

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Jossana Ceolin Cera

**SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO E
PRODUTIVIDADE DE SOJA EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E
FUTURAS PARA O RIO GRANDE DO SUL**

Santa Maria, RS

2016

Jossana Ceolin Cera

**SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE
SOJA EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS PARA O RIO GRANDE
DO SUL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Nereu Augusto Streck

Santa Maria, RS

2016

Jossana Ceolin Cera

**SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE
SOJA EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS PARA O RIO GRANDE
DO SUL**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 18 de Fevereiro de 2016:

Nereu Augusto Streck, Ph.D. (UFSM)
(presidente/Orientador)

Angelica Durigon, Dra. (UFSM)

Jônatan Dupont Tatsch, Dr. (UFSM)

Andréa Ucker Timm, Dra. (FSG)

Bernadete Radin, Dra. (FEPAGRO)

Santa Maria, RS
2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ceolin Cera, Jossana

Simulação do desenvolvimento, crescimento e produtividade de soja em condições climáticas atuais e futuras para o Rio Grande do Sul / Jossana Ceolin Cera.- 2016.

98 p.; 30cm

Orientador: Nereu Augusto Streck

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2016

1. Glycine max (L.) Merr 2. Modelo SoySim 3. Modelo CROPGRO-Soybean 4. Cenários climáticos futuros I. Streck, Nereu Augusto II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais José Cera Filho e Cleci Maria Ceolin Cera, por toda a dedicação e esforço para a minha formação moral e profissional.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade na realização do curso.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de doutorado e de recursos financeiros que viabilizaram a coleta de dados de campo, através do Projeto número 471860/2012-3.

À CAPES pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche (PDSE/CAPES).

Ao professor Nereu Augusto Streck pela oportunidade, orientação, ensinamentos, paciência e amizade durante o doutorado.

À professora Simone Erotildes Teleginski Ferraz pela amizade, ensinamentos e ajuda com os dados dos cenários climáticos futuros utilizados na tese.

Ao Professor Haishun Yang pela orientação e a University of Nebraska-Lincoln, Nebraska-EUA por ter permitido a realização de parte do meu doutorado.

Aos agricultores Fernando Giacomini (Restinga Sêca), Claudemir Richter (Tupanciretã) e Adriano Nunes de Almeida (Água Santa) por terem permitido conduzirmos experimentos nas suas propriedades durante os anos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015.

Aos professores Cleber Alberto Maus (Unipampa), Isabel Lago (Ufpel), Gizelli Moiano de Paula (CAMPUS-Frederico Westphalen) e seus alunos de iniciação científica pela condução e avaliação de experimento.

À Dra. Liege da Costa e demais pesquisadores e funcionários da Fepagro Sementes de Júlio de Castilhos pela condução e manejo de experimento.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz por permitir utilizar os dados de épocas de semeadura na minha Tese e aos colaboradores do IRGA que auxiliaram na condução e coleta de dados.

Um Agradecimento especial aos colegas e amigos do Grupo de Agrometeorologia da UFSM, principalmente aos que fizeram parte do “Projeto Soja” pela amizade e ajuda na coleta dos dados durante seis anos de experimentos de campo (2010 a 2015).

Aos bons e velhos amigos da Meteorologia, pela amizade, palavras de apoio e momentos de descontração.

Aos membros da banca avaliadora pela disponibilidade, sugestões e contribuições para melhoria do trabalho.

À todos aqueles não listados e que de alguma maneira contribuíram para a realização do trabalho, o meu Muito Obrigado.

Não se pode criar experiência.

É preciso passar por ela.

(Albert Camus)

RESUMO

SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DE SOJA EM CONDIÇÕES CLIMÁTICAS ATUAIS E FUTURAS PARA O RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: Jossana Ceolin Cera
ORIENTADOR: Nereu Augusto Streck

A soja é a principal *commodity* agrícola mundial, sendo os Estados Unidos, Brasil e Argentina os principais produtores. Esta tese teve como objetivos (i) avaliar o modelo SoySim na simulação do crescimento, desenvolvimento e rendimento de cultivares de soja com grupo de maturação maior que 4.2 na região subtropical do Brasil e (ii) simular a produtividade potencial e com limitação por água em soja no Estado do Rio Grande do Sul em dois cenários climáticos futuros do IPCC (SRES A1B e RCP4.5) com os modelos SoySim e CROPGRO-Soybean. Para alcançar o primeiro objetivo, foram usados dados de experimentos de campo com 20 cultivares de soja, em 38 diferentes datas de semeadura durante os anos agrícolas de 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 e 2014/2015, em 12 locais no Rio Grande do Sul. As cultivares de soja utilizadas possuem grupo de maturação variando entre 4.8 e 8.2 e tipo de crescimento indeterminado e semi-determinado. A avaliação do modelo SoySim mostrou razoável simulação dos estágios vegetativos e reprodutivos, número final de nós e produtividade, mas no geral, as simulações que obtiveram os menores erros foram aquelas com grupo de maturação menor que 6.0. Para o segundo objetivo, as simulações com os cenários de emissões SRES A1B e RCP4.5 forçando os modelos agrícolas SoySim e CROPGRO-Soybean mostraram um aumento na produtividade de soja no Rio Grande do Sul até o final do século XXI, com anomalia positiva de até 2 Mg ha⁻¹ no período de 2070-2099 em relação ao período baseline (1980-2009).

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr. Modelo SoySim. Modelo CROPGRO-Soybean. Cenários climáticos futuros.

ABSTRACT

SIMULATING DEVELOPMENT, GROWTH, AND YIELD OF SOYBEAN UNDER CURRENT AND FUTURE CLIMATE FOR THE RIO GRANDE DO SUL

AUTHOR: Jossana Ceolin Cera
ADVISOR: Nereu Augusto Streck

Soybean is a mainly agricultural world *commodity*, with United States, Brazil, and Argentina as mainly producers. This thesis had as objectives (i) evaluate the SoySim model to simulate growth, development, and yield of soybean cultivars with maturity groups greater than 4.2 in a subtropical region of Brazil and (ii) simulate the soybean yield potential and rainfed in the Rio Grande do Sul State in two climate futuro scenarios of IPCC (SRES A1B and RCP4.5) with the crop models SoySim and CROPGRO-Soybean. To reach the first objective, were used data from field experiments with 20 soybean cultivars, in 38 diferent sowing dates during 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 and 2014/2015 growing seasons, in 12 locations at Rio Grande do Sul State. The soybean cultivars have maturity group varying between 4.8 and 8.2 and indeterminate and semi-determinate growth habit. The evaluation of the SoySim model show reasonable simulations of the variables of the V-stage and R-stage, final node number, and yield, but in general, the simulations that had the lower errors, were those with maturity groups lower than 6.0. For the second objective, the simulations with the emission scenarios SRES A1B and RCP4.5 forcing the crop models SoySim and CROPGRO-Soybean showed an increase on soybean yield in Rio Grande do Sul State until the end of the XXI century, with a positive change around 2 Mg ha⁻¹ for the 2070-2099 period related to the baseline (1980-2009).

Key-words: *Glycine max* (L.) Merr. SoySim model. CROPGRO-Soybean model. Future climate scenarios.

LISTA DE ABREVIATURAS

AR4 – Fourth Assessment Reports

AR5 – Fifth Assessment Reports

CMIP – Climate Model Intercomparison Project

FNN – Final node number

GM – Grupo de maturação

IAF – Índice de área foliar

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LAI – Leaf area index

MG – Maturity group

NRMSE – Normalized Root Mean Square Error

RCP – Representative Concentration Pathway

RMSE – Root Mean Square Error

RQME – Raiz Quadrada Média do Erro

SDM – Seed dry matter

SRES – Special Report on Emissions Scenarios

TDM – Above ground dry matter

[CO₂] – Concentração de dióxido de carbono

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 A CULTURA DA SOJA.....	14
2.2 MUDANÇA CLIMÁTICA.....	14
2.3 MUDANÇA CLIMÁTICA E AGRICULTURA.....	16
2.4 MODELOS DE SIMULAÇÃO DAS CULTURAS AGRÍCOLAS (<i>CROP MODELS</i>).....	17
3 OBJETIVO GERAL.....	19
4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
5 ARTIGO 1 – Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups	20
6 ARTIGO 2 – Produtividade de soja no Rio Grande do Sul simulada para dois cenários climáticos futuros do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas.....	54
7 DISCUSSÃO.....	81
8 CONCLUSÃO.....	84
9 REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A.....	89
APÊNDICE B.....	90
APÊNDICE C.....	95
APÊNDICE D.....	96
APÊNDICE E.....	97
APÊNDICE F.....	98

1 INTRODUÇÃO

A soja é a principal *commodity* agrícola mundial, sendo os Estados Unidos, Brasil e Argentina os principais produtores, responsáveis por 78% da produção mundial do grão (FAOSTAT, 2016). O Brasil, segundo colocado nesta lista, aumentou sua produção de 75 para 96 milhões de toneladas do ano agrícola de 2010/2011 para 2014/2015. Entre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul está em terceiro lugar na produção com quase 15 milhões de toneladas colhidas na última safra, com produtividade média de 2,8 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2016).

A crescente expansão desta cultura faz pesquisadores e produtores procurarem mais informações sobre manejo, melhor cultivar e época para a semeadura. O uso de modelos agrícolas vem sendo cada vez mais difundido com este intuito, como é o caso do modelo CROPGRO-Soybean (BOOTE et al., 2002) amplamente usado em vários países, inclusive no Brasil e do modelo SoySim (SETIYONO et al., 2010), desenvolvido mais recentemente e ainda pouco usado fora dos Estados Unidos. Os dois modelos simulam o crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja na condição potencial e o modelo CROPGRO-Soybean possui também a opção de simulação com modelo de balanço hídrico e assim possíveis estresses hídricos durante a estação de crescimento.

Além da busca para atingir o teto potencial da produção de soja, existe também a preocupação com os efeitos das mudanças no clima. Segundo os dois últimos relatórios do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC, 2007, 2013), o aumento da concentração de dióxido de carbono ([CO₂]) na atmosfera e da temperatura média global são reais, e além de prejudicar a vida humana, as plantas também são afetadas por essas alterações. No caso da soja, o aumento da [CO₂] é benéfico, pois é o substrato primário para a fotossíntese, porém se este aumento vier acompanhado do aumento da temperatura, os ganhos na produtividade das culturas podem ser menores ou até mesmo anulados (HUNT et al., 1991; BUTTERFIELD & MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001; TAIZ & ZEIGER, 2013).

Muitos estudos sobre o impacto de cenários de mudança climática na agricultura do Brasil têm sido realizados em diversas regiões brasileiras (ASSAD et al., 2004; WALTER et al., 2014), inclusive para a cultura da soja (SIQUEIRA et al., 1994, 2000, 2001; STRECK & ALBERTO, 2006a,b). É importante que estes estudos sejam retomados de tempos em tempos, pois os cenários do IPCC vem sendo aperfeiçoados e a cada ano surgem novas cultivares de soja e as tecnologias

de cultivo, principalmente manejo da adubação e de tratamentos fitossanitários, podem sofrer alterações e melhoras. Por exemplo, do Quarto para o Quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática foram observadas mudanças nos cenários climáticos, com uma mudança de cenários de emissões para cenários de forçantes radiativas (SRES A1, A2, A1B, B1 e B2 no relatório de 2007 para RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 no relatório de 2014). Os limiares de aumento da temperatura também eram maiores no relatório de 2007.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é uma das principais culturas agrícolas do Brasil e a principal fonte de óleo vegetal do mundo. Os principais produtores mundiais são os Estados Unidos da América, Brasil e Argentina, responsáveis por 78% da produção mundial (USDA, 2016; FAOSTAT, 2016). O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja e na safra 2014/2015 foram cultivados em torno de 32 milhões de hectares, totalizando uma produção de 96 milhões de toneladas do grão e produtividade média de 2,9 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2016). A Região Sul do Brasil é a segunda região em área cultivada e produção de soja, ficando atrás dos Estados da Região Centro-Oeste. O Estado do Mato Grosso é o maior produtor nacional, seguido pelo Paraná e pelo Rio Grande do Sul (CONAB, 2016). No Rio Grande do Sul, são cultivados anualmente em torno de 5 milhões de hectares e colhidos em torno de 15 milhões de toneladas de soja (CONAB, 2016), sendo assim a cultura agrícola mais importante desse Estado.

A maioria das cultivares de soja atualmente semeadas no Estado pertencem a grupos de maturidade relativa (GMR) variando entre 5.0 e 7.5. Essa abordagem de GMR foi introduzida por Alliprandini et al. (2009) e visa descrever a maturidade relativa da soja em vários ambientes e latitudes. Quanto ao tipo de crescimento das cultivares de soja, tem-se o tipo determinado onde o período de sobreposição entre os estágios vegetativo e reprodutivo é nulo ou quase nulo, o tipo de crescimento indeterminado, quando a planta continua emitindo nós após o início do florescimento, levando a um aumento em estatura até o início do enchimento de grãos (Bastidas et al., 2008). Já o tipo de crescimento semi-determinado possui características intermediárias entre os tipos de crescimento determinado e indeterminado.

2.2 Mudança climática

Estudos visando quantificar possíveis alterações nos elementos climáticos ou na sua variabilidade temporal vêm sendo realizados em diferentes locais do Planeta. Os resultados desses estudos foram reunidos nos relatórios do IPCC. Especialmente após a liberação do quinto relatório do IPCC em 2013 (AR5), o consenso é cada vez maior na comunidade científica de que o clima terrestre está mudando e que a temperatura do ar está aumentando em muitas regiões do Planeta devido ao aumento da [CO₂] e outros gases do efeito estufa (WEISS et al., 2003; KERR, 2005),

apesar de haver algumas divergências no meio científico sobre as causas dessas mudanças (McINTYRE & McKITRICK, 2003, 2005a, 2005b; Von STORCH et al., 2004). A [CO₂] atual está em torno de 400 ppm e a temperatura média global da terra e do oceano teve um aumento de 0,85°C no período de 1880 a 2012, sendo que os últimos anos são os mais quentes da história (IPCC, 2007; 2013). A elevação na temperatura no último século se estende à América do Sul e ao Brasil.

Uma característica do aumento de temperatura observado nos últimos anos em alguns locais é que o aumento na temperatura mínima e máxima é assimétrico, com maiores aumentos na temperatura mínima do que na máxima. Por exemplo, nas Filipinas, Peng et al. (2004) analisando os dados de temperatura do ar do período de 1979 a 2003, observaram que o aumento da temperatura máxima média anual foi de 0,35°C, enquanto que o aumento da mínima média anual foi de 1,13°C, sendo que o incremento na temperatura mínima do ar foi de 1,33°C na estação seca e de 0,80°C na estação chuvosa. Tao et al. (2006) observaram que no período de 1981 a 2000 as temperaturas mínimas aumentaram mais que as máximas em vários locais da China, sendo que a temperatura mínima teve aumentos maiores no Norte e menores no Sul. Na região de Pelotas no Estado do Rio Grande do Sul, Steinmetz et al. (2005) encontraram um aumento da temperatura mínima média anual de 1,01°C, no período de 1893 a 2004, e de 1,66°C no período de 1955 a 2004. Ainda, no Rio Grande do Sul, no período de 1948 a 2004, a tendência de aumento da temperatura mínima média anual, no período de outubro a dezembro, mostrou valores crescentes no sentido Leste-Oeste do Estado, variando de 0,8°C a 1,8°C (MARQUES et al., 2005). Analisando o período de 1960-2002, Marengo & Camargo (2008) constataram redução na amplitude térmica diária nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro) no Rio Grande do Sul devido a um maior aumento na temperatura mínima do que na temperatura máxima. Similarmente, mas analisando uma série histórica mais longa (1913-2006), Sansigolo & Kayano (2010) relataram aumento de 1,7°C/100 anos na média anual de temperatura mínima no Rio Grande do Sul e não houve tendência na média da temperatura máxima anual. Para Santa Maria, Rio Grande do Sul, Streck et al. (2011) analisando a série histórica de temperatura do período de 1912 a 2010, relatam diminuição na amplitude térmica diária, principalmente devido ao aumento na temperatura mínima diária. Outros elementos climáticos como a radiação solar e a precipitação pluvial apresentam tendências menos consistentes, o que se explica em parte, pela grande variabilidade espacial destes

elementos climáticos, especialmente da precipitação pluvial, e à baixa densidade de estações meteorológicas, principalmente nos países em desenvolvimento (Barcellos et al. 2009).

Com relação às projeções até o final deste século, no quarto relatório do IPCC (AR4) as projeções de clima apontam para aumentos de 1,1 a 6,4°C na temperatura média do ar em vários locais do Planeta, incluindo o Brasil (IPCC, 2007). As projeções para outros elementos climáticos como a precipitação, nebulosidade, radiação solar incidente e evaporação apresentam tendências variáveis em função da escala (global ou regional) (THOMAS, 2000; IPCC, 2007). No AR5 os valores de aumento da temperatura são um pouco mais baixos, variando entre 0,3 e 4,8°C (IPCC, 2013).

2.3 Mudança climática e agricultura

A taxa de crescimento das plantas tende a aumentar com a elevação da [CO₂] atmosférico, pois o CO₂ é o substrato primário para fotossíntese (TAIZ & ZEIGER, 2013). Plantas com metabolismo C₃ são mais beneficiadas pelo aumento da [CO₂] atmosférico do que plantas com metabolismo C₄ (SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se o aumento da [CO₂] for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e produtividade das culturas devido ao encurtamento do ciclo (BUTTERFIELD & MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração de manutenção (TAIZ & ZEIGER, 2013).

O setor agrícola está entre os setores da sociedade mais vulneráveis à mudança climática (IPCC, 2007; 2013). Esta vulnerabilidade é devido a maioria das culturas agrícolas ficarem expostas aos elementos meteorológicos durante todo o seu ciclo de desenvolvimento. Isso se confirma em trabalhos realizados no Brasil com diferentes culturas como o café (ASSAD et al., 2004), trigo, soja, milho (STRECK & ALBERTO, 2006a,b, JUSTINO et al., 2013, RIO et al., 2015), batata (STRECK et al., 2006) e arroz (LAGO et al., 2008; WALTER et al., 2010a,b; 2014), em que aumentos de 1 e 2°C afetam o desempenho de agroecossistemas, alterando o ciclo de desenvolvimento das culturas e sua produtividade, esta última geralmente para menos.

A produtividade das culturas, conseqüentemente, também está vulnerável às mudanças climáticas (IPCC, 2007; 2013), e os impactos repercutirão na tomada de decisão por parte do setor privado e em políticas públicas em nível nacional e internacional. Estudos do impacto da mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas são difíceis de serem realizados experimentalmente, devido à limitação de mão-de-obra e recursos financeiros (ANDRESEN et al.,

2001). Modelos matemáticos devidamente adaptados e testados em diferentes ambientes são ferramentas que permitem descrever as interações entre a planta ou cultura e o ambiente, e podem ser usados em estudos dos efeitos de possíveis mudanças climáticas em atividades agrícolas (ASSAD et al., 2004; STRECK & ALBERTO, 2006a,b; STRECK et al., 2006).

2.4 Modelos de simulação das culturas agrícolas (*Crop Models*)

Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade tem sido propostos para várias culturas, incluindo a soja (SINCLAIR, 1986; BOOTE et al. 1998; SETIYONO et al., 2007, SETIYONO et al., 2008; SETIYONO et al., 2010). Estes modelos são ferramentas que podem auxiliar no manejo das culturas (STRECK et al., 2003a,b), em programas de melhoramento (BANTERNG et al., 2006) e em estudos do impacto da mudança climática sobre o desempenho de agroecossistemas (ANDRESEN et al., 2001; STRECK, 2005; STRECK & ALBERTO, 2006a,b; WALTER et al., 2014).

Dois principais modelos de simulação da cultura da soja são o modelo CROPGRO-Soybean (BOOTE et al., 2002) e o modelo SoySim (SETIYONO et al., 2010). O primeiro é mais antigo e tem sido muito usado nas últimas duas décadas e o segundo é mais recente e ainda pouco usado fora dos Estados Unidos. Ambos são modelos dinâmicos baseados em processos que calculam os diferentes processos de desenvolvimento e crescimento que ocorrem durante a estação de crescimento no passo de tempo de um dia. O CROPGRO-Soybean tem a opção de simulação sem e com restrição hídrica enquanto o SoySim simula apenas na condição sem restrição hídrica.

O modelo CROPGRO-Soybean tem sido muito usado na simulação da produtividade de soja em cenários climáticos futuros (LAL et al., 1998; CARBONE et al., 2003; MALL et al., 2004; QIAN, et al., 2011). Já o SoySim tem sido pouco usado em trabalhos de simulação de crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja, e nenhum trabalho foi encontrado na literatura, até o presente momento, com cenários de mudança climática. O SoySim é um modelo potencialmente mais responsivo às mudanças no ambiente, quando comparado a outros modelos como o CROPGRO-Soybean, Sinclair-Soybean e WOFOST, além de necessitar de somente dois parâmetros específicos do genótipo, o que facilita o seu uso (SETIYONO et al., 2010). O modelo CROPGRO-Soybean, necessita de calibração de todos os parâmetros toda vez que uma nova cultivar é introduzida no modelo, sendo que para calibrar a fenologia dentro do modelo são necessários doze parâmetros específicos do genótipo (SETIYONO et al., 2010). Isso dificulta o

uso desses modelos por pessoas mais leigas, como um produtor de soja por exemplo, que queira estimar certos estágios da cultura para algum manejo específico. Para usar o modelo CROPGRO-Soybean, o usuário também precisa de conhecimentos técnico-específicos de informática e da soja para calibrar de forma correta cada cultivar dentro do modelo, o que não é necessário quando se utiliza o modelo SoySim.

3 OBJETIVO GERAL

Contribuir para a melhoria de modelos de simulação da cultura da soja e para o entendimento dos impactos da mudança climática sobre a soja no Rio Grande do Sul.

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 – Avaliar o modelo SoySim na simulação do crescimento, desenvolvimento e rendimento de cultivares de soja com grupo de maturação maior que 4.2 na região subtropical do Brasil.

2 – Simular a produtividade potencial e com limitação por água em soja no Estado do Rio Grande do Sul em dois cenários climáticos futuros do IPCC (SRES A1B e RCP4.5) com os modelos SoySim e CROPGRO-Soybean.

5 ARTIGO 1

**EXTENDING THE EVALUATION OF THE SOYSIM MODEL TO SOYBEAN
CULTIVARS WITH HIGH MATURATION GROUPS**

(Artigo submetido para publicação na Field Crop Research)

Extending the evaluation of the SoySim model to soybean cultivars with high maturation groups

Jossana Ceolin Cera^a, Nereu Augusto Streck^{a*}, Haishun Yang^b, Alencar Junior Zanon^c, Gizelli Moiano de Paula^a, Isabel Lago^a

^aUniversidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brazil

^bUniversity of Nebraska – Lincoln, 68583, Lincoln, NE, USA.

^cInstituto Rio Grandense do Arroz, 94930-030, Cachoeirinha, RS, Brazil.

