99 \pm 9,32$
7701	$2,06 \pm 0,65$	$1,90 \pm 0,52$	$-2,51 \pm 8,19$	$2,79 \pm 0,81$	$2,62 \pm 0,49$	$-2,55 \pm 7,51$
7702	$1,40 \pm 0,51$	$1,50 \pm 0,47$	$5,25 \pm 7,77$	$2,04 \pm 0,62$	$2,19 \pm 0,39$	$4,51 \pm 8,75$
7801	$2,06 \pm 0,65$	$1,90 \pm 0,53$	$-2,92 \pm 8,11$	$2,79 \pm 0,81$	$2,61 \pm 0,52$	$-2,72 \pm 8,68$
7901	$1,24 \pm 0,43$	$1,22 \pm 0,40$	$6,06 \pm 9,52$	$1,74 \pm 0,48$	$1,78 \pm 0,48$	$7,56 \pm 12,41$
8101	$1,54 \pm 0,32$	$1,39 \pm 0,34$	$-7,43 \pm 14,55$	$2,10 \pm 0,49$	$1,99 \pm 0,46$	$-5,86 \pm 20,46$
8201	$1,49 \pm 0,33$	$1,37 \pm 0,35$	$-6,26 \pm 15,18$	$2,00 \pm 0,50$	$2,00 \pm 0,50$	$-4,24 \pm 19,28$
8301	$1,85 \pm 0,53$	$1,69 \pm 0,39$	$-3,96 \pm 9,91$	$2,43 \pm 0,60$	$2,42 \pm 0,60$	$-2,46 \pm 12,62$
8401	$1,82 \pm 0,51$	$1,75 \pm 0,40$	$-4,60 \pm 9,15$	$2,42 \pm 0,61$	$2,43 \pm 0,57$	$-2,94 \pm 14,04$
8501	$1,89 \pm 0,53$	$1,80 \pm 0,45$	$-1,29 \pm 11,03$	$2,51 \pm 0,71$	$2,45 \pm 0,53$	$-0,48 \pm 9,17$
8601	$1,82 \pm 0,52$	$1,74 \pm 0,42$	$-3,94 \pm 9,82$	$2,42 \pm 0,61$	$2,42 \pm 0,59$	$-1,85 \pm 15,95$
8701	$2,19 \pm 0,97$	$1,93 \pm 0,55$	$-1,89 \pm 8,13$	$2,92 \pm 1,10$	$2,71 \pm 0,63$	$-3,29 \pm 8,19$
8801	$2,19 \pm 0,93$	$1,90 \pm 0,49$	$-2,00 \pm 6,98$	$3,05 \pm 1,43$	$2,67 \pm 0,57$	$-3,85 \pm 7,36$
9601	$2,09 \pm 0,82$	$1,87 \pm 0,62$	$-0,17 \pm 9,08$	$2,63 \pm 0,66$	$2,55 \pm 0,55$	$-0,42 \pm 8,82$

Anexo F - Risco produtivo

Tabela A.9: Risco de se produzir abaixo da produção média esperada nas condições atuais (1988 a 2018) e para os cenários de RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070) - Feijão Carioca.

ZH	1ª Safra (%)			2ª Safra (%)			3ª Safra (%)		
	Atual	RCP.4.5	RCP.8.5	Atual	RCP.4.5	RCP.8.5	Atual	RCP.4.5	RCP.8.5
5801	26,67	42,17	48	46,67	41,33	44	46,67	42,83	45,50
5901	26,67	29,50	38,50	50	46	42,33			
6601	46,67	52,83	47,50	43,33	48,50	44,83	40	29,17	28,83
6701	23,33	39,33	39,83	46,67	48,33	44,83	33,33	40,33	39
6801	20	46,83	42,83	46,67	46,17	44,33	43,33	43,67	43,67
6901	20	29,67	36	46,67	49,67	50,17			
7201	60	50,33	34,83	43,33	44,33	39,67	46,67	40,50	37,17
7301	50	48	49	53,33	46,67	49,33	40	37,50	39,83
7401	53,33	47	43,33	50	41,83	40,50	50	39,17	39,33
7501	50	48,83	46,17	46,67	48,50	49,50	36,67	35,33	36
7601	53,33	50,17	47	46,67	48,83	50,17	36,67	36,83	37,50
7701	46,67	46,50	43	50	47,83	45,33	30	35,33	39,67
7702	20	42,83	43						
7801	50	47,17	41	56,67	49,17	47,67	23,33	31,17	34,67
7901	46,67	44,17	46,50	53,33	45,17	41,17			
8101	50	49,83	51,17	46,67	39,67	40,83	50	42,83	40,50
8201	43,33	48,83	48,17	50	44	43	43,33	43,33	41,17
8301	56,67	47,67	45,83	56,67	43,33	41,33	46,67	46,50	44,17
8401	60	45,50	43,33	53,33	43,83	45,17	43,33	39,50	38,17
8501	56,67	50,50	42,17	43,33	48,67	43,33	36,67	38	33,17
8601	53,33	47,83	33,83	50	45,17	40,83	40	42,17	38,17
8701	53,33	41	40,83	60	50	49	36,67	42,17	43,33
8801	50	41	35,83	53,33	51,50	48,33	46,67	45,50	45,50
9601	46,67	37,33	39,17	40	41,83	40,17	40	36,67	35

*Espaços vazios representam ausência de safra em uma dada ZH.

Tabela A.10: Risco de se produzir abaixo da produção média esperada nas condições atuais (1988 a 2018) e para os cenários de RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070) - Feijão Preto.