*Corresponding author: nstreck2@yahoo.com.br

Abstract

SoySim is a dynamic process-based model for soybean that requires fewer genotype-specific parameters while maintaining prediction accuracy compared to other existing soybean models. The SoySim model was originally developed and evaluated using cultivars with maturity group (MG) ratings from 0.8 to 4.2 in temperate climate and mid latitudes. The objective of this study was to evaluate the SoySim model for simulating growth, development and yield of soybean cultivars with MG greater than 4.2 grown in the subtropics of Southern Brazil. The range of maturity groups used in this study was from 4.8 to 8.2, including indeterminate and semi-determinate soybean cultivars. Data for model evaluation were from well-managed twelve field experiments across the Rio Grande do Sul State, including on-farm experiments, during five growing seasons (2010/2011-2014/2015), with planting dates before, during and after the

recommended period, and yield ranging from 1.5 to 5.9 Mg ha⁻¹. The simulated yield for cultivars with maturity groups lower than 6.0 had a RMSE between 0.5 and 0.7 Mg ha⁻¹ for intermediate (November and December) and late (January and February) sowing dates, indicating that the underlining approach of the SoySim model is robust, but needs a review on the parameters and on the relationships between temperature and photoperiod functions for soybean cultivars with maturity group greater than 6.

Key-words: Crop modeling, process-based model, Southern Brazil, seed yield, *Glycine max*.

1 Introduction

Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) is an important global commodity. Brazil ranks second among producers, behind the United States, with about 81 million ton of soybean harvested in the last five (2010/2011- 2014/2015) growing seasons (FAOSTAT, 2016). Currently in Brazil, about 90% of vegetable oil and around 80% of biodiesel are produced from soybean (Henrique et al., 2014). Brazil and Argentina together are responsible for about 50% of the world soybean production (USDA, 2015; SOYSTATS, 2015), and most of the cultivars grown in these two countries are maturity group (MG) greater than 4.0, with indeterminate and semi-determinate stem termination (Mercau et al., 2007; Farias et al., 2009). The three states in Southern Brazil (Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul) were responsible for almost 35% of the Brazilian production in the last five growing seasons (2010/2011- 2014/2015). In Rio Grande do Sul State, cultivars MG ranges from 5.0 to 7.5 (Zanon et al. 2015b).

Crop models are tools that can help understand physiological processes, guide crop management practices (Streck et al., 2003a, 2003b), aid in breeding programs (Banterng et al.,

2006), assess yield potentials and gap studies (Grassini et al., 2015), and project impacts of climate change on crops yield (Meza & Silva, 2009). There are several soybean models and they vary in complexity and inputs required to run them. The Sinclair-Soybean model (Sinclair, 1986) is probably the simplest model that requires only a few cultivar specific inputs, while the WOFOST model (Brisson et al, 1998) is a generic, mechanistic crop model, but still requires genotype-specific calibrations. The CROPGRO-Soybean (Boote et al, 1998, Jones et al., 2003) is a process-based model that requires an extensive number of genotype-specific parameters. As new soybean cultivars are constantly released on an annual basis, cultivar-specific parameters can quickly become outdated. Yet, the lack of easy access to genotype-specific parameters is a major limitation for model applications by decision makers, extension services, educators, and scientists (Setiyono et al., 2010). The SoySim is a dynamic process-based model for soybean (Setiyono et al., 2010) that is developed on the basis of CROPGRO-Soybean, Sinclair-Soybean and WOFOST models, but requires fewer genotype-specific parameters while maintaining prediction accuracy (Setiyono et al., 2010). Compared with other models (CROPGRO-Soybean, Sinclair-Soybean and WOFOST), the SoySim model performed better for predicting phenology (Setiyono et al., 2007), and above ground dry matter and seed yield (Setiyono et al., 2010) for soybean cultivars with MG lower than 4.2.

The SoySim model was developed and evaluated using cultivars with MG from 0.8 to 4.2 (Setiyono et al., 2007; 2010) in temperate climate and mid latitudes (Nebraska, Indiana and Iowa, USA). In order to additionally test its robustness and general application, it is important to evaluate the SoySim outside the range of MG, climate and soil it was developed and tested, mainly in low latitudes (tropics and subtropics). The objective of this study was to evaluate the SoySim model

for simulating growth, development and yield of soybean cultivars with MG greater than 4.2 grown in the subtropics of Southern Brazil.

2 Material and Methods

2.1 Field experiments

Independent data for the SoySim evaluation were obtained from well-managed field experiments conducted in universities (Federal University of Santa Maria and Federal University of Pelotas) and research institutions (Rio Grandense Rice State Institute and Agricultural Research Foundation of Rio Grande do Sul), as well as in three commercial farms, totaling 12 sites across the Rio Grande do Sul State (Figure 1). These sites are located in the upper northern half part of the State where soybean is grown in highlands, and in the southern half part of the State where soybean is grown in lowlands as a rotation crop with flooded rice. In these experiments, soil and crop management practices (Table 1) were applied to minimize abiotic (nutrients) and biotic (insects, diseases and weeds) stresses. At three locations (Santa Maria and Pelotas), the experiments were irrigated while experiments at other locations were rainfed (Figure 1, Table 1). For the rainfed experiments, precipitation was sufficient and well distributed throughout the growing season so plants growth and development was not limited by water stress. The experiments were conducted during five growing seasons (2010/2011-2014/2015), with several sowing dates (from September to February). The range of sowing dates (Table 1) included the recommended sowing window in Rio Grande do Sul State (from October 1th to December 31th) and extended before and after this period so that soybean plants were exposed to different temperature and photoperiod, leading to observed seed yield varying from 1.5 to 5.9 Mg ha⁻¹.

Twenty soybean cultivars with MG varying from 4.8 to 8.2 were used in the study (Table 2). These cultivars are typically used across the Rio Grande do Sul State (except the cultivars IA5 and Bragg, which are old, no transgenic, cultivars grown in the 70's and 80's) and the stem termination included semi-determinate and indeterminate.

The experimental layout was a complete randomized block design with thirteen cultivars and three or four replications, depending on location, except in the on-farm experiments where there was no replication (one plot per cultivar). In the on-farm experiments, in addition to the 13 cultivars of the multi-location experiments, we also analyzed the cultivar that the farmer was growing by sampling plants in four portions located across the farm.

Crop emergence was defined when 50% of the cotyledons of seedlings appeared above the soil surface. Vegetative and reproductive stages were measured on five or eight plants in each plot, depending of the experiment. The number of nodes on the main stem, from unifoliate (V1) to the final node (Vn) was recorded every 3-4 days. The R-stages were monitored every day in Pelotas and Santa Maria from December 2010 until January 27th 2013, and every other day after that. At the other locations, the R-Stages were observed every 3-5 days. The R-stages evaluated were R1 (first open flower), R3 (first pod), R3.5 (mid-pod elongation), R4 (full pod), R5 (beginning seed), R6 (full seed), R7 (physiological maturity) and R8 (harvest maturity) (Fehr et al., 1971; Fehr and Caviness, 1977).

Above-ground dry matter was sampled only in the cultivars grown by the farmers (three farmers with one cultivar in each of the two growing seasons, totalling six different cultivars). Two rows of 1 meter in length were sampled in four areas of the field. Plants were separated into stem, leaves, petiolates, pods and seeds, and samples were oven dried at 60°C until constant weight. On each sampling date, 10 leaves were sampled from plants to determine their individual dry matter

and area (length x width x shape factor). The area of the leaves collected in the two rows was calculated from the specific leaf area of the 10 leaves. Seed yield (13% moisture) and yield components (number of pods per plant, number of seeds per pod and weight of 100 seeds) were determined for each experiment by sampling one area per plot. More information about the experiments can be found in Richter et al. (2014) and Zanon et al. (2015a,b).

Daily weather data used for running the SoySim model were from automatic weather stations located around 100 and 150 meters from the experimental fields, except for the three on farm experiments, where the weather stations were about 15 km away in Tupanciretã and 40 km away in Água Santa in the first growing season, and 35 km away in Restinga Sêca in the two growing seasons. A summary of meteorological variables for each year in each location during the experiments are in Table 3.

2.2 The SoySim model

Version 1.0 of the SoySim model (Setiyono et al., 2010) was used in this study. This version of the model describes crop development, growth and yield under near-optimal conditions i.e., it simulates yield potential, defined as the yield of a crop grown under conditions that are not limited by water, nutrients and biotic factors (insects, diseases and weeds), i. e., yield is a function of major climate factors, including solar radiation, temperature (van Ittersum and Rabbinge, 1997; Evans and Fischer, 1999). Input data needed to run the model included daily weather data (solar radiation, maximum and minimum temperature), sowing date, MG (0.0 to 8.0), stem termination (indeterminate and semi-determinate), plant population density, and the early growth conditions

(optimum, medium and poor). The Cultivar Generic mode of the model was used, i.e. only maturity group (MG) and stem termination (Table 2) was used as genetic inputs.

2.2.1 Crop phenology and leaf area index

In the SoySim model, soybean development is divided into five phases (Setiyono et al., 2007). The first phase, sowing to emergence (SO-EM), is influenced by the accumulation of thermal time during radicle development and hypocotyl elongation. The second phase, from emergence to final main stem node (EM- V_n), is a function of temperature and a chronology function that describes a reduction on main stem node appearance of the upper most nodes. The next main phase, cotyledon stage to first open flower (V_0 - R_1), is a function of photoperiod during the floral induction phase (V_0 - R_0) and temperature during the post-induction phase (R_0 - R_1). The fourth phase, from first open flower to the beginning seed (R_1 - R_5), is a function of temperature and photoperiod, with the function that reduces the rate of main stem node appearance. The last phase, first open flower to maturity (R_1 - R_7), is also a function of temperature and photoperiod.

The development rate during each developmental phase is calculated on a daily basis using a beta function and cardinal temperatures that vary among the the developmental phases (Setiyono et al., 2007). The model calculates the date of the main stem V-stages (V_1, V_2, \dots, V_n) and the R-stages ($R_1, R_3, R_{3.5}, R_4, R_5, R_6, R_7$ and R_8) according to the Fehr and Cavinnes scale (Fehr and Caviness, 1977).

Leaf area index (LAI) is calculated based on logistic expansion and senescence functions (Setiyono et al., 2008) that recognize key physiological and phenological processes. LAI is simulated as a function of total leaf area per plant and plant population density.

2.2.2 Dry matter accumulation and grain yield

Above- and below-ground dry matter accumulation in SoySim is calculated from an integration of canopy photosynthesis, with temperature effects on photosynthesis being described by a non-linear beta function. Incoming photosynthetically active radiation (PAR) is divided into direct and diffuse components, and canopy photosynthesis is simulated from a hourly integration of net canopy photosynthesis over the daytime, which in turn is calculated by integrating individual leaf photosynthesis rate over the canopy using a multi-layer approach that separates sunlit and shaded leaves (Setiyono et al., 2010). Grain yield is simulated based on assimilate supply and seed number (Setiyono et al., 2010). The number of seeds per square meter is calculated with a function of assimilate availability, assimilate demand, and a portioning coefficient.

2.3 Model evaluation

The SoySim model was run for all experiments described in Table 1. The early growth conditions (an input required to run the model) was set at optimum for all cultivars and locations. In the analysis of the observed and simulated data, we first pooled the data of all cultivars. Afterwards, we analyzed the performance of the model for indeterminate and semi-determinate cultivars. We further grouped indeterminate cultivars into Group 1 (G1: cultivars with MG from 4.8 to 5.5) and as Group 2 (G2: cultivars with MG from 6.0 to 6.7), and the semi-determinate cultivars were grouped into Group 3 (G3: cultivars with MG from 5.9 to 6.6) and Group 4 (G4: cultivars with MG from 7.2 to 8.2). This grouping was intended to test the hypothesis that the

SoySim model performs better for MG closest to the range that it was developed and validated (0.8 to 4.2). Furthermore, we also analyzed the performance of the model considering early (September and October) x intermediate (November and December) x late (January and February) sowing dates and for lowland x highland soils.

The statistics used to evaluate the performance of the SoySim model in simulating the V-stages, final node number, R-stages, LAI, above ground dry matter (Mg ha^{-1}) and grain yield (Mg ha^{-1}) were:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(s_i - o_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\sum(s_i - o_i)^2/n}}{\sum o_i/n} \quad (2)$$

where RMSE is the root mean square error, NRMSE is the normalized root mean square error, s is the simulated data, o is the observed data, and n is the number of pairs of simulated and observed data. The smaller RMSE and NRMSE the better are the simulations.

3 Results

In the five-season experiments conducted with 38 different sowing dates across the Rio Grande do Sul State (Table 1), the V-stage was simulated with an overall RMSE of 0.6 and 0.7 nodes for indeterminate and semi-determinate cultivars, respectively (Figure 2a,b). The envelope of the simulated values around the observed V-stage was about 2.5 V-stage (insets of Figures 2a,b). The final node number (FNN) was overestimated by about 6 nodes for indeterminate cultivars (Figure 2c) and 12 nodes for semi-determinate cultivars (Figure 2d). The R-stages were simulated

with an RMSE that varied from 9.5 to 24.8 days for indeterminate cultivars (Figure 2e) and from 12.3 to 23.8 days for semi-determinate cultivars (Figure 2f).

Maximum leaf area index (LAI_{max}) was overestimated for LAI_{max} lower than about 3 and underestimated for LAI_{max} greater than about 6 (Figure 3a). Also evident in Figure 3a is that the simulated LAI_{max} levelled off at about 6 while the observed values reached values up to about 12 (cultivars with MG greater than 7.0 sown in September and October). Observed LAI_{max} decreased as sowing date was delayed from September to February and so did the model (Figure 3b), but the model underestimated LAI_{max} for early sowing dates (September and November) and overestimated LAI_{max} for late sowing dates (February). Compared to observed values, the simulated LAI_{max} was far less sensitive to the change of sowing date. The crossing of the two trend lines in Figure 3b summarizes that the range of simulated values is lower than the observed values.

The simulations of seed yield were with an RMSE of 0.9 Mg ha⁻¹ and 1.2 Mg ha⁻¹ for indeterminate and semi-determinate cultivars, respectively (Figure 4). The error was greater for semi-determinate cultivars (Figure 4b) because of the cultivars with MG 8.2 in late sowing dates had simulated yield near to zero. In some cases, the observed yield was around 2 Mg ha⁻¹ whereas simulated yield varied a lot, for example, from zero to 4.1 Mg ha⁻¹ (Figure 4b). When the yield data were plotted against sowing date and excluding the points with simulated yield lower than 0.5 Mg ha⁻¹ from Figure 4 (MG 8.2 sown in February), both simulated and observed data followed a similar trend (Figure 5), with a decrease in yield at late sowing dates after about November 2nd.

A summary of RMSE versus MG for each R-stage, V-stage, FNN, and yield with each growth habit (indeterminate and semi-determinate) is in Figure 6. In general, RMSE was lower as the MG decreases, i.e., for indeterminate cultivars with MG lower than 6.0, and for semi-

determinate cultivars with MG lower than 7.0 the RMSE is the smallest. The variables FNN, R-stages, and seed yield separated into G1, G2, G3 and G4, and in early sowing dates (September and October), intermediate sowing dates (November and December) and in late sowing dates (January and February) are in Figures 7, 8, and 9, respectively. For the FNN, the smallest RMSE (=4.7 nodes) and NRMSE (=26.5%) were for the G1 group (indeterminate cultivars with MG lower than 5.5) in the optimum period for sowing soybean in Rio Grande do Sul State (Fig. 7e). The largest error (RMSE=19.3 nodes and NRMSE=113.3%) was for the G4 (determinate cultivars with MG greater than 7.2) on the early period for sowing soybean (Figure 7d). Late sowing dates resulted in less nodes than in early sowing dates. The same pattern was for phenology (Figure 8), with the lowest RMSE for the G1, probably because that MG are closer to the MG that the model was calibrated (0.8-4.2). An important result was that some simulated R-stages happened before others, for example, R6 before R5, for MG greater than 5.5 and sowing in September (MG 6.3 and 6.7), October (MG 6.3 and 6.7), November (MG 6.3 and 6.7), December (MG 6.0, 6.3 and 6.6) and February (MG 5.5, 6.0, 6.3, 6.4 and 6.6). For sowing in January the stage R5 was simulated before R4 (MG 6.0, 6.3 and 6.6). For the G4, the model did not respond to the different sowing dates, mainly for the R3, R3.5, R4, R5 and R6 (Figure 8d,h,l). Simulated seed yield for the intermediate and late sowing dates and MG lower than 6.7 (Figure 9e, f, g, i, j, k) had the lowest RMSE (from 0.5 to 0.8 Mg ha⁻¹). For early sowing dates (Figure 9a, b, c, d), the SoySim model simulated higher yield compared to yield simulated for intermediate and late sowing dates, but was less sensitive to the variation of the observed data.

When yield was divided into highlands and lowlands (Figure 10), simulated and observed data were higher for lowlands, which can be explained by the fact that all sowing dates of the experiments in lowlands were in the recommended sowing period whereas highlands experiments

included sowing dates outside of the recommended period, which had low yields. The model captured the average and most of the variability of the observed data of groups G1+G3 (MG from 4.8 to 6.7) in both highlands and lowlands.

In general, the SoySim model provided reasonable simulations of the V and R-stages for the three on farm experiments (Figure 11), except for Água Santa in the 2014/2015 growing season (Figure 11f). For Restinga Sêca (Fig. 11a, d) the simulated R5 was after R6, as previously discussed. The overall leaf area index (LAI) and above ground dry matter (TDM) trend in the on-farm experiments during the two growing seasons was captured, but mostly overestimated by the model (Figure 12). Seed growth was well simulated (Figure 12 d, e, f, j, k, l), except for Restinga Sêca in the first year (Fig. 12d) where the model had a delay compared to the observed values.

4 Discussions

The SoySim model simulated reasonable well the V-stage, FNN, R-stages (G1 group, Figure 8), and on-farm seed dry matter (Figure 12) across the Rio Grande do Sul State. The RMSE for R3.5 and R7 (Figure 8e) and for R1 (Figure 8f) are close to the RMSE observed by Setiyono et al. (2007). The RMSE for R5, however, was much higher in our study. The G1 group included the indeterminate cultivars with the MG (4.8 to 5.5) nearest to the cultivars with which the SoySim was calibrated (0.8 to 4.2) (Setiyono et al., 2007, 2010). We hypothesize that the model performed better for the G1 group compared to the other cultivars because the mechanisms that drive development for higher MG (above 6.0) may be different and therefore need to be revised in the model. Furthermore, the errors in predicting R4, R5 and R6 can be explained by the approach used in SOYDEV (Figure 1 and Table 2 in Setiyono et al., 2007) in which the sub-phases R1-R5 and

R1-R7 are modeled independently in the model, including different cardinal temperatures for each sub-phase, leading the date of R6 to occur before the date of R5 (Figure 11a, d).

For LAI_{max} , Setiyono et al. (2008) found an error of about 0.47 for three different cultivars, much lower compared with our study (RMSE = 2.1). The simulated LAI_{max} was not greater than 6, whereas observed data, reached values above 12 (Figure 3). The reasons why model underestimated LAI_{max} at high values (above 3) may include plant architecture and plant spacing, but clearly this aspect needs further studies. An apparent upper threshold of simulated LAI_{max} at about 6 leads the model to be little sensitive to a wide range of sowing dates effects on observed LAI (Fig. 3b). LAI greater than six has little or no contribution to increase in yield, due to self shading of leaves within the canopy, leading the model to be sensitive to the effect of sowing date on seed yield (Figure 5).

Crop growth rate during the post-flowering phase and the duration of the period when pod and seeds are formed can explain much of the variation of soybean yields across genotypes and environments. Kantolic and Slafer (2005) exposed plants during the post-flowering period to long photoperiod and found that it extended the period between R3 to R6 and increased the number of seeds, which can explain the higher yield obtained at sowing dates in November in our studies.

Seed yield is the variable of most interest by farmers, but the SoySim model did not perform well for early sowing dates (Figure 9a, b, c, d). We hypothesize that part of the lack of sensitive yield for early planting dates is because of low LAI simulated for these planting dates by the SoySim model (Figure 3b). Cooper (2003) reports that early flowering can increase the yield potential of soybean to the 6.0-7.0 Mg ha⁻¹ range, when limiting factors such as water, nutrients and pests are minimized. Battisti et al. (2013) found that the best sowing date for high soybean yield in the Rio Grande do Sul State is around October 16th, decreasing for later sowing dates.

For intermediate (November and December) and late (January and February) sowing dates of G1 and G3 MG groups (Figure 9 e, d, I, k), the range of RMSE for yield (from 0.5 and 0.7 Mg ha⁻¹) is close to the RMSE (0.46 Mg ha⁻¹) obtained by Setyiono et al. (2010). For MG greater than 6.0 (Figure 9 f, h, j, l), the errors are greater and clearly the model needs to be revised. The on farm data confirmed the reasonable performance of the model in predicting seed yield of soybean cultivars with MG up to 6.3 (Figure 12), indicating that the processes that define seed growth dynamics and yield components in the model are robust.

5. Conclusions

We extended the evaluation of the SoySim model to a wide range of maturity group ratings and environments outside the range that the model was originally calibrated and validated. The results of this study showed that the underlining approach of the SoySim model is robust, but needs a review on the parameters and on the relationships between temperature and photoperiod functions for soybean cultivars with maturity group greater than 6. Until a new formulation of the model is available, the current version of SoySim can be used to simulate seed yield of soybean MG up to about 6.0. These results confirm the robustness of the model, as no specific cultivar calibration was needed for running the model with the Generic mode. The Generic mode of the SoySim model requires only two cultivar-specific inputs (MG and stem termination), which makes the model suitable for practical applications.

Acknowledgments

We especially thank all colleagues from the Research Group in Agrometeorology at the Federal University of Santa Maria (UFSM), Federal University of Pelotas (UFPEL), Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) and Agricultural Research Foundation of Rio Grande do Sul (FEPAGRO) for helping to collect, organize, and manage the experiment data. Also, we thank the Coordenação de Aproveitamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) of the Ministry of Education of Brazil for providing a scholarship to the first author. Data collection for this project was funded by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) of the Ministry of Science and Technology (Process number: 471860/2012-3) and IRGA.

6 References

- Banternng, P., Patanothai, a., Pannangpetch, K., Jogloy, S., Hoogenboom, G., 2006. Yield stability evaluation of peanut lines: A comparison of an experimental versus a simulation approach. *F. Crop. Res.* 96, 168–175. doi:10.1016/j.fcr.2005.06.008
- Battisti, R., Sentelhas, P.C, Pilau, F.G., Wollmann, C.A., 2013. Climatic efficiency for soybean and wheat crops in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, in different sowing date. *Ciência Rural.* 43, 390-396. doi: 10.1590/S0103-84782013000300003 (In Portuguese, with Abstract in English)
- 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* (Capítulo 18). Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 651-692.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S.,

- Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. 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* 18, 311–346.
- Cooper, R.L., 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. *F. Crop. Res.* 82, 27–35. doi:10.1016/S0378-4290(03)00003-0
- Evans, L.T., and R.A. Fischer. 1999. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. *Crop Sci.* 39: 1544–1551.
- Farias, J. R. B.; Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L.. Soybean. In: Monteiro, J. E. B. A. et al. *Agrometeorology of crops: the weather factor in agricultural production.* (In Portuguese) INMET - National Institute of Meteorology, 2009. p.109-130. 2009.
- FAOSTAT Database – Crop production (FAO). Access in: Sep. 10 2016, At: <<http://faostat.fao.org/>>.
- Fehr, W.R., Caviness, C.E., 1977. Stages of soybean development. Ames, Iowa State.
- Fehr, W. R., Caviness, C.E., Burmood, D.T., Pennington, J.S., 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine Max (L.) Merrill* 2–4.
- Grassini, P., Torrión, J.A., Yang, H.S., Rees, J., Andersen, D., Cassman, K.G., Specht, J.E., 2015. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. *F. Crop. Res.* 179, 150–163. doi:10.1016/j.fcr.2015.04.015
- Henrique, M., Silveira, L., Siika-aho, M., Kruus, K., 2014. *Biofuels in Brazil: Fundamental Aspects, Recent Developments, and Future Perspectives.* Springer International, Lorena, São Paulo. doi:10.1007/978-3-319-05020-1
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L. a., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, a. J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model,

- European Journal of Agronomy. doi:10.1016/S1161-0301(02)00107-7
- Kantolic, A.G., Slafer, G. a., 2005. Reproductive development and yield components in indeterminate soybean as affected by post-flowering photoperiod. *F. Crop. Res.* 93, 212–222. doi:10.1016/j.fcr.2004.10.001
- Meza, F.J., D. Silva. 2009. Dynamic adaptation of maize and wheat production to climate change. *Climatic Change* 94(1-2):143-156.
- Mercau, J.L., Dardanelli, J.L., Collino, D.J., Andriani, J.M., Irigoyen, A., Satorre, E.H., 2007. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. *F. Crop. Res.* 100, 200–209. doi:10.1016/j.fcr.2006.07.006
- Richter, G.L., Zanon, A.J., Streck, N.A., Vanderlei, J., Guedes, C., Kraulich, B., Rocha, T.S.M., Winck, J.E.M., Cera, J.C., 2014. Estimating leaf area of modern soybean cultivars by a non-destructive method. *Bragantia* 73, 416–425. doi:http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0179 (In Portuguese, with Abstract in English)
- Setiyono, T.D., Cassman, K.G., Specht, J.E., Dobermann, A., Weiss, A., Yang, H., Conley, S.P., Robinson, a. P., Pedersen, P., De Bruin, J.L., 2010. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. *F. Crop. Res.* 119, 161–174. doi:10.1016/j.fcr.2010.07.007
- Setiyono, K.G. Cassman, J Spechet, A Weiss, A Dobermann, and HS Yang. 2010. *SOYSIM Guide: A Simulation Model for Soybean Growth and Yield.*
- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J., Bastidas, a. M., Cassman, K.G., Dobermann, A., 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. *F. Crop. Res.* 100, 257–271. doi:10.1016/j.fcr.2006.07.011

- Setiyono, T.D., Weiss, A., Specht, J.E., Cassman, K.G., Dobermann, A., 2008. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions. *F. Crop. Res.* 108, 82–92. doi:10.1016/j.fcr.2008.03.005
- Sinclair, T.R., 1986. Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. *F. Crop. Res.* 15, 125–141. doi:10.1016/0378-4290(86)90082-1
- SOYSTATS - A reference guide to important soybean facts & figures, 2015. . Am. Soybean Assoc. 1–36.
- Streck, N.A., Weiss, A., Xue, Q., Baenziger, P.S., 2003a. Incorporating a chronology response into the prediction of leaf appearance rate in winter wheat. *Ann. Bot.* 92, 181–190. doi:10.1093/aob/mcg121
- Streck, N.A., Weiss, A., Xue, Q., Stephen Baenziger, P., 2003b. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: A modified Wang and Engel model. *Agric. For. Meteorol.* 115, 139–150. doi:10.1016/S0168-1923(02)00228-9
- USDA, UCAR, N., n.d. Climate change and agriculture in the US - Effects and adaptation [WWW Document]. URL [http://www.usda.gov/oc/climate_change/effects_2012/CC and Agriculture Report \(02-04-2013\)b.pdf](http://www.usda.gov/oc/climate_change/effects_2012/CC_and_Agriculture_Report_(02-04-2013)b.pdf) (accessed 2.8.15).
- Van Ittersum, M.K., and Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52:197–208.
- Zanon, A.J., Streck, N.A., Richter, G.L., Becker, C.C., Rocha, T.S.M. da, Cera, J.C., Winck, J.E.M., Cardoso, Â.P., Tagliapietra, E.L., Weber, P.S., 2015a. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. *Bragantia* 74, 279–290. doi:10.1590/1678-4499.0463 (In Portuguese, with Abstract in English)

Zanon, A.J., Winck, J.E.M., Streck, N.A., Rocha, T.S.M. da, Cera, J.C., Richter, G.L., Lago, I., Santos, P.M. dos, Maciel, L. da R., Guedes, J.V.C., Marchesan, E., 2015b.

Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. *Bragantia* 74, 400–411. doi:10.1590/1678-4499.0043 (In Portuguese, with Abstract in English)

Table 1 – Description of the field experiments conducted in 12 sites across the Rio Grande do Sul State, Brazil, used in the study.

Location	Lat., Lon, elevation	System	Tillage	Growing season	Water supply ¹	Sowing dates (mm/dd/yy)	Plant density (pl ha ⁻¹)	Seed yield (Mg ha ⁻¹) ²
Santa Maria	29°43'S, 53°43'W, 95 m a.s.l.	Highland	Conventional	2010/ 2015	Irrigated and Rainfed	12/10/10, 01/08/11, 09/24/11, 11/19/11, 01/28/12, 09/22/12, 11/03/12, 12/02/12, 02/06/13, 09/27/13, 11/15/13, 02/19/14, 11/15/14	315,000	1.5-5.9
Restinga Sêca ³	29°48'S, 53°22'W, 49m a.s.l.	Highland	No till	2013/2015	Rainfed	11/20/13, 11/14/13, 11/13/14	315,000	2.7-5.0
Tupanciretã ³	29°04'S, 53°50'W, 400m a.s.l.	Highland	No till	2013/2015	Rainfed	11/19/13, 10/27/14	315,000	2.3-4.2
Água Santa ³	28°10'S, 52°02'W, 650m a.s.l.	Highland	No till	2013/2015	Rainfed	11/18/13, 11/20/13, 12/03/13, 11/08/14	315,000	1.8-4.7
Júlio de Castilhos	29°13'S, 53°40'W, 513m a.s.l.	Highland	No till	2013/2014	Rainfed	11/18/13	315,000	2.5-3.1
Frederico Westphalen	27°21'S, 53°23'W, 489 a.s.l.	Highland	Conventional	2013/2014	Rainfed	11/23/13	315,000	2.8-4.9
Pelotas	31°42'S, 52°24'W, 57m a.s.l.	Lowland	Conventional	2012/2013	Irrigated	11/09/12	315,000	2.3-4.0
Cachoeirinha	29°57'S, 51°05'W, 23 m a.s.l.	Lowland	Conventional	2014/2015	Irrigated and Rainfed	10/04/14, 11/19/14, 12/12/14	280,000	2.8-5.3
Cachoeira do Sul	30°02'S, 52°53'W, 68 m a.s.l.	Lowland	Conventional	2014/2015	Rainfed	10/09/14, 11/07/14, 12/05/14	280,000	2.7-4.3
Palmares do Sul	30°15'S, 50°30'W, 9 m a.s.l.	Lowland	Conventional	2014/2015	Rainfed	11/11/14	280,000	2.9-3.6
Santa Vitória do Palmar	33°31'S, 53°22'W, 24 m a.s.l.	Lowland	Conventional	2014/2015	Rainfed	10/28/14, 11/17/14, 12/15/14	280,000	2.0-4.5
Uruguaiana	29°45'S, 57°05'W, 74 m a.s.l.	Lowland	Conventional	2014/2015	Rainfed	10/16/14, 11/06/14, 12/23/14	280,000	2.3-4.8

1: Irrigated experiments had water supplied by drip irrigation during the growing season. Rainfed experiments did not show visible water stress was during the growing season.

2: Seed yield is at 13% moisture content.

3: On-farm experiments. The other experiments were conducted in universities and research institutions.

Table 2 – Soybean cultivars used in the experiments conducted across the Rio Grande do Sul State, Brazil.

Cultivar	Maturity group	Stem termination	Location
NS 4823 RR	4.8	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos, Cachoeirinha, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Santa Vitória do Palmar, Palmares do Sul
NS 4910 RR	4.9	Indeterminate	Tupanciretã
TMG 7161 RR Inox	5.4	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Tupanciretã, Água Santa, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
TEC 5936 Ipro	5.5	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos, Cachoeirinha, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Santa Vitória do Palmar, Santa Vitória do Palmar
BMX EnergiaRR	5.5	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
Pionner 95R51 RR	5.5	Indeterminate	Água Santa
Fundacep 65 RR	5.9	Semi-Determinate	Cachoeirinha, Uruguaiiana
BMX TurboRR	6.0	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen
NS 6262 RR	6.2	Indeterminate	Restinga Sêca
NA 5909 RG	6.3	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
TecIrga 6070 RR	6.3	Indeterminate	Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Palmares do Sul
IAS 5	6.4	Semi-Determinate	Santa Maria, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
A 6411 RG	6.4	Semi-Determinate	Santa Maria, Cachoeirinha, Uruguaiiana
IgraRA 518 RR	6.6	Semi-Determinate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
BMX PotênciaRR	6.7	Indeterminate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
BMX Valente RR	6.7	Indeterminate	Cachoeirinha, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Santa Vitória do Palmar
Fepagro 36 RR	7.2	Semi-Determinate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos, Palmares do Sul
BRS 246 RR	7.2	Semi-Determinate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
BRAGG	7.3	Semi-Determinate	Santa Maria, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos
CD 219 RR	8.2	Semi-Determinate	Santa Maria, Restinga Sêca, Água Santa, Pelotas, Frederico Westphalen, Júlio de Castilhos, Cachoeirinha, Uruguaiiana, Cachoeira do Sul, Santa Vitória do Palmar

Table 3 – Summary of meteorological variables for each sowing date at each location of experiments with soybean in Rio Grande do Sul State, Brazil. SD – MD =sowing date to maturity date (SD – MD in bold are for the cultivar grown in the farm), Rad=incoming solar radiation, T mean=average daily mean temperature, Tmax=absolute maximum temperature, Tmin=absolute minimum temperature, Precip=precipitation.

Location	SD - MD	Rad (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T mean (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Precip (mm)
Santa Maria	12/10/10 - 04/30/11	20.6	22.6	36.3	7.0	841
	01/08/11 - 05/21/11	17.4	22.2	36.2	6.7	576
	09/24/11 - 04/02/12	21.8	23.3	38.7	6.4	634
	11/19/11 - 04/07/12	22.1	24.5	38.7	6.4	457
	01/28/12 - 05/30/12	16.9	22.0	38.3	4.4	569
	09/22/12 - 04/01/13	20.1	22.7	38.6	3.7	1144
	11/03/12 - 04/19/13	20.4	23.1	38.6	6.8	1027
	12/01/12 - 05/03/13	19.1	22.8	38.6	6.8	970
	02/06/13 - 07/12/13	12.9	18.7	33.3	1.2	694
	09/27/13 - 03/29/14	20.8	23.7	40.0	7.4	978
	11/15/13 - 04/09/14	21.0	25.0	40.0	7.4	725
	02/19/14 - 07/15/14	11.7	18.5	34.7	-0.6	1036
	11/15/14 - 04/15/15	20.3	23.8	36.8	10.8	854
Restinga Sêca	11/14/13 - 04/04/14	21.3	24.9	40.0	7.4	699
	11/20/14 - 03/15/14	22.3	25.5	40.0	13.5	441
	11/13/14 - 03/15/15	21.2	24.2	36.8	10.8	682
Tupanciretã	11/17/13 - 04/07/14	22.1	24.0	37.5	8.5	526
	11/13/14 - 03/13/15	22.6	22.9	36.8	9.3	473
Júlio de Castilhos	11/18/13 - 04/15/14	21.7	23.8	37.5	6.5	597
	11/18/13 - 04/26/14	21.0	22.4	35.9	6.1	772
Água Santa	11/20/13 - 04/01/14	22.1	23.0	35.9	6.5	641
	12/03/13 - 04/30/14	20.8	22.3	35.9	6.1	817
	11/08/14 - 03/08/15	22.8	21.7	34.5	9.5	844
Frederico Westphalen	11/23/13 - 04/16/14	20.2	23.1	36.7	8.0	1182
Pelotas	11/09/12 - 04/25/13	20.0	22.7	39.7	8.7	630
	10/04/14 - 03/24/15	20.6	24.2	37.7	11.4	802
Cachoeirinha	11/19/14 - 04/06/15	20.3	24.7	37.5	12.6	571
	12/12/14 - 04/12/15	19.5	24.5	37.5	12.2	498
	10/09/14 - 03/31/15	20.6	23.8	37.1	12.4	768
Cachoeira do Sul	11/07/14 - 03/31/15	21.4	24.2	36.6	12.4	585
	12/05/14 - 04/17/15	20.0	24.1	36.6	13.2	552
Palmares do Sul	11/11/14 - 04/16/15	21.0	24.2	40.1	16.3	532
	10/28/14 - 04/20/15	18.2	22.3	34.4	10.3	474
Santa Vitória do Palmar	11/17/14 - 04/20/15	18.2	22.6	34.4	10.9	400
	12/15/14 - 05/15/15	16.7	22.4	34.4	9.7	392
Uruguaiiana	10/16/14 - 04/06/15	22.9	24.4	36.8	9.2	1006
	11/06/14 - 04/13/15	23.0	24.4	35.8	9.2	951
	12/23/14 - 04/22/15	21.4	24.4	35.8	9.2	642

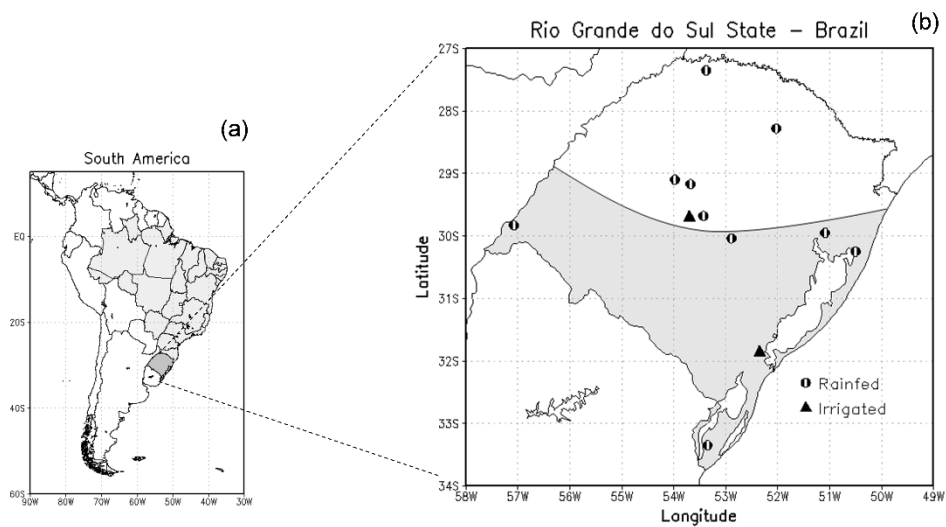


Figure 1 – Maps of South America (a) and the State of Rio Grande do Sul (b) with the locations of the field experiments (b). The northern half of the State is where soybean is grown in highlands and the southern half (gray area) of the State is where soybean is grown in lowlands.

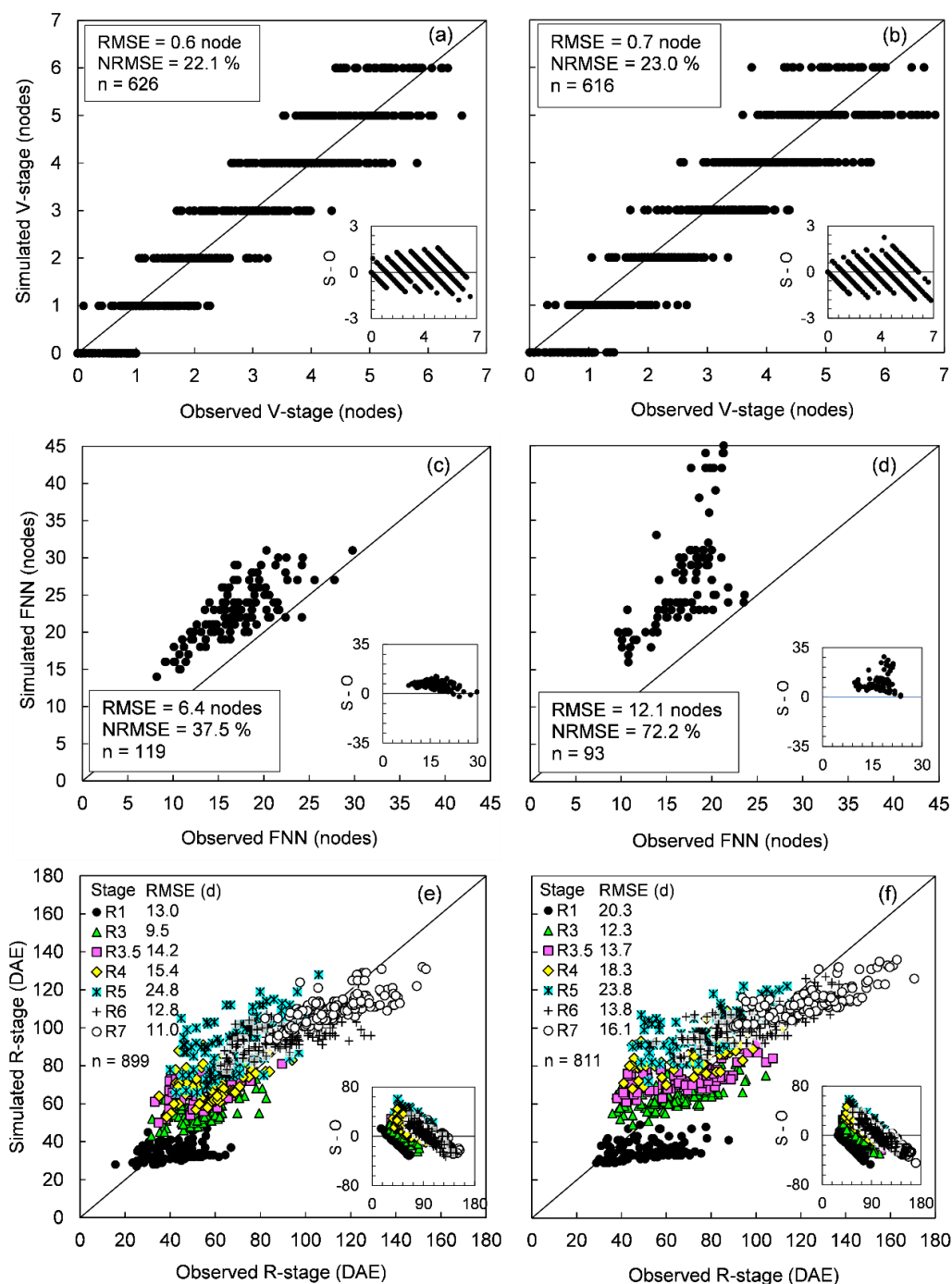


Figure 2 – Observed and simulated V-stages (a, b), final node number (FNN; c, d) and R-stages (e, f) with the SoySim model for indeterminate (left hand panels) and semi-determinate (right hand panels) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates, maturity groups and 13 locations are pooled. The solid line is the 1:1 line. Shown in the insets are plots of residuals (simulated – observed) versus observed V-1stage, FNN and R-stage, respectively.

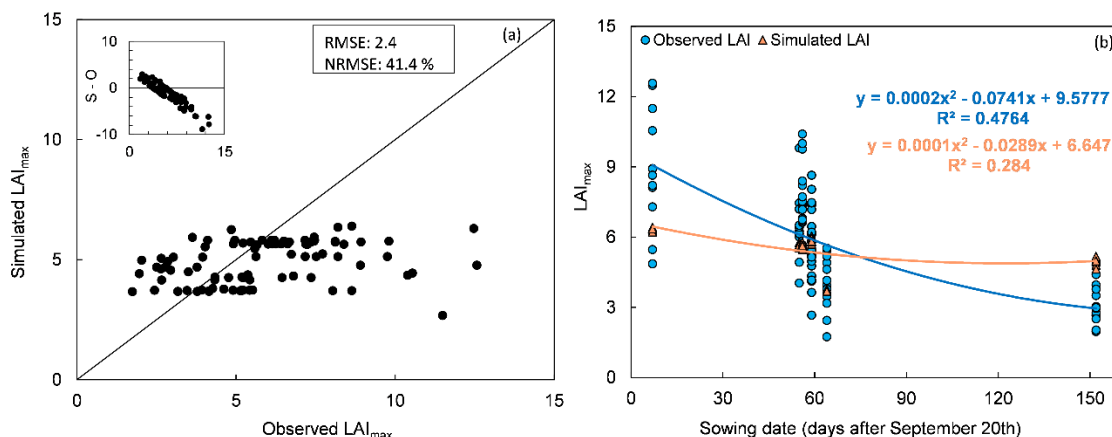


Figure 3 – Observed and simulated maximum leaf area index (LAI_{max}) with the SoySim model (a) and as a function of sowing date (b) for the experiments with soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Data from two growing seasons (from 2013/2014 to 2014/2015) nine sowing dates, 14 maturity groups and 6 locations are pooled. Shown in the insets of panel (a) is the plot of residuals (simulated – observed) versus observed LAI.

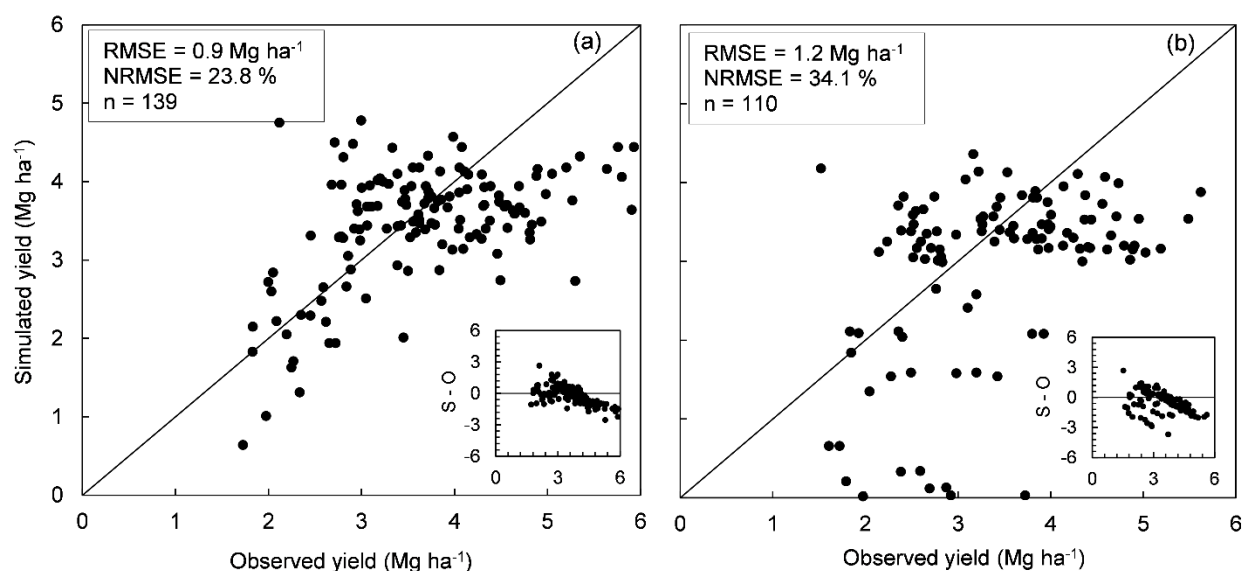


Figure 4 – Observed and simulated seed yield with the SoySim model for indeterminate (a) and semi-determinate (b) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015) sowing dates, maturity groups and 12 locations are pooled. The solid line is the 1:1 line. Shown in the insets are plots of residuals (simulated – observed) versus observed yield.