ZH	1ª Safra (%)			2ª Safra (%)		
	Atual	RCP.4.5	RCP.8.5	Atual	RCP.4.5	RCP.8.5
5801	23,33	44	49,67	46,67	44,33	48,50
5901	26,67	26,83	33,67	50	44	47,50
6601	40	47	45,50	46,67	47,17	43,83
6701	30	45,50	42	53,33	39,17	43,17
6801	26,67	46,83	46,83	50	43,33	46
6901	23,33	30,50	36,33	43,33	50,17	49,33
7501	50	47,33	45,33	43,33	46,50	49,17
7601	46,67	45,83	47,17	43,33	45,83	50,67
7701	53,33	50,83	45,50	46,67	52	50,83
7702	26,67	39,67	43			
7801	50	46,17	43	40	51,83	48,50
7901	53,33	49,17	49,33	53,33	51,83	49,83

*Espaços vazios representam ausência de safra em uma dada ZH.

Anexo G - Eficiência de uso da água

Tabela A.11: Variação percentual da produtividade média de grãos (PGr) e da produtividade média da água (PCh) para os cenários RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070), com relação as condições climáticas atuais (1988 a 2018) - Feijão Carioca.

ZH	1ª Safra (%)				2ª Safra (%)				3ª Safra (%)			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh
5801	9,33	28,41	12,16	40,92	8,46	12,41	12,80	19,91	38,14	13,98	15,13	18,31
5901	6,56	19,83	8,80	30,06	7,78	13,46	12,22	22,54				
6601	8,42	19,51	11,12	25,21	9,14	9,69	11,81	18,11	20,28	12,19	14,16	18,53
6701	5,47	17,46	8,61	24,85	8,91	10,42	12,52	18,02	25,00	13,56	16,12	20,39
6801	6,26	26,74	9,19	35,86	6,73	11,54	10,45	19,55	31,22	14,05	14,45	18,81
6901	5,11	18,52	8,72	25,85	14,90	17,40	19,26	24,71				
7201	8,18	57,72	13,63	53,20	5,76	8,54	8,18	7,38	0,47	8,61	6,80	8,69
7301	3,76	40,53	6,88	55,76	7,16	16,12	11,00	14,46	18,34	12,33	11,24	13,69
7401	7,10	45,20	11,58	37,13	5,17	7,64	7,88	4,84	2,17	2,47	5,36	2,39
7501	6,85	47,17	10,47	43,14	9,49	11,29	12,63	10,61	7,13	10,02	12,51	12,21
7601	6,70	89,29	10,33	52,01	9,73	11,57	12,62	11,70	8,10	9,99	12,57	12,46
7701	4,62	65,55	6,52	63,00	4,91	9,26	5,76	9,58	10,21	11,26	13,19	12,59
7702	9,90	32,99	15,73	43,33								
7801	5,46	86,53	7,61	107,59	6,54	11,94	8,46	13,16	7,58	13,05	14,16	15,10
7901	8,95	15,20	11,52	23,93	9,86	7,94	12,93	10,67				
8101	10,25	33,74	13,51	55,21	5,81	8,72	6,92	5,56	14,32	12,03	3,59	7,47
8201	9,33	30,14	12,87	41,75	6,85	9,48	8,00	6,08	19,14	11,04	5,10	6,93
8301	9,98	74,25	14,30	99,25	4,19	5,42	5,43	2,39	2,01	5,87	7,06	4,81
8401	11,00	107,18	15,47	124,32	5,98	8,37	8,04	8,85	7,11	11,63	11,57	12,49
8501	7,17	45,10	10,40	45,83	7,38	7,48	9,79	6,57	5,88	9,92	12,72	11,65
8601	9,92	98,71	14,50	103,85	7,79	9,69	10,40	10,87	6,77	14,46	14,28	17,51
8701	-0,05	24,15	-1,29	24,54	5,66	10,91	7,77	12,66	4,80	12,16	14,85	15,70
8801	1,31	14,92	-0,44	15,32	4,99	8,80	6,14	11,56	5,16	12,47	14,07	16,93
9601	2,51	60,21	5,38	84,40	2,93	3,57	4,90	5,85	9,35	6,41	11,15	8,53

*Espaços vazios representam ausência de safra em uma dada ZH.

Tabela A.12: Variação percentual da produtividade média de grãos (PGr) e da produtividade média da água (PCh) para os cenários RCP 4.5 e 8.5 (2040 a 2070), com relação as condições climáticas atuais (1988 a 2018) - Feijão Preto.

ZH	1ª Safra (%)				2ª Safra (%)			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh	PGr	PCh
5801	15,73	35,38	20,81	51,30	11,19	15,20	15,47	23,00
5901	13,34	28,32	18,53	42,53	11,93	18,14	16,55	27,69
6601	10,35	21,34	13,99	28,48	9,58	9,61	13,29	19,39
6701	11,28	23,45	16,45	34,17	9,06	10,18	13,09	18,21
6801	10,97	32,96	15,18	43,66	9,07	13,60	12,76	21,81
6901	12,92	27,91	18,86	38,41	13,80	16,81	19,04	24,82
7501	9,91	50,13	14,97	53,38	10,25	12,23	14,57	12,82
7601	9,77	86,57	14,67	63,53	10,59	12,64	14,70	14,06
7701	8,94	74,00	12,59	75,31	10,16	14,88	14,17	18,50
7702	20,69	44,34	28,39	57,66				
7801	9,30	90,57	13,51	115,17	10,44	16,29	14,78	19,95
7901	11,01	18,48	15,97	29,92	11,69	10,94	16,87	15,56

*Espaços vazios representam ausência de safra em uma dada ZH.