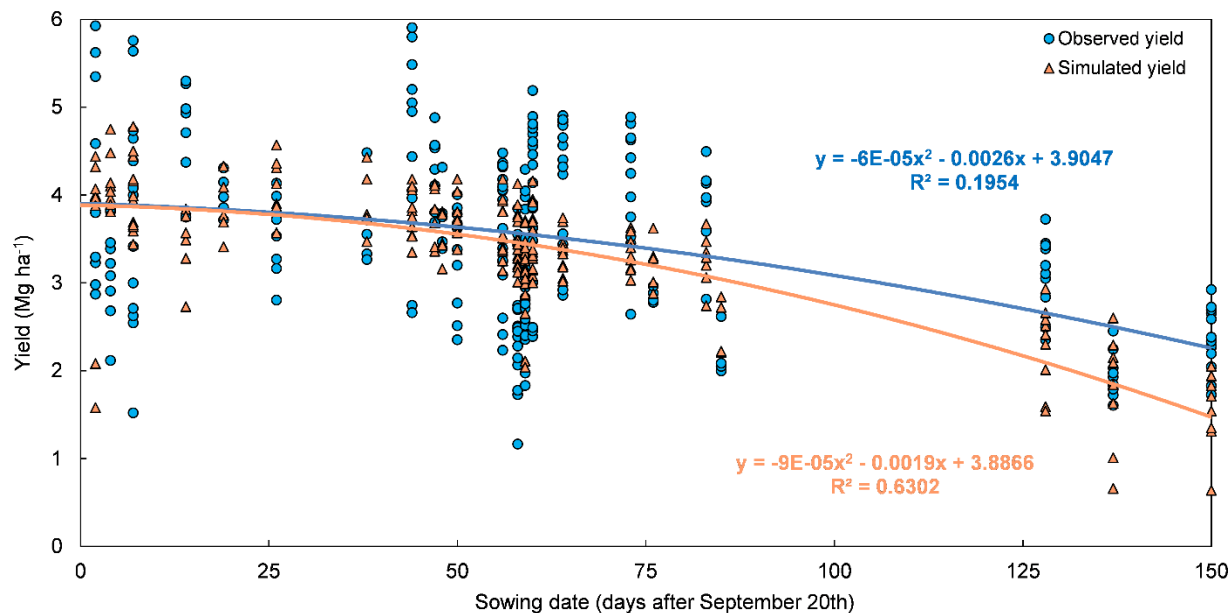


Figure 5 – Observed and simulated seed yield with the SoySim model as function of sowing date for the experiments with soybean in Rio Grande do Sul State, Brazil. Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates, maturity groups and locations are pooled.

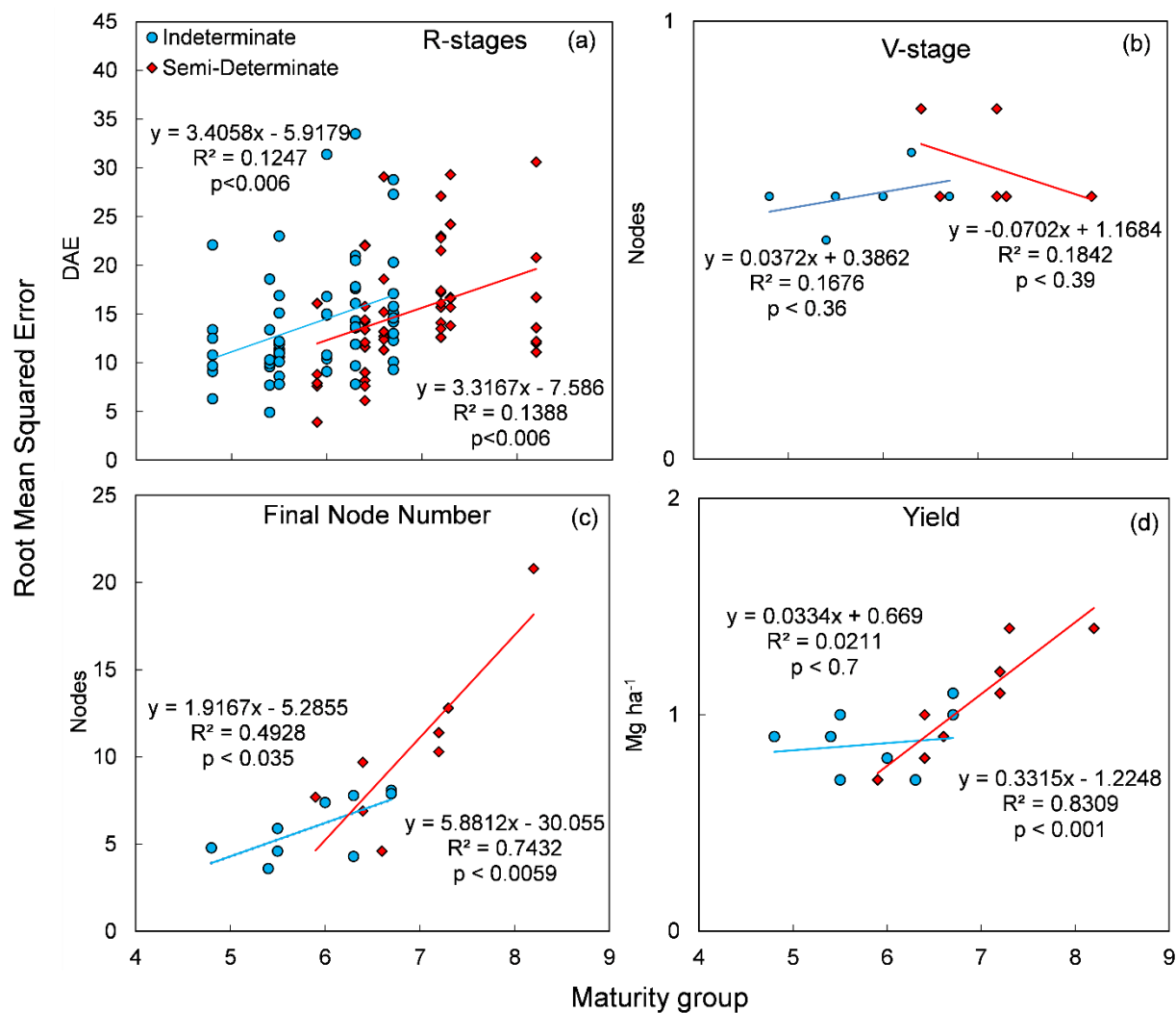


Figure 6 – Root mean squared error of observed and simulated values as a function of maturity group for the R-stages (a), V-stage (b), final node number (c), and yield (d) for indeterminate (blue circles) and semi-determinate (red diamonds) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil.

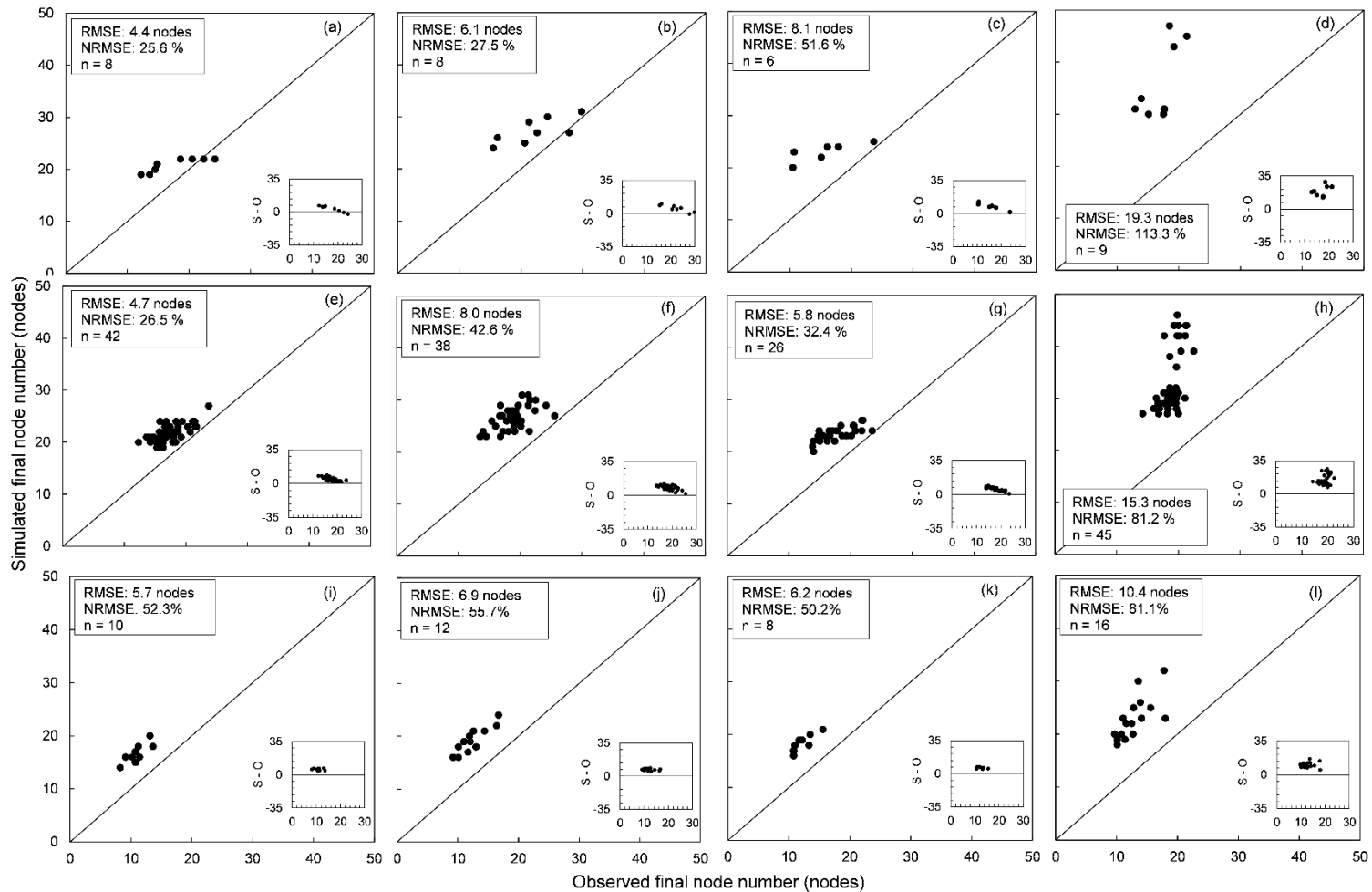


Figure 7 – Observed and simulated final node number on the main stem with the SoySim model for indeterminate (G1 and G2) and semi-determinate (G3 and G4) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Early sowing dates (September and October) (a, b, c, d), intermediate (November and December) sowing dates (e, f, g, h) and late (January and February) sowing dates (i, j, k, l). Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates, and locations are pooled. G1: indeterminate cultivars with maturity group from 4.8 to 5.5, G2: indeterminate cultivars with maturity group from 6.0 to 6.7, G3: semi-determinate cultivars with maturity group from 5.9 to 6.6, G4: semi-determinate cultivars with maturity group from 7.2 to 8.2. The solid line is the 1:1 line. Shown in the insets are plots of residuals (simulated – observed) versus observed FNN.

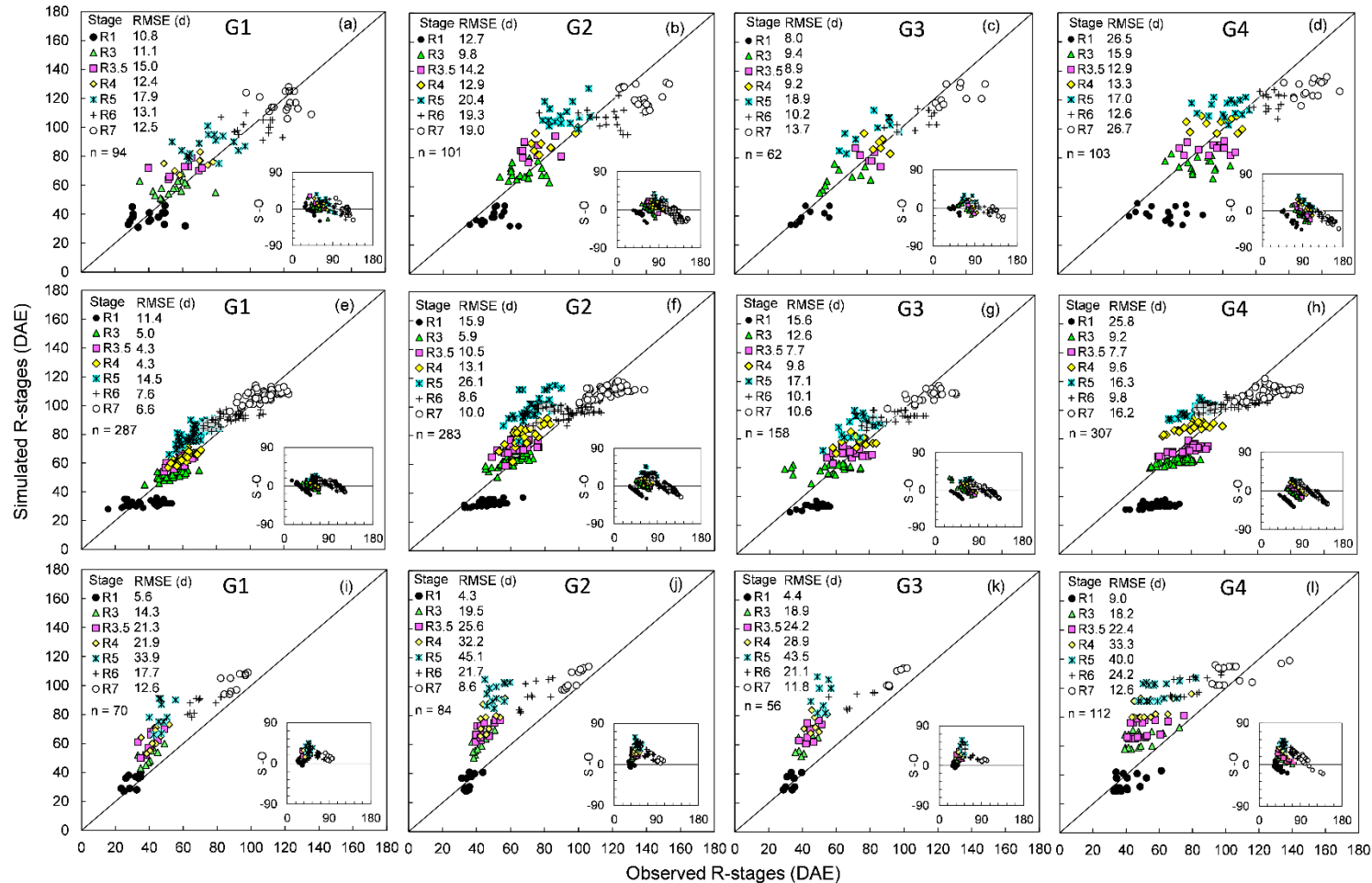


Figure 8 – Observed and simulated R-stages with the SoySim model for indeterminate (G1 and G2) and semi-determinate (G3 and G4) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Early sowing dates (September and October) (a, b, c, d), intermediate (November and December) sowing dates (e, f, g, h) and late (January and February) sowing dates (i, j, k, l). Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates, and locations are pooled. G1: indeterminate cultivars with maturity group from 4.8 to 5.5, G2: indeterminate cultivars with maturity group from 6.0 to 6.7, G3: semi-determinate cultivars with maturity group from 5.9 to 6.6, G4: semi-determinate cultivars with maturity group from 7.2 to 8.2. The solid line is the 1:1 line. Shown in the insets are plots of residuals (simulated – observed) versus observed phenology.

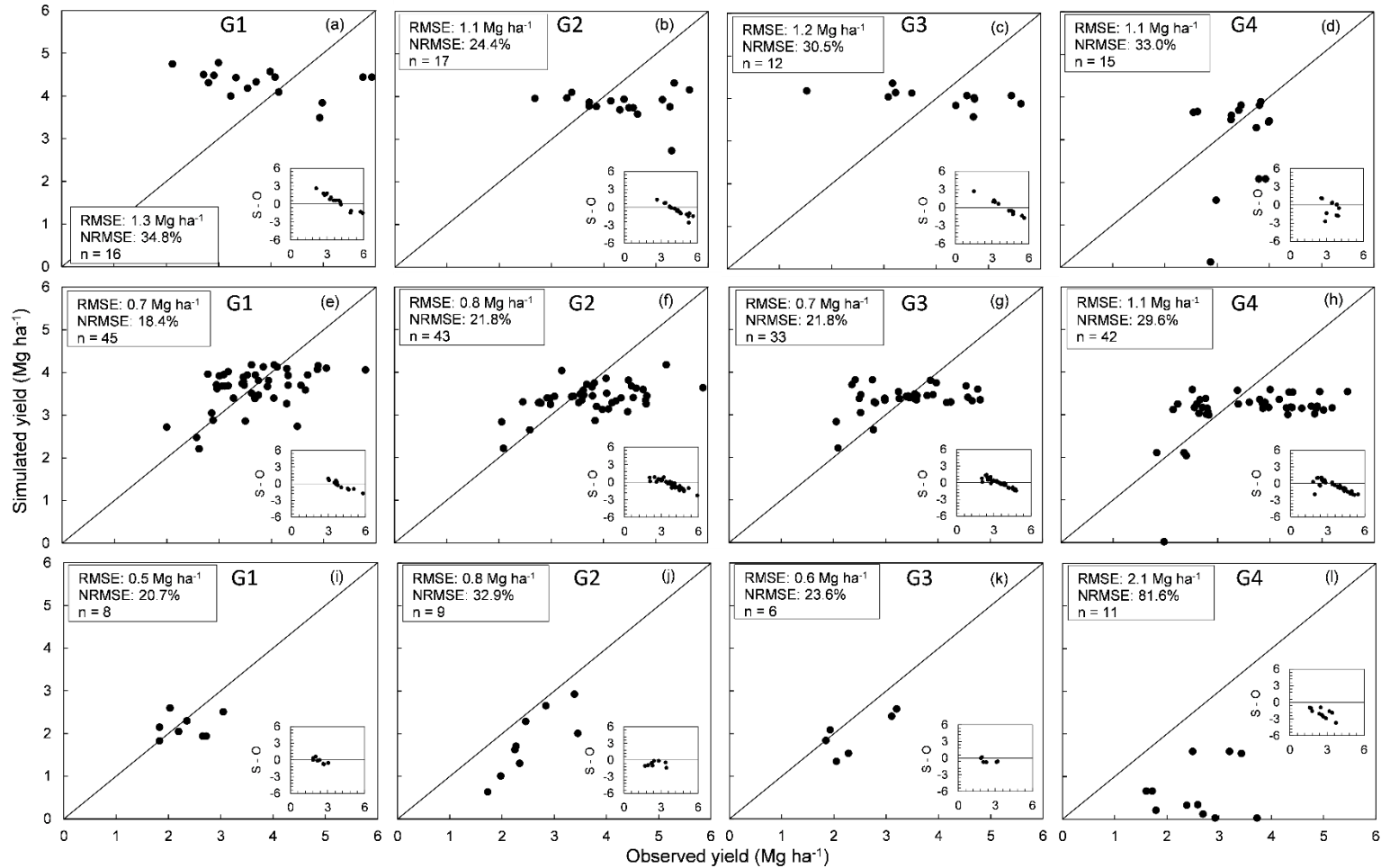


Figure 9 – Observed and simulated seed yield with the SoySim model for indeterminate (G1 and G2) and semi-determinate (G3 and G4) soybean cultivars grown in experiments in Rio Grande do Sul State, Brazil. Early sowing dates (September and October) (a, b, c, d), intermediate (November and December) sowing dates (e, f, g, h) and late (January and February) sowing dates (i, j, k, l). Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates, and locations are pooled. G1: indeterminate cultivars with maturity group from 4.8 to 5.5, G2: indeterminate cultivars with maturity group from 6.0 to 6.7, G3: semi-determinate cultivars with maturity group from 5.9 to 6.6, G4: semi-determinate cultivars with maturity group from 7.2 to 8.2. The solid line is the 1:1 line. Shown in the insets are plots of residuals (simulated – observed) versus observed yield.

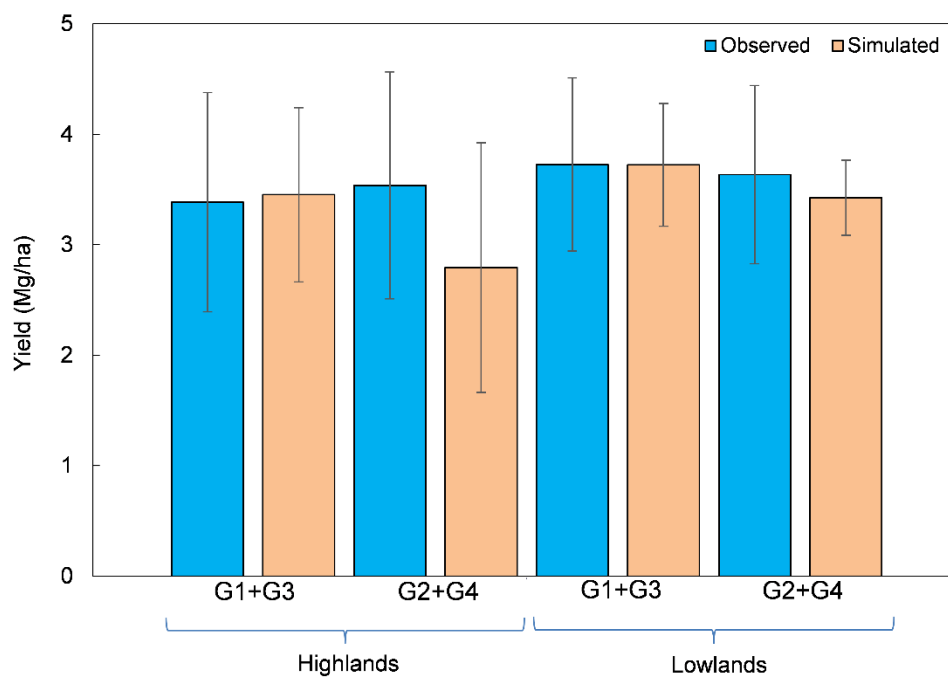


Figure 10 – Observed and simulated average yield with the SoySim model for soybean grown in highlands and lowlands of Rio Grande do Sul State, Brazil. Data from different growing seasons (from 2010/2011 to 2014/2015), sowing dates (from September to November), maturity groups and locations are pooled. G1: indeterminate cultivars with maturity group from 4.8 to 5.5, G2: indeterminate cultivars with maturity group from 6.0 to 6.7, G3: semi-determinate cultivars with maturity group from 5.9 to 6.6, G4: semi-determinate cultivars with maturity group from 7.2 to 8.2. Error bars are one standard deviation of the mean.

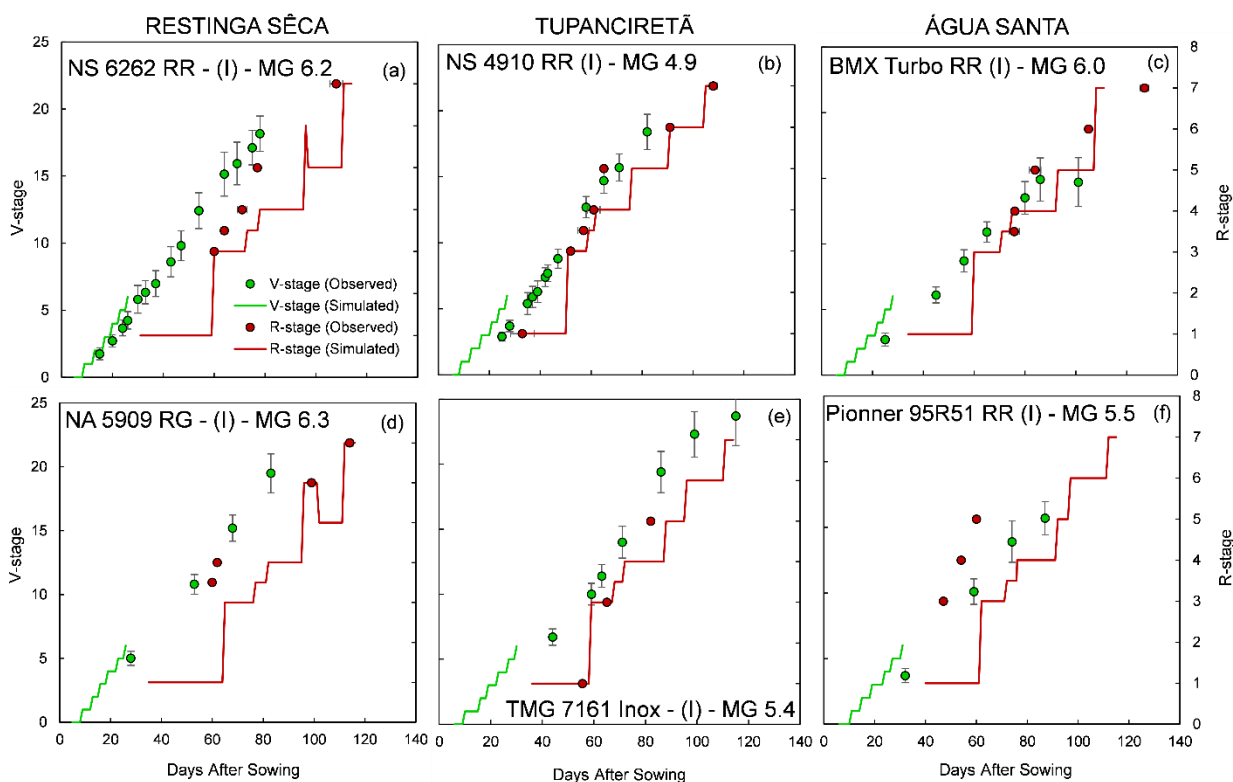


Figure 11 – Observed and simulated V-stages and R-stages with the SoySim model for six soybean cultivars grown in three farms in Rio Grande do Sul State, Brazil: Restinga Sêca (a,d), Tupanciretã (b,e) and Água Santa (c,f). Data are from two growing seasons (2013/2014 (a,b,c) and 2014/2015 (d,e,f)). Error bars are one standard deviation of the observed mean.

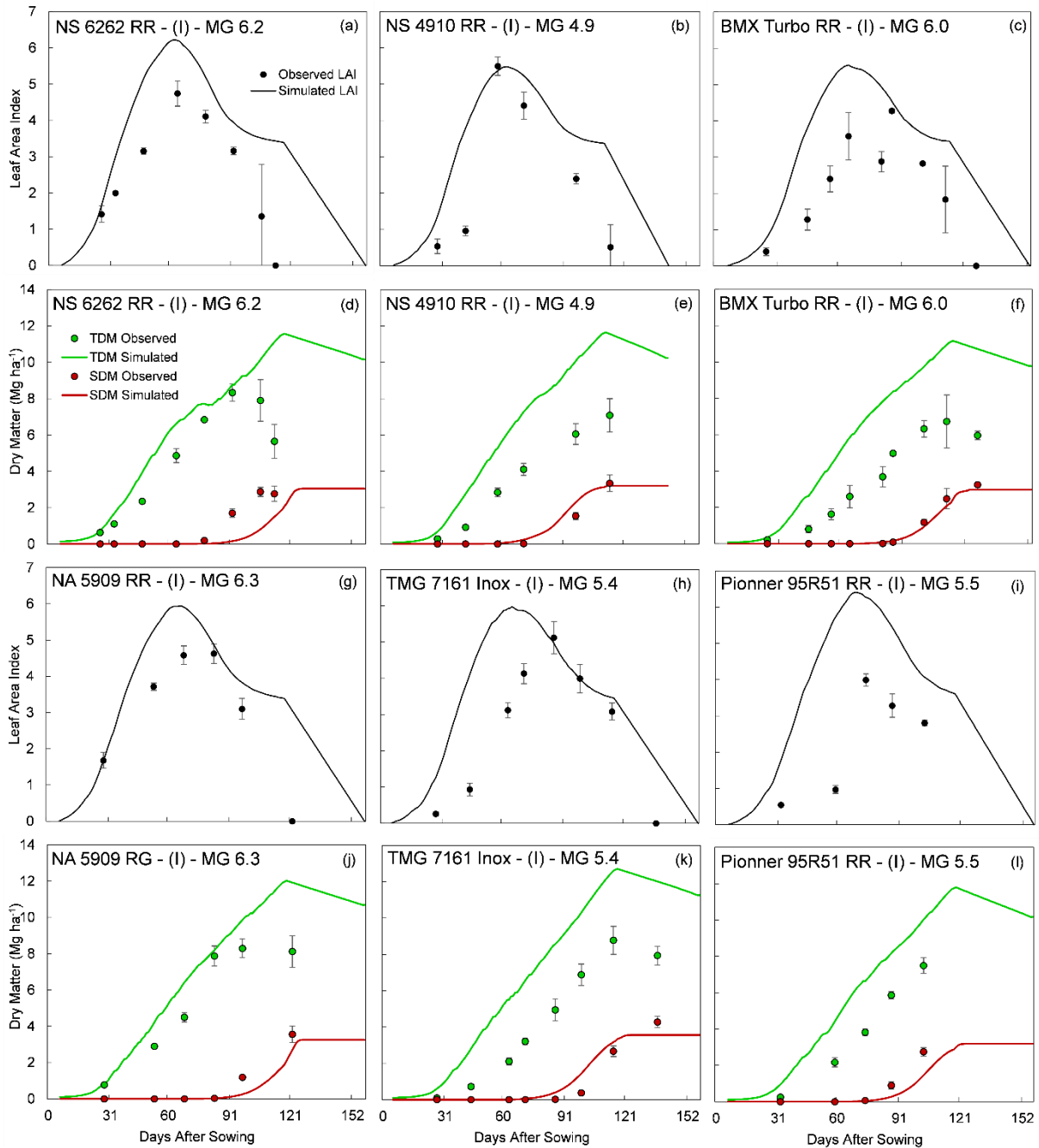


Figure 12 – Observed and simulated leaf area index (LAI), above ground dry matter (TDM) and seed dry matter (SDM) with the SoySim model for six soybean cultivars grown in three farms in Rio Grande do Sul State, Brazil: Restinga Sêca (a,d,g,j), Tupanciretã (b,e,h,k) and Água Santa (c,f,i,l). Data from two growing seasons (2013/2014 (a,b,c,d,e,f) and 2014/2015 (g,h,i,j,k,l)). Error bars are one standard deviation of the observed mean.

6 ARTIGO 2**PRODUTIVIDADE DE SOJA NO RIO GRANDE DO SUL SIMULADA PARA DOIS
CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS DO PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

(Artigo submetido à Pesquisa Agropecuária Brasileira)

Produtividade de soja no Rio Grande do Sul simulada para dois cenários climáticos futuros do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade da cultura da soja utilizando dois cenários climáticos futuros do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), o SRES A1B e RCP4.5 forçando os modelos agrícolas SoySim e CROPGRO-Soybean, a fim de verificar os possíveis impactos das mudanças no clima na produtividade de soja no Rio Grande do Sul. Os modelos SoySim e CROPGRO-Soybean foram usados considerando-se três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0) e quatro datas de semeadura (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01) para três horizontes de projeções climáticas (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099). A tendência encontrada foi de aumento na produtividade de até 2 Mg ha⁻¹, principalmente para o final do século XXI nos dois cenários para os modelos SoySim e CROPGRO-Soybean.

Termos para indexação: Modelo SoySim, Modelo CROPGRO-Soybean, SRES A1B, RCP4.5.

Abstract – The objective was to estimate the soybean yield using two climate projections of emission scenarios SRES A1B and RCP4.5 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) forcing the crop models SoySim and CROPGRO-Soybean, to verify the possible climate changes impacts on soybean yield in Rio Grande do Sul State. The SoySim and CROPGRO-Soybean models were used considering three maturity groups (4.8, 5.5 and 6.0) and four sowing dates (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01) for three horizons of climate projections (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099). The trend found was an increase on yield until 2 Mg ha⁻¹, mainly at the end of the XXI century in the two climate scenarios and for the crop models SoySim and CROPGRO-Soybean.

Index Terms: SoySim model, CROPGRO-Soybean model, SRES A1B, RCP4.5.

Introdução

Segundo o IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change na sigla, em inglês), a influência humana no sistema climático é real e as recentes emissões de gases de efeito estufa são as mais altas da história, o que tem afetado a vida humana e os recursos naturais. Para o IPCC, mudança climática refere-se a

qualquer mudança no clima ao longo do tempo, que pode ser devido à variabilidade natural ou como resultado da atividade humana (IPCC, 2007). O quarto relatório do IPCC (AR4) indica que a temperatura e a concentração de dióxido de carbono ($[CO_2]$) na atmosfera continuarão aumentando se as emissões de poluentes (queimas de combustíveis fósseis) na atmosfera não diminuir e, em consequência disso, as ocorrências de estiagens, bem como enxurradas, poderão tornar-se mais comuns e severas em determinadas regiões do globo (IPCC, 2007). Segundo Hansen et al. (2012) as anomalias da temperatura média sazonal de todo o globo aumentaram no período de 1981-2010 em relação ao período base (1951-1980), principalmente no verão, assim como a abrangência dessas anomalias. O quinto relatório do IPCC (AR5) indicou que a temperatura média global aumentou $0,85^{\circ}C$ de 1880 até 2012 e as projeções para o clima futuro também são de aumento de eventos extremos, como ondas de calor, precipitação extrema e inundações nas regiões costeiras. A combinação de altas temperaturas e umidade comprometerá algumas atividades humanas, como o cultivo de alimentos em algumas áreas durante certas épocas do ano. Alguns ecossistemas podem estar em risco de mudanças abruptas ou irreversíveis (recife de corais e ecossistemas do Ártico) (IPCC, 2013).

A agricultura é vulnerável às mudanças no clima e a resposta de cada cultura à mudança climática depende de interações complexas que incluem solo, cultivar e manejo adotado pelos agricultores. Ruane et al. (2014) usaram dados AR4 e AR5 (CMIP3 e CMIP5 – Terceiro e quinto Projeto de Intercomparação de Modelos Globais (Coupled Model Intercomparison Project, na sigla em Inglês)) para estudar os impactos das mudanças do clima na produção de amendoim (irrigado e não irrigado) no estado do Alabama (EUA), e encontraram uma diminuição na produtividade na metade do século XXI (2040-2069) e um aceleramento nas perdas para o final do século (2070-2099). Outro estudo com milho na região dos Grandes Lagos (EUA) indica que na parte norte dessa região a produtividade aumentou e na parte sul diminuiu, por causa do aumento da temperatura no cenário climático futuro de 2050 a 2059 (Southworth et al., 2000). Em um estudo com cana-de-açúcar no Brasil, Marin et al. (2013) encontraram um aumento na produtividade da cultura para o período de 2050 a 2100, em que usaram dois cenários do AR4 (SRES A2 e B2). Um estudo com sorgo combinando 52 datas de semeadura durante o período atual (1982-1999) e futuro (2047-2064) mostrou um aumento na produtividade em alguns locais, e que o atraso na data de semeadura proporcionaria produtividades maiores, indicando assim um atraso no período recomendado para semear sorgo em Janaúba e Sete Lagoas, Minas Gerais (Grossi et al., 2013).

A soja é a principal *commodity* agrícola mundial, sendo os Estados Unidos, Brasil e Argentina os principais produtores, detendo 78% da produção mundial do grão (FAOSTAT, 2016). O Brasil, segundo colocado nesta lista, aumentou sua produção de 75 para 96 milhões de toneladas do ano agrícola de 2010/2011 para 2014/2015. Entre os estados brasileiros, o Rio Grande do Sul está em terceiro lugar na produção com quase 15 milhões de toneladas colhidas na última safra (2014/2015), com produtividade média de 2,8 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2016).

As variações na temperatura do ar, na [CO₂] e na precipitação afetam diretamente a produtividade da soja. Heinemann et al. (2006) em experimento com câmaras de ambiente controlado (três diferentes temperaturas e dois regimes de [CO₂]), encontraram que a produtividade de soja aumentou com a temperatura e a [CO₂], porém a taxa de aumento da produtividade ficou mais lenta conforme o aumento da temperatura do ar. Resultados similares foram encontrados quando a [CO₂] dobrou e a produtividade de soja aumentou em 50%. Mas quando a temperatura do ar aumentou por 3°C, o efeito positivo do aumento da [CO₂] foi quase compensado e o efeito combinado final entre aumento da [CO₂] e da temperatura resultou em um acréscimo de 36% na produtividade de soja (Lal et al., 1999). Ferreira e Rao (2011) analisaram o efeito da temperatura e precipitação na produtividade de soja para a região Sul do Brasil no período de 1969 a 2002 e encontraram que a produtividade é mais sensível à temperatura durante o verão e pela chuva no início da semeadura e enchimento dos grãos. Em uma análise para todo o Brasil, Pinto et al. (2008) encontraram para o Rio Grande do Sul, que a área apta e produtora de soja aumentaria no cenário futuro, porém para as áreas inaptas (pelo zoneamento agrícola) e produtoras, o risco de perdas pelo aumento da deficiência hídrica e possível impacto dos veranicos mais intensos, acarretaria em perdas de até 40% em 2070.

A produtividade potencial de uma cultura agrícola é a produtividade alcançada quando as plantas crescem sem estresse de fatores bióticos (pragas, doenças e plantas daninhas) e abióticos (água e nutrientes), e neste caso a produtividade é determinada pela temperatura e pela radiação solar durante a estação de crescimento (Evans & Fischer, 1999). Em condições de campo, a produtividade real é menor que a potencial, pois fatores bióticos e abióticos penalizam a produtividade potencial (Van Ittersum et al., 2013). O futuro da produção de alimentos e a segurança alimentar global dependerá da capacidade dos agricultores em reduzir a lacuna entre a produtividade real e a potencial, especialmente porque a produtividade potencial pode diminuir por causa das alterações climáticas (Lobell et al., 2009).

Estudos sobre o efeito de alterações no clima sobre os cultivos agrícolas podem ser realizados através de experimentos em ambiente controlado ou em condições de campo (Wang et al., 2012, Locke et al., 2013, Cruz, et al., 2014, Bishop, et al., 2015) ou utilizando modelos agrícolas (Weiss et al., 2003; Streck & Alberto, 2006; Walter et al., 2010). Diversos modelos agrícolas já foram usados para simular o efeito das mudanças no clima sobre os cultivos agrícolas. No caso da soja, o modelo CROPGRO-Soybean é o mais utilizado para este tipo de estudo (Lal et al., 1999; Carbone et al., 2003; Mall, et al., 2004). No entanto, o modelo SoySim é um modelo mais recente e que apresenta vantagens em relação ao modelo CROPGRO-Soybean, como por exemplo requerer menos informações referentes à cultura (menor número de coeficientes genético-específicos) para ser rodado sem perder capacidade preditiva (Setiyono et al., 2010). A atual versão do modelo SoySim simula a produtividade potencial da soja e tem sido usada em estudos de lacunas de produtividade (ou *yield gap*) (Grassini et al., 2015). No entanto, não foram encontrados na literatura trabalhos usando o modelo SoySim forçado por cenários climáticos futuros.

Estudos do impacto de cenários climáticos futuros sobre a soja no Brasil e no Rio Grande do Sul já foram realizados (Siqueira et al., 1994, Siqueira et al., 2000, Streck & Alberto, 2006; Justino, et al., 2013; Rio et al., 2015). Siqueira et al. (1994; 2000) realizaram dois trabalhos com o modelo agrícola SOYGRO com dados de cenários climáticos futuros distintos e encontraram que a produção nacional de soja aumentaria, principalmente devido ao efeito benéfico do aumento da [CO₂] atmosférico. Outro estudo utilizou dados meteorológicos sintéticos com o dobro da [CO₂] e aumento na temperatura de 2, 3 e 6°C, com uma data de semeadura e uma cultivar para a região de Santa Maria (RS, Brasil), onde encontraram um aumento na produtividade de soja na projeção de 100 anos. Entretanto, o efeito benéfico do aumento da [CO₂] na produtividade foi quase anulado no cenário de aumento de 6°C na temperatura (Streck & Alberto, 2006). Já Justino et al. (2013) utilizaram o modelo CROPGRO-Soybean e dois cenários do CMIP3 (SRES A1 e B2) para simular a produtividade de soja no Pará e Mato Grosso (uma cultivar e duas datas de semeadura) e encontraram que a produtividade de soja aumentaria em 60% em uma condição de ótimos solos e sem deficiência hídrica. Outro trabalho utilizando o modelo CROPGRO-Soybean e dois cenários do CMIP3 (SRES A1 e B2, sem considerar o aumento da [CO₂]) para os três estados do sul do Brasil com quatro cultivares de soja e quatro períodos de semeadura (01-10/10, 11-20/10, 21/10-10/11, 11-20/11 e 21-30/11) indicou que o aumento na temperatura diminuiria a produtividade potencial de soja e limitada por água em um cenário futuro (Rio et al., 2015). Estudos com essa

abordagem merecem ser estendidos a outros modelos agrícolas e cenários climáticos futuros do CMIP3 e CMIP5, bem como para cultivares de soja mais usadas pelos agricultores no Rio Grande do Sul considerando o efeito de fertilização de CO₂. Com isso, o objetivo deste trabalho foi estimar a produtividade potencial e com limitação por água da cultura da soja no Rio Grande do Sul em dois cenários climáticos futuros, SRES A1B do AR4 e RCP4.5 do AR5, com os modelos agrícolas SoySim e CROPGRO-Soybean.

Material e Métodos

Foram utilizados dois modelos agrícolas baseados em processos (*process-based models*): o modelo SoySim (Setiyono et al., 2010) na condição potencial e o modelo CROPGRO-Soybean (Boote et al., 1998) na condição potencial e com limitação por água. O modelo SoySim foi desenvolvido e calibrado nos EUA e testado no Rio Grande do Sul (artigo 1 desta tese), onde verificou-se que os melhores resultados foram obtidos para cultivares de grupo de maturidade (GM) até 6.0. O modelo SoySim é de fácil utilização, pois requer apenas dois parâmetros relacionados à cultivar de soja: grupo de maturação (de 0.0 até 8.0) e tipo de crescimento da cultivar (indeterminado e semi-determinado), além dos dados meteorológicos diários (radiação solar, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, precipitação e evapotranspiração). O modelo CROPGRO-Soybean também se baseia nas interações entre as variáveis meteorológicas (temperatura máxima, mínima, radiação solar e precipitação a nível diário) e as condições ambientais para simular o crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja (Boote et al., 2002; Ruíz-Nogueira et al., 2001). Entretanto, diferente do modelo SoySim, o modelo CROPGRO-Soybean necessita de uma maior quantidade de parâmetros iniciais para representar adequadamente determinada cultivar. Esses parâmetros específicos são de difícil determinação e não estão facilmente disponíveis, mesmo com as empresas que desenvolveram as cultivares de soja.

Três cultivares de soja foram usadas neste estudo: ‘NS 4823 RR’ (GM=4.8), ‘BMX Energia RR’ (GM=5.5) e ‘BMX Turbo RR’ (GM=6.0). Estas cultivares foram selecionadas por serem cultivares de tipo de crescimento indeterminado, transgênicas e por estes GM serem empregados em torno de 50% da área cultivada com soja no Rio Grande do Sul nos últimos 5 anos. Para rodar o SoySim para essas cultivares foi usado o modo “Generic” do modelo, em que o GM é informado pelo usuário. Para o CROPGRO-Soybean, calibração e validação dos parâmetros genético-

específicos para as três cultivares de soja foram obtidos a partir de dados de crescimento (área foliar máxima, taxa fotossintética máxima e área foliar específica), desenvolvimento (número de nós e data de emergência e dos estágios reprodutivos R1, R3, R5, R7) e componentes de produtividade (número de grãos por m² e peso médio de um grão) coletados em experimentos de campo conduzidos durante 4 anos agrícolas (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014) no Rio Grande do Sul utilizando um método de validação cruzada (Baigorria et al., 2010).

Cenários Climáticos Futuros

Neste estudo foram usados dois cenários de clima futuro para o Rio Grande do Sul: SRES A1B (SRES-Special Report on Emissions Scenarios) do AR4 (CMIP3) e RCP4.5 (RCP-Representative Concentration Pathway) do AR5 (CMIP5).

O cenário SRES A1B é um cenário que assume um equilíbrio entre as fontes energéticas no futuro, com um pico das emissões de gases de efeito estufa até a metade do século XXI (IPCC, 2007) e descreve um cenário econômico com crescimento rápido, população global atingindo um pico em meados do século, declinando em seguida, e uma rápida inserção de novas e eficientes tecnologias, com a [CO₂] chegando a 717 ppm no final do século XXI (Figura 1F) e a temperatura média da superfície do planeta ficando entre 1,7 e 4,4°C mais elevada em 2100 comparada ao clima presente, ou seja, um cenário do tipo “*business as usual*”. Estes dados foram gerados pelo modelo acoplado Oceano-Atmosfera ECHAM5/MPI-OM, com resolução espacial de 250 km (Roekner, 2005). Estes dados em escala global foram regionalizados para o Rio Grande do Sul por *downscaling* dinâmico (Hostetler et al, 2011) realizado pelo RegCM3 (Regional Climate Model versão 3, Pal et al., 2007) com grade de 100x100 km de latitude/longitude.

O cenário RCP4.5 do AR5 é também um cenário intermediário de emissão, porém mais fraco que o SRES A1B, com a [CO₂] chegando a 538 ppm em 2100 (Figura 1F) e com a temperatura média da superfície do planeta ficando entre 1,1 e 2,6°C mais quente no final do século XXI comparada ao clima presente. Este cenário projeta emissões anuais de gases de efeito estufa (medidos em CO₂-equivalente) com um pico em torno de 2040, e diminuindo posteriormente (IPCC, 2013). Os dados foram gerados pelo modelo global oceano-atmosfera HadGEM-ES (Jones, et al., 2011), com resolução espacial de 250 km e serviram como condição de contorno para o RegCM4 (Regional Climate Model versão 4), utilizado para reduzir a escala para 100 km de resolução. Mais informações sobre os cenários climáticos futuros estão no Apêndice B.

Estes cenários são intermediários aos cenários pessimistas e otimistas dos dois relatórios do IPCC (família A e família B do AR4 e RCP2.6 e RCP8.5 do AR5), mas descrevem um forçamento radiativo diferente ao longo do século XXI. Estes cenários também foram usados anteriormente como representantes do CMIP3 e CMIP5 em estudos sobre a diminuição da extensão do gelo polar ártico (Stroeve et al., 2012). Os dados meteorológicos do cenário SRES A1B (CMIP3) (Figura 1A) e do cenário RCP4.5 (CMIP5) utilizados no estudo incluíram temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar global incidente, umidade relativa do ar, precipitação e evapotranspiração, além da concentração anual de CO₂ no período de 1980-2099. Na figura 1A, B, C, D tem-se a comparação de algumas variáveis para cinco pontos específicos (latitude/longitude: -28°S -53°W, -30°S -56°W, -29°S -53°W, -30°S -50°W, -33°S -53°W) no Estado do Rio Grande do Sul, onde observa-se que a temperatura máxima e mínima apresentam diferença mais expressiva no final do período e a temperatura máxima é mais elevada no cenário CMIP3. A precipitação também é mais elevada no cenário CMIP3 e a radiação solar, conseqüentemente, é mais elevada no cenário CMIP5, por este ser um cenário mais seco.

A série temporal foi dividida em quatro intervalos de 30 anos (Ruane et al., 2014): baseline ou clima presente (1980-2009) e três períodos futuros (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099). A série de dados meteorológicos correspondem a 37 pontos de grade do RegCM distribuídos por todo o Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1E).

Modelos Agrícolas

O modelo SoySim, que calcula a produtividade potencial de soja, foi rodado nos cenários SRES A1B e RCP4.5 para as três cultivares e quatro datas de semeadura (01/10, 01/11, 01/12, 01/01) e o modelo CROPGRO-Soybean foi rodado na condição potencial e na condição com o estresse hídrico ativado (produtividade limitada por água) somente no cenário SRES A1B. As informações de solo necessárias para rodar o CROPGRO-Soybean foram retiradas de análises físicas do solo em alguns locais no Rio Grande do Sul (medidas a 10-20 centímetros de profundidade) e informações sobre a profundidade das camadas de solo foram obtidas de um levantamento do Projeto RADAMBrasil (<http://docslide.com.br/download/link/projeto-radambrasil-v33>). A variável analisada foi a produtividade de grãos a 13 % de umidade (Mg ha⁻¹). Para analisar o desempenho dos dois modelos agrícolas em simular a produtividade de grãos, foi comparada a produtividade simulada pelo modelo SoySim e CROPGRO-Soybean com dados

observados do IBGE, para as safras agrícolas de 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2012/2013 e 2013/2014. Os dados simulados são a média de produtividade de três GM (4.8, 5.5 e 6.0) e quatro datas de semeadura (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01).

A produtividade do período baseline (1980-2009) para os 37 pontos foi calculada fazendo-se a média das produtividades simuladas para os três GM (4.8, 5.5 e 6.0) para cada uma das quatro datas de semeadura (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01). Esta distribuição de GM e datas de semeadura representa o que os produtores de soja utilizam nas lavouras de soja do Rio Grande do Sul atualmente.

As produtividades anuais em cada um dos três períodos futuros foram apresentados na forma de anomalias (ou desvios), calculada pela diferença entre a produtividade de cada ano dos períodos futuros e a produtividade média do período baseline em cada ponto de grade (média dos três GM) para cada data de semeadura (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01). Com isso foram gerados mapas de anomalia de produtividade para cada data de semeadura nos três períodos futuros.

Resultados e Discussão

As três regiões com maior área cultivada com soja no estado do Rio Grande do Sul no ano agrícola 2013/2014 estão demarcadas na Figura 2A (1-região da campanha, 2-região de Tupanciretã e 3-região de Cachoeira do Sul) (IBGE, 2016). Na Figura 2B está demarcada a área de maior produtividade de soja no Estado do Rio Grande do Sul (média de cinco anos agrícolas - 2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2012/2013 e 2013/2014), com valores entre 2,5 e 3,5 Mg ha⁻¹ e localizada na região norte do Estado (área 4). A produtividade simulada pelo modelo SoySim (CMIP3) na área 4 variou de 2,5 a 3,5 Mg ha⁻¹ (Figura 2C), de 3 a 4 Mg ha⁻¹ para o modelo SoySim (CMIP5) (Figura 2D), de 2 a 3 Mg ha⁻¹ com o modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial (Figura 2E) e de 1 a 3 Mg ha⁻¹ com o modelo CROPGRO-Soybean com limitação por água, indicando que o modelo SoySim (CMIP3) superestima os valores observados com exceção de uma faixa no norte, próximo da divisa com Santa Catarina e do vale do Rio Uruguai, onde a produtividade simulada e observada é similar. Já produtividade simulada pelo SoySim (CMIP5) foi superestimada em toda a área 4 em até 1 Mg ha⁻¹. A produtividade simulada com o modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial é similar à produtividade observada na área 4 e a produtividade simulada pelo CROPGRO-Soybean na condição com limitação por água possui

pequenas regiões dentro da área 4 em que a produtividade simulada e observada são similares. Estes resultados indicam que as atuais produtividades de soja na parte norte/nordeste do Estado (área 4) são próximas do potencial, por ter solos mais profundos, manejo e nível tecnológico maior, ou seja, os agricultores desta região estão fazendo um excelente trabalho. Já no restante do Estado, os solos são menos profundos e/ou o nível tecnológico das lavouras é menor. Solos mais profundos armazenam mais água e as plantas sofrem menos com o estresse hídrico. Comparando-se a produtividade simulada entre os dois modelos, nas quatro condições (Figuras 2C, D, E, F), as produtividades simuladas com o CROPGRO-Soybean são menores do que com o SoySim. A hipótese para explicar esta diferença de produtividade simulada entre os dois modelos é que o CROPGRO-Soybean leva em conta o tipo de solo e a profundidade do solo disponível para crescimento radicular (Boote et al., 1998), de modo que, mesmo na condição sem limitação por água, solos menos profundos acarretam em menor crescimento radicular e/ou menor exploração de volume de solo, o que pode limitar a absorção de nutrientes e causar alguma penalização no crescimento da parte aérea e nos componentes de rendimento. O modelo SoySim não considera nenhuma influência do tipo de solo, sendo a produtividade potencial uma função da temperatura e da radiação solar (Setiyono et al., 2010).

Os mapas de produtividade potencial de soja no período baseline simuladas com o modelo SoySim (CMIP3-SRES A1B) indicam que as semeaduras de 01/10 e 01/11 são as de maior produtividade potencial, em torno de 2,5 a 4 Mg ha⁻¹ (Figura 3A, C) e conforme a semeadura atrasa, esse potencial diminui, ficando entre 2 e 3,5 Mg ha⁻¹, para semeaduras no início de janeiro (Figura 3G). As produtividades simuladas pelo SoySim com os dados do cenário CMIP5-RCP4.5 mostraram o mesmo comportamento, porém com produtividades um pouco mais elevadas, com as semeaduras de 01/10 e 01/11 atingindo valores maiores que 4 Mg ha⁻¹ (Figura 3B, D) e semeaduras do início de janeiro com valores entre 2 e 4 Mg ha⁻¹ (Figura 3H). Em alguns anos e datas de semeadura o modelo interrompeu a simulação por atingir certa temperatura mínima que matou a planta, ou seja, cada fase do desenvolvimento da planta possui uma temperatura basal mínima e quando esta temperatura é atingida o modelo interrompe a simulação. A porcentagem dos anos em cada data de semeadura e período estão dispostos na Tabela 1 e não foram utilizados para calcular as médias de produtividade, por se estar buscando a produtividade potencial para cada período. Estes problemas ocorreram em maior número nas semeaduras mais tardias de 01/12 e 01/01, provavelmente devido ao ciclo da cultura se estender até meses do outono/inverno, em que não

raramente ocorrem temperaturas negativas. Os mapas do período baseline da produtividade simulada com o modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial e com limitação por água (Figura 4) quase não tem variação de produtividade entre as semeaduras de 01/10 e 01/01, tendência diferente da encontrada pelo modelo SoySim. A produtividade simulada pelo modelo na condição potencial variou de 1,5 a 3 Mg ha⁻¹ e na condição com limitação por água variou de 0,5 a 3 Mg ha⁻¹. Estes resultados indicam que o modelo CROPGRO-Soybean não captura efeito da época de semeadura sobre a produtividade no período de semeadura da soja de início de outubro a início de janeiro. Semeaduras a partir de 01/12 tem menor produtividade observada a campo (Figura 5, do Capítulo 1 desta tese).

Com relação aos três períodos de clima futuro, a produtividade de soja simulada pelo modelo SoySim (CMIP3-SRES A1B) foi afetada positivamente com o passar dos anos no cenário climático futuro (Figura 5), com a produtividade chegando até 1 Mg ha⁻¹ acima do valor baseline no período de 2010-2039 (Figura 5A, D, G, J), até 1,5 Mg ha⁻¹ no período de 2040-2069 (Figura 5B, E, H, K) e de 0,5 a 2 Mg ha⁻¹ no último período 2070-2099 (Figura 5C, F, I, J). As semeaduras de 01/10, 01/11 e 01/12 são as que apresentaram anomalias de produtividade mais expressivas, com a região do extremo sul do Estado mostrando anomalias acima de 2 Mg ha⁻¹ nas semeaduras de 01/11 e 01/12 (Figura 5F, I). A simulação dos três períodos futuros com o modelo SoySim com dados do cenário RCP4.5 do CMIP5 mostrou a mesma tendência de aumento na produtividade com o passar dos anos, porém menos expressivo quando comparado às simulações com o SoySim (CMIP3) e com algumas áreas com valores negativos para a anomalia de produtividade (Figura 6 G, J, K, L). Todos os períodos apresentaram anomalias variando de -0,5 a 2 Mg ha⁻¹, com os valores negativos restritos às semeaduras mais tardias (01/12 e 01/01).

A resposta do cenário SRES A1B forçando o modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial foi menor para os três períodos de clima futuro. A produtividade de soja apresentou aumento de até 0,5 Mg ha⁻¹ no período de 2010-2039 (Figura 9A, D, G, J), até 1 Mg ha⁻¹ no período de 2040-2069 (Figura 7B, E, H, K) e até 1,5 Mg ha⁻¹ no último período 2070-2099 (Figura 9C, F, I, J). As anomalias de produtividade são mais expressivas na metade oeste do Estado para as semeaduras de 01/10, 01/11 e 01/12 para o período de 2040-2069 (Figura 7B, E, H), e os valores mais elevados (1,5 Mg ha⁻¹) ficaram concentrados em uma pequena faixa na região noroeste/oeste do Rio Grande do Sul no último período (Figura 7F, I, L). As anomalias de produtividade resultantes das simulações com o modelo CROPGRO-Soybean na condição com limitação por água

foram menos expressivas, com valores negativos para as quatro datas de semadura do período 2010-2039 que abrangeram parte do estado, com valores variando entre $-0,5$ e 1 Mg ha^{-1} (Figura 8A, D, G, J). O período 2040-2069 apresentou anomalias chegando até 1 Mg ha^{-1} , com os valores mais altos concentrados na região sudeste do estado (Figura 8B, E, H, K) e no período de 2070-2099 as anomalias também alcançaram valores de 1 Mg ha^{-1} (Figura 8C, F, I, L) na maior parte do Estado, nas quatro datas de semeadura. Já foram encontrados em outros trabalhos, como em Bao et al. (2015), que com o aumento das chuvas e da $[\text{CO}_2]$ no cenário futuro, encontraram um aumento na produtividade de soja e o aumento da temperatura fez com que o ciclo da cultura encurtasse, beneficiando as semeaduras mais tardias. Já Mall et al. (2004) encontraram uma redução na produtividade de soja de 10 a 20% na Índia, devido ao aumento da temperatura. Nas regiões do Estado, os maiores aumentos de produtividade potencial são nas regiões norte/nordeste e sul/sudeste nas semeaduras de outubro e novembro enquanto nas semeaduras de dezembro e janeiro os maiores aumentos são nas regiões norte/nordeste e no Extremo sul.

Analisando o período futuro total, de 2010 a 2099, observou-se um aumento de médio de $3,60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ para as simulações com o modelo SoySim na condição potencial forçado pelo cenário A1B do CMIP3. Para o modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial também forçado pelo cenário A1B o aumento médio na produtividade foi de $1,58 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ e na condição com limitação por água o aumento foi de $1,93 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$ (Tabela 2). Enquanto que o aumento médio da produtividade utilizando o modelo SoySim forçado pelo cenário RCP4.5 do CMIP5 foi de $5,02 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ppm}^{-1}$, indicando que o aumento anual na produtividade levando em conta o aumento na $[\text{CO}_2]$ foi maior para as condições do cenário CMIP5, principalmente nas semeaduras mais precoces de 01/10 e 01/11.

Os resultados com o modelo SoySim indicam que a região onde atualmente obtém-se as maiores produtividades (área 4, Figura 2B), são as que terão os maiores benefícios do aumento da $[\text{CO}_2]$. Os resultados encontrados com o modelo SoySim para o cenário RCP4.5 mostraram um aumento menos expressivo nas produtividades quando comparado com os resultados do modelo acoplado ao cenário A1B, o que se deve ao fato do aumento da $[\text{CO}_2]$ não ser tão elevada no cenário RCP4.5. Esse fato corrobora em parte com os resultados de Rio et al. (2015), que usaram o modelo CROPGRO-Soybean forçado aos cenários SRES A2 e B2 do IPCC sem o aumento da $[\text{CO}_2]$ e encontraram uma diminuição na produtividade para o período futuro de 2041-2071, mostrando que o efeito isolado do aumento da temperatura é prejudicial para a cultura da soja. O aumento da $[\text{CO}_2]$

tem um efeito positivo na produtividade das culturas, por este ser o substrato primário para a fotossíntese. A soja por ser uma planta C3 tem um maior benefício, porém se este aumento na [CO₂] vier acompanhado do aumento da temperatura este benefício pode ser anulado (Streck, 2005; Hao et al., 2014). Os modelos agrícolas são ótimas ferramentas para analisar estes efeitos entre a planta e o ambiente em cenários climáticos futuros, embora sejam dependentes de parâmetros genéticos que podem vir a mudar conforme uma nova cultivar é lançada no mercado.

Conclusões

1 - De forma geral, as mudanças climáticas projetadas pelos cenários de emissão SRES A1B e RCP4.5 do AR4 e AR5 trazem um efeito positivo na produtividade de grãos de soja no Estado do Rio Grande do Sul pelas simulações dos modelos SoySim e CROPGRO-Soybean, porém o modelo SoySim, mesmo não estando calibrado, mostrou o efeito de época de semeadura que o modelo CROPGRO-Soybean não mostrou.

2 - A região norte/nordeste do Estado (área 4) foi a que apresentou os maiores valores de anomalia na produtividade de soja, com um aumento de 0,5 a 1 Mg ha⁻¹ no rendimento atual de soja desta região para o período futuro de 2070 a 2099 utilizando o modelo SoySim forçado com o cenário SRES A1B, já o cenário RCP4.5, para este mesmo período, as anomalias na região 4 variaram entre 0,1 e 1 Mg ha⁻¹.

3 - O modelo CROPGRO-Soybean na condição potencial também apresentou anomalias positivas de produtividade no final do século chegando até 1,5 Mg ha⁻¹. Já na condição com limitação por água, no período de 2010-2039, as anomalias ficaram negativas em algumas parte do Estado. Um aumento na produtividade foi observado no período de 2070-2099, com anomalias de até 1 Mg ha⁻¹ na maioria das regiões do Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa de estudos, à UFSM pela infraestrutura, ao Grupo de Pesquisa em Clima-UFSM (GPC-UFSM) pela sessão dos dados climatológicos e aos colegas envolvidos nas simulações com os dois modelos agrícolas para a realização deste trabalho.

Referências

- BAO, Y., HOOGENBOOM, G., McCLENDON, R.W., PAZ, J.O. Potential adaptation strategies for rainfed soybean production in the south-eastern USA under climate change based on the CSM-CROPGRO-Soybean model. **The Journal of Agricultural Science**, v.153, p.798-824, 2015.
- BAIGORRIA, G. A., CHELLIAH, M., MO, K.C., ROMERO, C.C., JONES, J.W., O'BRIEN, J., HIGGINS, R.W. Forecasting cotton yield in the Southeastern United States using Coupled Global Circulation Models. **Agronomy Journal**, v.102, n.1, 2010.
- BISHOP, K.A., BETZELBERGER, A.M., LONG, S.P., AINSWORTH, E.A. Is the potential to adapt soybean (*Glycine max* Merr.) to future [CO₂]? An analysis of the yield response of 18 genotypes in free-air CO₂ enrichment. **Plant, Cell and Environment**, v.38, p.1765-1774, 2015.
- BOOTE, K.J., JONES, J.W., HOOGENBOOM, G.. Simulation of crop growth: CROPGRO model. In: Peart, R.M., Curry, R.B. (Eds.), **Agricultural Systems Modeling and Simulation** (Capítulo 18). Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 651-692, 1998.
- BOOTE, K.J., MÍNGUEZ, M.I., SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v.94, p.743–756, 2002.
- CARBONE, G.J, MEARNES, L.O., MAVROMATIS, T., SADLER, E.J., STOOKSBURY, D. Evaluating CROPGRO-Soybean performance for use in climate impacts change. **Agronomy Journal**, v.95, p.537-544, 2003.
- CONAB. **Série histórica de área e produção plantada por unidades da federação**. Disponível na internet: [http:// www.conab.gov.br/download/safra/sojaseriehist.xls](http://www.conab.gov.br/download/safra/sojaseriehist.xls). Acesso em 6 jan. 2016.
- CRUZ, J.L., ALVES, A.A., LeCAIN, D.R., ELLIS, D.D., MORGAN, J.A. Effect of elevated CO₂ concentration and nitrate: ammonium ratios on gas exchange and growth of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). **Plant soil**, v.374, p.33-43, 2014.
- EVANS, L.T., FISCHER, R.A. Yield Potential: Its Definition, Measurement, and Significance. **Crop Science**. v.39, p.1544–1551, 1999.
- FAOSTAT Database – **Crop production (FAO)**. Acessado em: 10 jan. 2016, In: <<http://faostat.fao.org/>>.
- FERREIRA, D.B., RAO, V.B. Recent climate variability and its impacts on soybean yields in Southern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.105, p.83-97, 2011.
- GRASSINI, P., TORRION, J.A., YANG, H.S., REES, J., ANDERSEN, D., CASSMAN, K.G., SPECHT, J.E. Soybean yield gaps and water productivity in the western U.S. Corn Belt. **Field Crops Research**, v.179, p.150–163, 2015.
- GROSSI, M.C., JUSTINO, F., ANDRADE, C.D.L.T., SANTOS, E.A., RODRIGUES, R.A.,

COSTA, L.C. Modeling the impact of global warming on the sorghum sowing window in distinct climates in Brazil. **European. Journal.of Agronomy**, v.51, p.53-64, 2013.

HANSEN, J., SATO, M., RUEDY, R. Perception of climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.109, p.2415-2423, 2012.

HAO, X., GAO, J., HAN, X., MA, Z., MERCHANT, A., JU, H., LI, P., YANG, W., GAO, Z., LIN, E. Effects of open-air elevated atmospheric CO₂ concentration on yield quality of soybean (*Glycine max* (L.) Merr). **Agriculture, Ecosystem & Environment**, v.192, p.80-84, 2014.

HEINEMANN, A.B., MAIA, A.D.H.N., DOURADO-NETO, D., INGRAM, K.T., HOOGENBOOM, G. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO₂ enrichment under different temperature regimes. **European. Journal.of Agronomy**, v.24, p.52-61, 2006.

HOSTETLER, S.W., ALDER, J.R., ALLAN, A.M. **Dynamically downscaled climate simulations over North America: Methods, evaluation, and supporting documentation for users**: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1238, 2011.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: < <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pam/default.asp> >. Acesso em: 26 jan. 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. 996 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University, 2013. 33p.

JONES, C.D., HUGHES, J.K., BELLOUIN, N., HARDIMAN, S.C., JONES, G.S., KNIGHT, J., LIDDICOAT, S., O'CONNOR, F.M., ANDRES, R.J., BELL, C., BOO, K.O., BOZZO, A., BUTCHART, N., CADULE, P., CORBIN, K.D., DOUTRIAUX-BOUCHER, M., FRIEDLINGSTEIN, P., GORNALL, J., GRAY, L., HALLORAN, P.R., HURTT, G., INGRAN, W.J., LAMARQUE, J.F., LAW, R.M., MEINSHAUSEN, M., OSPREY, S., PALIN, E.J., CHINI, L.P., RADDATZ, T., SANDERSON, M.G., SELLAR, A.A., SCHURER, A., VALDES, P., WOOD, N., WOODWARD, S., YOSHIOKA, M., ZERROUKAT, M. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**. v.4, p.543-570, 2011.

JUSTINO, F., OLIVEIRA, E., RODRIGUES, R., GONÇALVES, P., SOUZA, P., STORDAL, F., MARENGO, J., SILVA, T., DELGADO, R., LINDEMANN, D., COSTA, L., Mean and Interannual Variability of Maize and Soybean in Brazil under Global Warming Conditions, **American Journal of Climate Change**, v. 2 n. 4, p. 237-253, 2013

LAL, M., SINGH, K., SRINIVASAN, G., RATHORE, L., NAIDU, D., TRIPATHI, C. Growth and yield responses of soybean in Madhya Pradesh, India to climate variability and change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.93, p.53-70, 1999.

LOBELL, D.B., CASSMAN, K.G., FIELD, C.B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v.34, p.179–204, 2009.

LOCKE, A.M., SACK, L., BERNACCHI, C.J., ORT, D.R. Soybean leaf hydraulic conductance does not acclimate to growth at elevated [CO₂] or temperature in growth chambers or in field. **Annals of Botany**, v.112, p.1-8, 2013.

MALL, R.K., LAL, M. BHATIA, V.S., RATHORE, L.S., SINGH, R. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. **Agricultural and Forest Meteorology**. V.121, p.113-125, 2004.

MARIN, F.R., JONES, J.W., SINGELS, A., ROYCE, F., ASSAD, E.D., PELLEGRINO, G.Q., JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climate Change**, v.117, p.227–239, 2013.

PAL, J.S.; GIORGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N., SOLMON, F.; RAUSCHER, S. A.; GAO, X.; FRANCISCO, R.; ZAKAY, A.; WINTER, J.; ASHFAQ, M.; SYED, F. S.; SLOAN, L. C.; BELL, J. L.; DIFFENBAUGH, N. S.; KARMACHARYA, J. H.; KONARÉ, A.; MARTINEZ, D.; ROCHA, R. P. da; STEINER, A. L. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.88, p. 1395–1409, 2007.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. ; EVANGELISTA, S. R. M. ; ZULLO JR, J. ; OTAVIAN, A. F. ; EVANGELISTA, B. A. ; MARIN, F. R. ; MACEDO JR, C. ; PELLEGRINO, G. Q. ; COLTRI, P. P. ; CORAL, G. . A Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil. In: Deconto, J. G.. (Org.). **Aquecimento Global e a Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil**. 2ed.Campinas,SP: Embrapa, v. 1, p. 24-71, 2008.

RIO, A., SENTELHAS, P. C., FARIAS, J.R.B, SIBALDELLI, R. N. R., FERREIRA, R.C. Alternative sowing dates as a mitigation measure to reduce climate change impacts on soybean yields in southern Brazil. **International Journal of Climatology**, 2015.

RUANE, A.C., MCDERMID, S., ROSENZWEIG, C., BAIGORRIA, G., JONES, J.W., ROMERO, C.C., CECIL, D.L. 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, p.394-407, 2014.

RUÍZ-NOGUEIRA, B., BOOTE, K.J., SAU, F. Calibration and use of CROPGRO-soybean model for improving soybean management under rainfed conditions. **Agricultural Systems**, v.68, p.151–173, 2001.

SETIYONO, T.D., CASSMAN, K.G., SPECHT, J.E., DOBERMANN, A., WEISS, A., YANG, H., CONLEY, S.P., ROBINSON, A. P., PEDERSEN, P., DE BRUIN, J.L. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, v.119, p.161–174, 2010.

SIQUEIRA, O.J.F.; FARIAS, J.R.B.; SANS, L.M.A. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, n. 1, p.115-129, 1994.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; FERREIRA, M.F.; COSTA, A. C.; WOZNIAK, M. A. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 311-320, 2000.

SOUTHWORTH, J., RANDOLPH, J.C., HABECK, M., DOERING, O.C., PFEIFER, R.A., RAO, D.G., JOHNSTON, J.J. Consequences of future climate change and changing climate variability on maize yields in the Midwestern United States. **Agriculture, Ecosystem & Environment**, v.82, p.139–158, 2000.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v.35, n. 3, p.730-740, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1351 - 1359, 2006.

STROEVE, J.C., KATTSOV, V., BARRETT, A., SERREZE, M., PAVLOVA, T. HOLLAND, M., MEIER, W. Trends in Arctic sea ice extend from CMIP5, CMIP3 and observations. **Geophysical Research Letters**, v.39, L16502, 2012.

VAN ITTERSUM, M.K., CASSMAN, K.G., GRASSINI, P., WOLF, J., TITTONELL, P., HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. **Field Crops Research**, v.143, p.4-17, 2013.

WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudanças climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.1237-1245, 2010.

WANG, X., NAKATSUBO, T., NAKAME, K. Impacts of elevated CO₂ and temperature on soil respiration in warm temperature evergreen *Quercus glauca* stands: an open-top chamber experiment. **Ecological Research**, v.27, p.595-602, 2012.

WEISS, A.; HAYS, C.J.; WON, J. Assessing winter wheat response to climate change scenarios: a simulation study in the U.S. Great Plains. **Climatic Change**, v. 58, p. 119-147, 2003.

Tabela 1 – Porcentagem de anos em que o modelo SoySim não fez a simulação por ter atingido certa temperatura mínima que matou a planta. Dados meteorológicos provenientes do cenário A1B do CMIP3 e RCP4.5 do CMIP5.

Data de semeadura	A1B – CMIP3	RCP4.5 – CMIP5
<i>Período baseline</i>		
01/10	3,3	3,3
01/11	0,0	3,3
01/12	0,0	0,0
01/01	6,6	13,3
<i>Períodos futuros</i>		
01/10	0,0	13,3
01/11	5,5	14,4
01/12	10,0	23,3
01/01	22,2	53,3

Tabela 2 – Tendência de aumento de produtividade de soja potencial (P_{ot}) e limitada por água (L_A) por unidade de aumento de CO_2 ($kg\ ha^{-1}\ ppm^{-1}$) simulada com os modelos SoySim e CROPGRO-Soybean nos cenários climáticos futuros (CMIP3 e CMIP5) no período de 2010-20139. As áreas 1, 2, 3 e 4 são as indicadas na Figura 2A,B.

Área	Data de semeadura	$kg\ ha^{-1}\ ppm^{-1}$			
		CMIP3		CMIP5	
		SoySim $_{Pot}$	CROPGRO $_{Pot}$	CROPGRO $_{L_A}$	SoySim $_{Pot}$
1	01/10	3,15	1,40	3,15	6,65
	01/11	3,95	1,53	1,56	6,03
	01/12	3,52	1,29	1,56	4,63
	01/01	2,43	1,27	1,40	4,41
2	01/10	2,94	1,61	1,43	5,30
	01/11	3,92	1,90	2,12	4,91
	01/12	4,08	2,09	2,09	3,91
	01/01	3,39	1,90	2,83	3,63
3	01/10	3,23	1,67	1,80	6,09
	01/11	4,18	2,01	2,09	5,47
	01/12	3,60	1,82	2,01	4,69
	01/01	2,96	1,51	2,17	3,29
4	01/10	3,81	1,32	1,51	6,31
	01/11	4,32	1,37	1,80	5,64
	01/12	4,74	1,35	1,53	4,30
	01/01	3,47	1,37	1,88	5,08

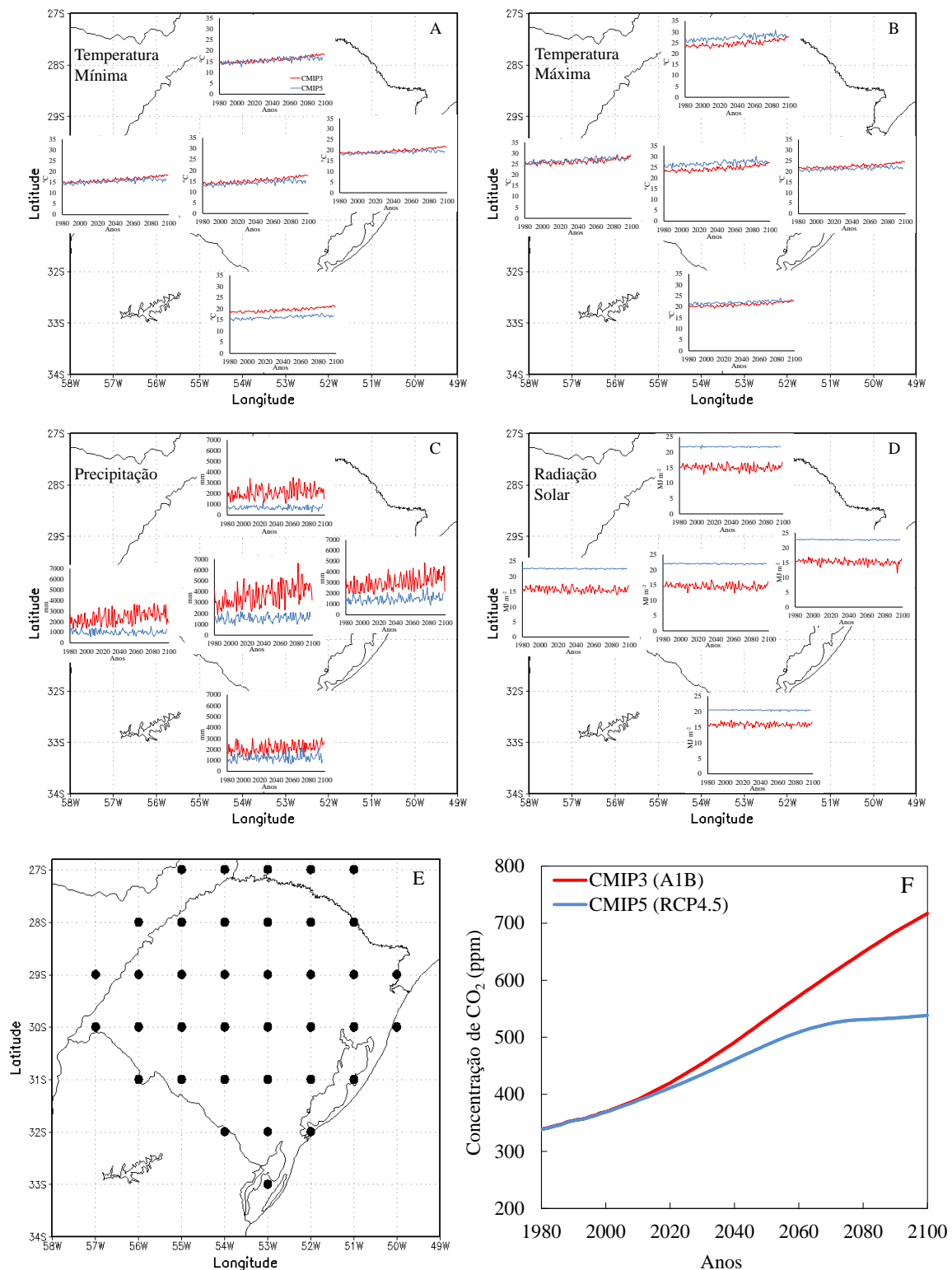


Figura 1 – Evolução anual das variáveis temperatura mínima (A) e máxima (B) do ar, precipitação (C), radiação solar (D) em cinco regiões do Rio Grande do Sul, localização dos 37 pontos de coordenadas geográficas sobre o Rio Grande do Sul (E) e concentração de CO₂ atmosférico (F) nos cenários SRES A1B (CMIP3) e RCP4.5 (CMIP5).

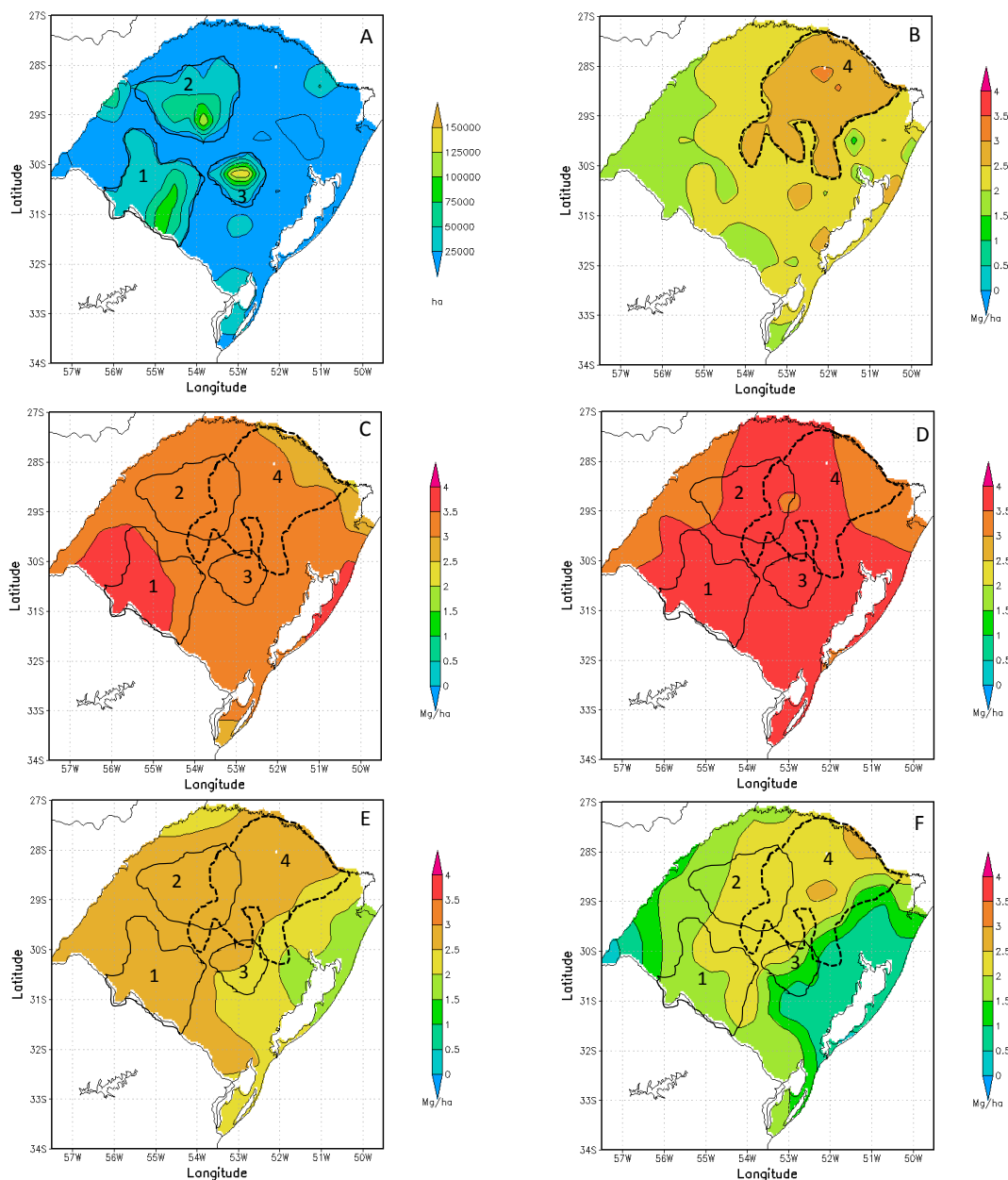


Figura 2 – Área cultivada com soja na safra 2014/2015 (A), produtividade de soja (Mg ha^{-1}) observada (B), produtividade potencial simulada com o modelo SoySim com o cenário SRES A1B (CMIP3) (C) e RCP4.5 (CMIP5) (D), produtividade potencial (E) e limitada por água (F) simulada com o modelo CROPGRO-Soybean com o cenário SRES A1B (CMIP3) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, durante cinco anos agrícolas (2008/2009, 2009/2010, 2010/2011, 2012/2013 e 2013/2014). A produtividade simulada é a média dos cinco anos agrícolas, três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0) e quatro datas de semeadura (01/10, 01/11, 01/12 e 01/01). Os dados observados são da série histórica do IBGE. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja no ano agrícola 2013/2014. A área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado nos cinco anos agrícolas.

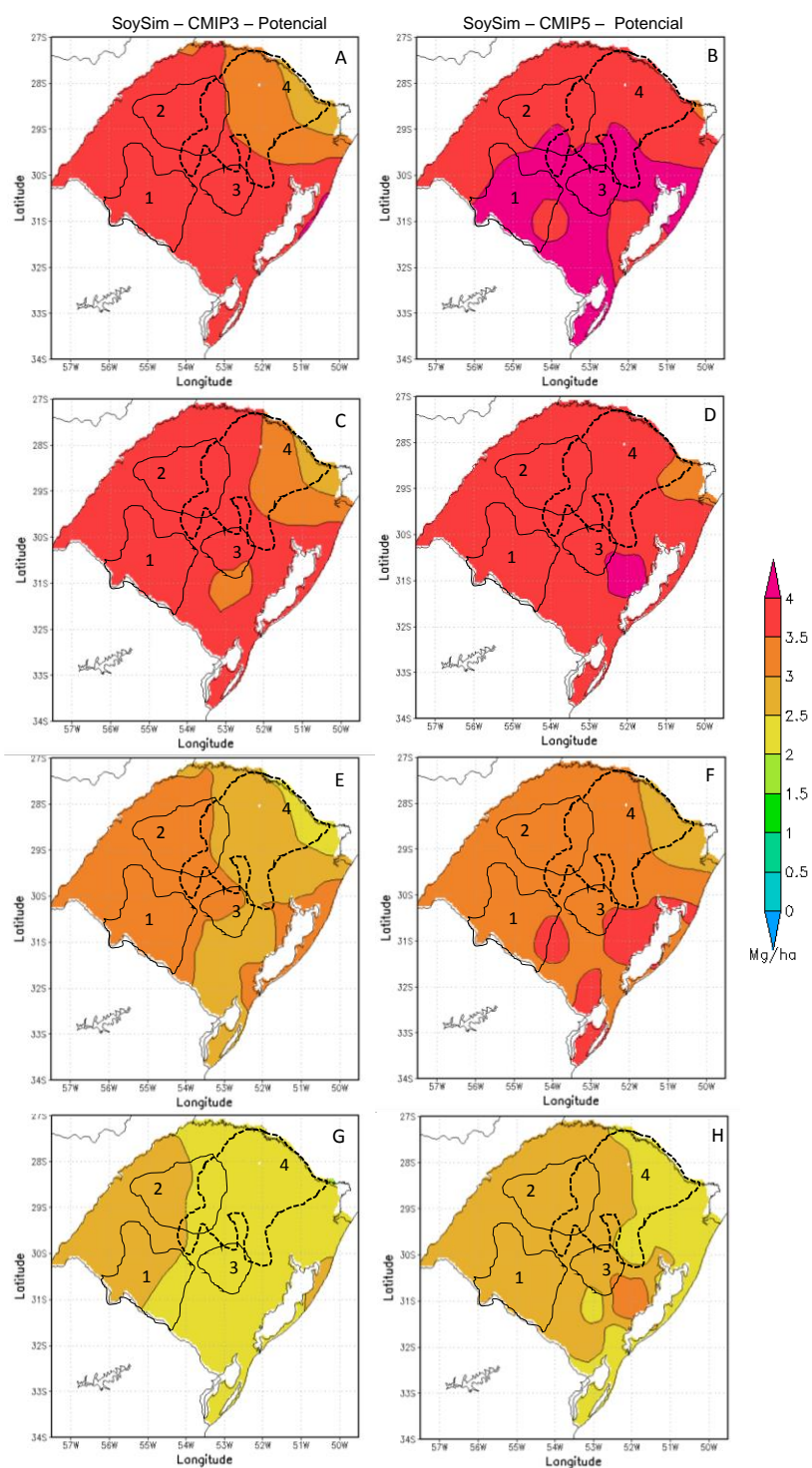


Figura 3 – Produtividade potencial de soja (Mg ha^{-1}) simulado pelo modelo SoySim no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período baseline (1980-2009) para datas de semeadura de 01/10 (A,B), 01/11 (C,D), 01/12 (E,F) e 01/01 (G,H) dos cenários climáticos SRES A1B (CMIP3) e RCP4.5 (CMIP5). A produtividade é a média dos 30 anos do período baseline, três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0) para cada ponto de coordenada geográfica. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja e a área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

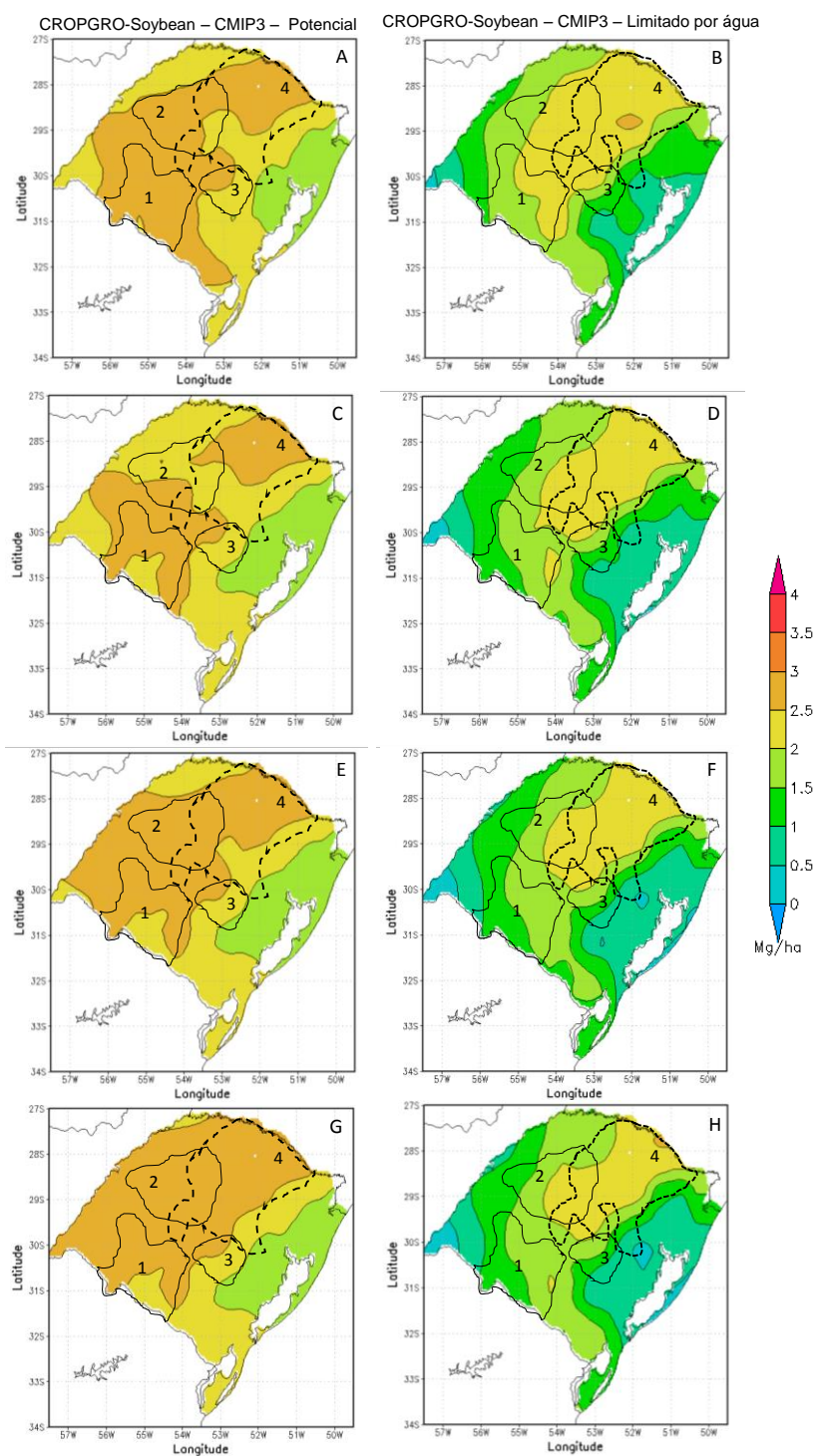


Figura 4 – Produtividade potencial e limitada por água (Mg ha^{-1}) simulado pelo modelo CROPGRO-Soybean no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, para o período baseline (1980-2009) para datas de semeadura de 01/10 (A,B), 01/11 (C,D), 01/12 (E,F) e 01/01 (G,H) do cenário climático SRES A1B (CMIP3). A produtividade é a média dos 30 anos do período baseline, três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0) para cada ponto de coordenada geográfica. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja e a área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

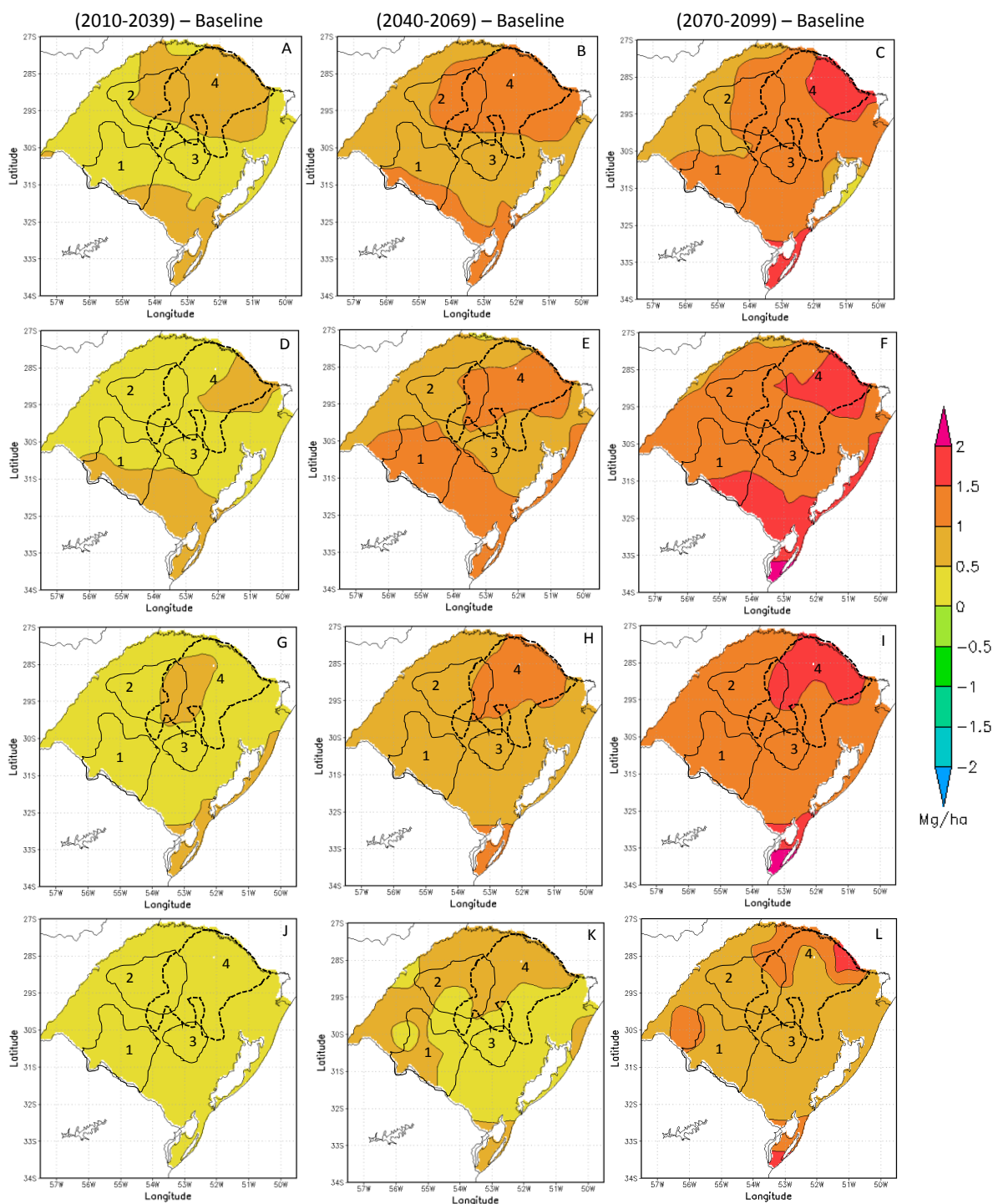


Figura 5 – Anomalia na produtividade potencial de soja (Mg ha^{-1}) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, simulado com o modelo SoySim para três períodos climáticos futuros (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099) do cenário SRES A1B (CMIP3) em quatro datas de semeadura 01/10 (A, B, C), 01/11 (D, E, F), 01/12 (G, H, I) e 01/01 (J, K, L). Produtividade de grãos é a média de três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0). Baseline é o período de 1980-2009. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja e a área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

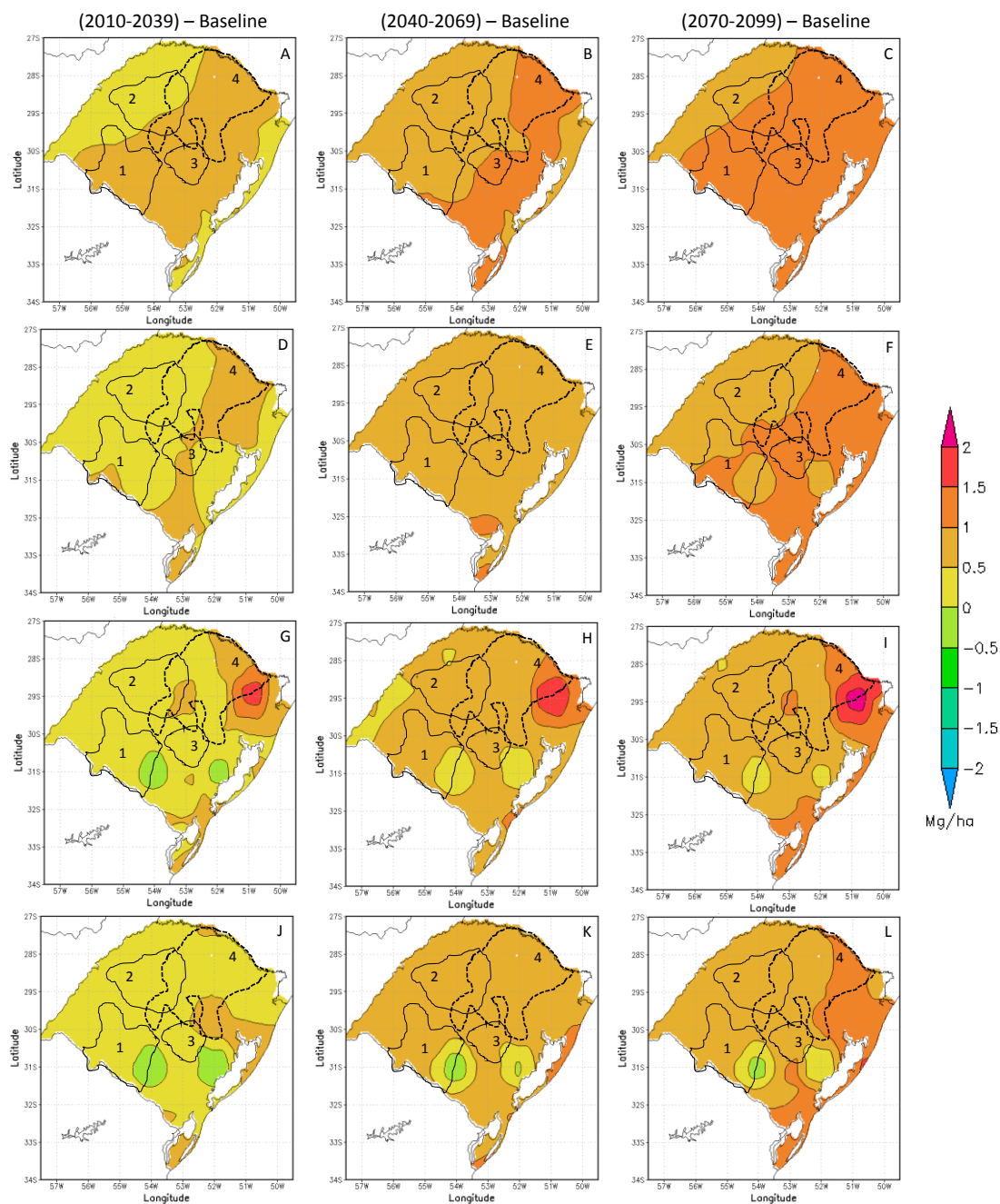


Figura 6 – Anomalia na produtividade potencial de soja (Mg ha^{-1}) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, simulado com o modelo SoySim para três períodos climáticos futuros (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099) do cenário RCP4.5 (CMIP5) em quatro datas de semeadura 01/10 (A, B, C), 01/11 (D, E, F), 01/12 (G, H, I) e 01/01 (J, K, L). Produtividade de grãos é a média de três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0). Baseline é o período de 1980-2009. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja e a área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

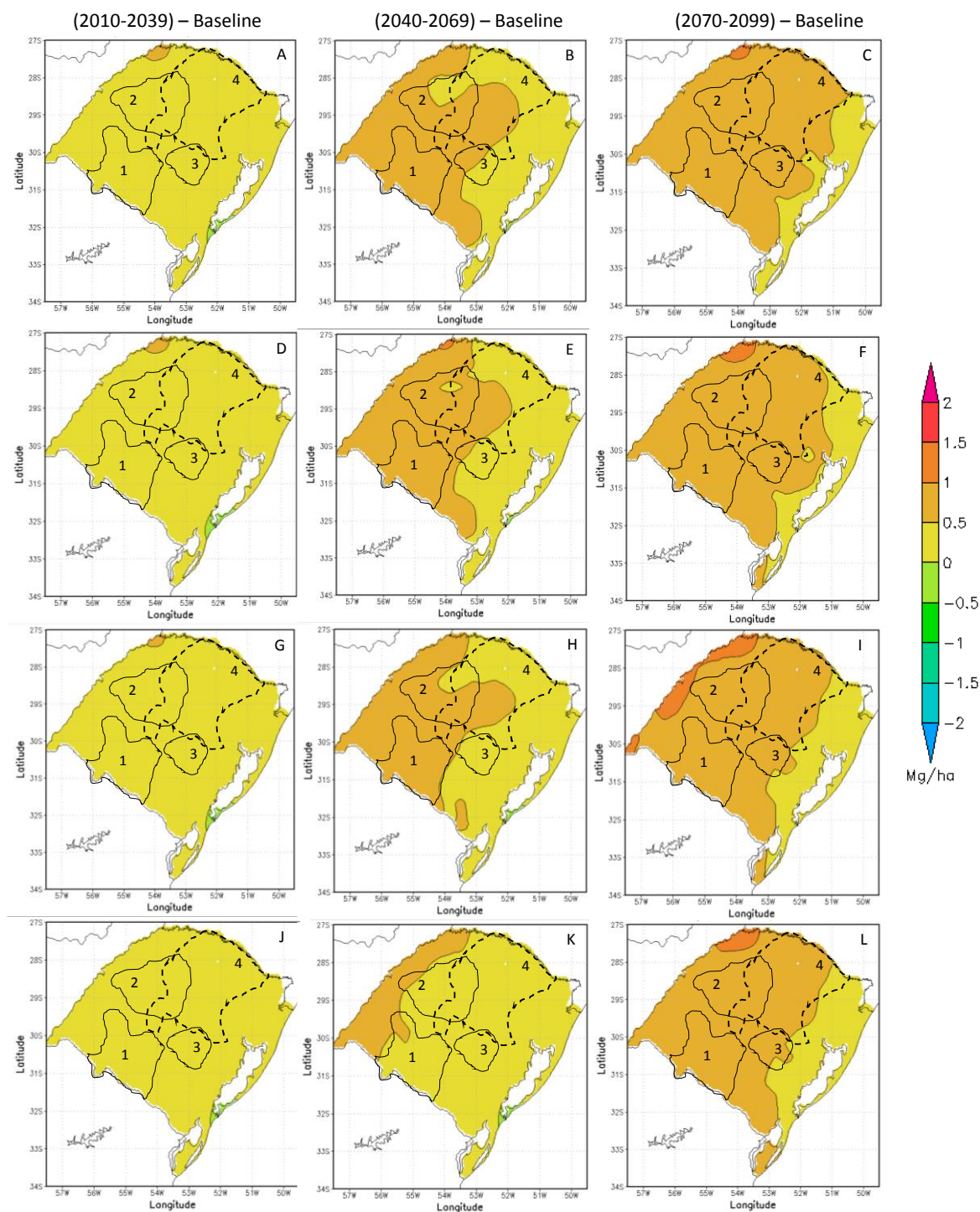


Figura 7 – Anomalia na produtividade potencial de soja (Mg ha^{-1}) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, simulado com o modelo CROPGRO-Soybean para três períodos climáticos futuros (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099) do cenário SRES A1B (CMIP3) em quatro datas de semeadura 01/10 (A, B, C), 01/11 (D, E, F), 01/12 (G, H, I) e 01/01 (J, K, L). Produtividade de grãos é a média de três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0). Baseline é o período de 1980-2009. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja. A área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

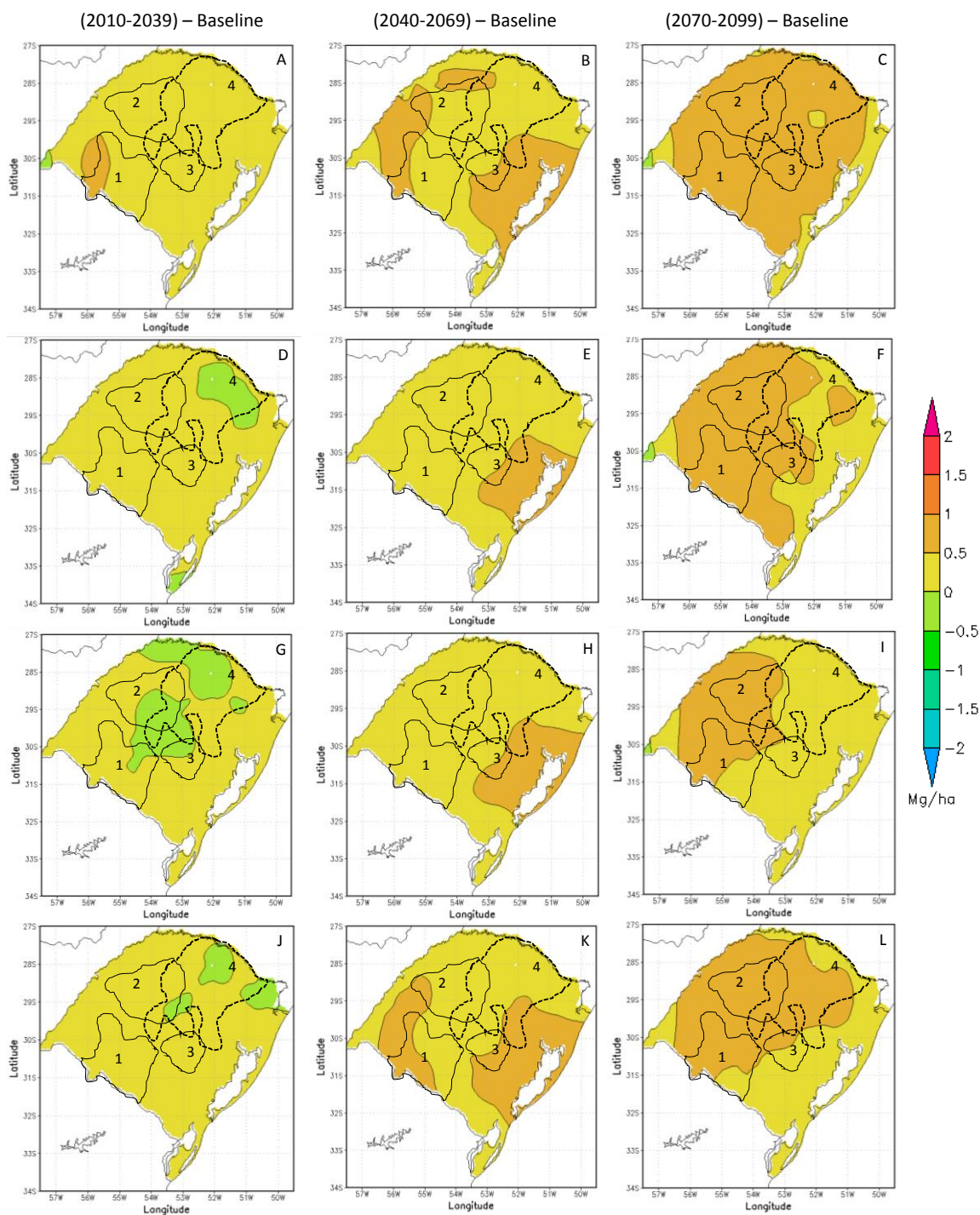


Figura 8 – Anomalia na produtividade de soja limitada por água (Mg ha^{-1}) no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, simulado com o modelo CROPGRO-Soybean para três períodos climáticos futuros (2010-2039, 2040-2069 e 2070-2099) do cenário SRES A1B (CMIP3) em quatro datas de semeadura 01/10 (A, B, C), 01/11 (D, E, F), 01/12 (G, H, I) e 01/01 (J, K, L). Produtividade de grãos é a média de três grupos de maturação (4.8, 5.5 e 6.0). Baseline é o período de 1980-2009. As áreas 1, 2 e 3 representam as áreas com maior área cultivada com soja. A área 4 representa a área de maior produtividade de soja no Estado.

7 DISCUSSÃO

Modelos agrícolas são cada vez mais usados em diversos países com diferentes finalidades, como melhorar o manejo e assim aumentar a produtividade as culturas agrícolas, como ferramenta educacional e em estudos numéricos para previsão de safra e em cenários climáticos futuros. Os modelos agrícolas tem evoluído em complexidade e em capacidade preditiva ao longo dos últimos 50 anos, o que tem permitido muitos modelos baseados em processos, originalmente usados apenas em pesquisa, terem aplicação prática e regional. Como exemplos desta evolução cita-se o SimulArroz (www.ufsm.br/simularroz), o Simanihot (www.ufsm.br/simanihot) e o PhenoGlad (www.ufsm.br/phenoglad).

O modelo SoySim foi desenvolvido e calibrado na região do CornBelt nos Estados Unidos (Setiyono et al., 2010). O SoySim é um modelo de simulação de soja que combina simulação de fotossíntese, acumulação e partição de biomassa, com novas abordagens, como florescimento baseado em processos de indução e pós-indução floral, índice de área foliar baseado em função logística e função de senescência, integração da fotossíntese do dossel usando uma função beta e simulação de produtividade baseada em suprimentos de assimilados e número de grãos, o que faz dele um modelo baseado em processos robusto. Embora tenha todos esses complexos processos inseridos, o modelo SoySim é de fácil utilização, e que no modo ‘Generic’ requer somente dois dados de entrada relacionados à cultivar de soja, que são o grupo de maturação (0.0 a 8.0) e tipo de crescimento (indeterminado e semi-determinado), facilmente encontrados junto às empresas de sementes. Em contrapartida, outros modelos mais antigos e ainda utilizados, requerem muitos dados de entrada no modelo referentes à cultivar, como o Sinclair-Soybean (SINCLAIR, 1986), CROPGRO-Soybean (BOOTE, et al., 1998) e WOFOST (BOOGARD et al., 1998).

Nesta tese, o modelo SoySim foi testado para as condições subtropicais do Brasil, com cultivares de soja com GM variando entre 4.8 e 8.2, diferentes daqueles em que o modelo foi calibrado (0.8 e 4.2). Desta análise foi possível observar que o modelo SoySim consegue capturar o efeito de época de semeadura e as comparações entre dados observados e simulados obtiveram os melhores resultados para as cultivares com tipo de crescimento indeterminado e GM menor que 6.0. A evolução do estágio vegetativo (de V0 até V6) foi bem simulada pelo modelo, com RQME (Raiz Quadrada Média do Erro) de 0,6 e 0,7 nós, para cultivares indeterminadas e semi-determinadas, respectivamente (Figura 2a,b do Capítulo 1). Já o número final de nós foi

superestimado pelo modelo SoySim, com valores de 6 e 16 nós (cultivares indeterminadas e semi-determinadas, respectivamente (Figura 2c,d do Capítulo 1). Da mesma forma, o RQME para os estágios reprodutivos (Figura 2e,f do capítulo 1) foi menor para as cultivares indeterminadas (9,5 dias) que para as semi-determinadas (24,8 dias). Observou-se que o estágio R6 em várias ocasiões aconteceu antes do estágio R5. No Apêndice A desta tese encontram-se as temperaturas cardinais e um esquema do funcionamento da parte de fenologia dentro do modelo SoySim, do que acredita-se ser a razão de, por muitas vezes, o estágio R6 ter acontecido antes do estágio R5.

O índice de área foliar (IAF) foi superestimado pelo modelo SoySim quando os valores observados eram menores que 3 e subestimado quando os valores observados atingiram valores maiores que 6 (Figura 3 do Capítulo 1). As simulações para a produtividade de grãos com o modelo SoySim tiveram valores de RQME de 0,9 e 1,2 Mg ha⁻¹, para as cultivares indeterminadas e semi-determinadas, respectivamente (Figura 4 do Capítulo 1).

Estes resultados fizeram com que as cultivares fossem divididas em quatro grupos, conforme o GM e tipo de crescimento (grupos G1, G2, G3 e G4). Esta separação comprovou a hipótese de que o modelo SoySim funcionaria melhor para cultivares com GM mais próximos ao que o modelo foi calibrado originalmente. Ou seja, com a análise feita neste trabalho, as cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado e com GM até 6,0, podem ser utilizadas em estudos para a região Sul do Brasil, como por exemplo, em estudos dos possíveis impactos das mudanças climáticas na soja. De forma geral, a avaliação do modelo SoySim para GM maiores que 4.8 mostrou que o modelo necessita de uma revisão em seus parâmetros e relações entre temperatura e fotoperíodo para melhorar as simulações de crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) indica em seus relatórios que as emissões de gases de efeito estufa são os maiores da história, e que isso vem afetando a vida terrestre (IPCC, 2007; 2013). O cenário de emissão SRES A1B do AR4 mostra um aumento na temperatura de até 4,4°C e aumento da [CO₂] em torno de 700 ppm (IPCC, 2007) e o cenário RCP4.5 do AR5 mostra um aumento de até 2,6°C e [CO₂] em 538 ppm (IPCC, 2013).

A produtividade observada de soja na área de maior produtividade do Rio Grande do Sul (área 4, Capítulo 2) apresenta valores entre 2,5 e 3,5 Mg ha⁻¹. A produtividade simulada pelo modelo SoySim (CMIP3) na área 4 variou de 2,5 a 3,5 Mg ha⁻¹ (Figura 2C do Capítulo 2), de 3 a 4 Mg ha⁻¹ para o modelo SoySim (CMIP5) (Figura 2D do Capítulo 2), de 2 a 3 Mg ha⁻¹ com o modelo

CROPGRO-Soybean na condição potencial (Figura 2E do Capítulo 2) e de 1 a 3 Mg ha⁻¹ com o modelo CROPGRO-Soybean com limitação de água.

Nos mapas baseline (Figuras 3 e 4 do Capítulo 2) pode-se observar que o modelo SoySim consegue representar o efeito de época de semeadura e que o modelo CROPGRO-Soybean não capturou, ou seja, o modelo SoySim mostrou a diminuição na produtividade conforme a data de semeadura atrasa. Com relação ao três períodos futuros, observou-se, de maneira geral, que nos dois cenários climáticos futuros houve tendência de aumento na produtividade, principalmente para o final de século, devido ao aumento na [CO₂].

Nos Apêndices C a F encontram-se quatro figuras que corroboram este resultado. No Apêndice C, tem-se a tendência da produtividade potencial de soja para quatro áreas no Estado pelos os resultados do modelo SoySim forçado pelo cenário SRES A1B e observa-se que com o passar dos anos, a produtividade nas três áreas de maior área cultivada atualmente com soja (áreas 1,2,3) variou de 92 a 158 kg decada⁻¹ e na área de maior produtividade atualmente (área 4) o aumento é de 131 a 179 kg decada⁻¹, com os maiores aumentos nas semeaduras de 01/11 e 01/12. A tendência de aumento da produtividade potencial de soja, utilizando os resultados do modelo SoySim forçado pelo cenário RCP4.5, nas três áreas de maior área cultivada atualmente com soja (áreas 1,2,3) variou de 59 a 119 kg decada⁻¹ e na área de maior produtividade atual (área 4) o aumento é de 77 a 113 kg decada⁻¹ (Apêndice D), com os maiores aumentos na semeadura de 01/10.

Considerando o período de 2010-2099 e utilizando os resultados do modelo CROPGRO-Soybean forçado pelo cenário SRES A1B, a tendência de aumento da produtividade potencial de soja nas três áreas de maior área cultivada atualmente com soja (áreas 1,2,3) variou de 48 a 79 kg decada⁻¹ e na área de maior produtividade atual (área 4) o aumento foi de 50 a 52 kg decada⁻¹ (Apêndice E), com os maiores aumentos nas semeaduras de 01/11 e 01/12. E considerando o mesmo período e utilizando os resultados do modelo CROPGRO-Soybean forçado pelo cenário SRES A1B, a tendência de aumento da produtividade de soja com limitação por água nas três áreas de maior área cultivada atualmente com soja (áreas 1,2,3) variou de 59 a 109 kg decada⁻¹ e na área de maior produtividade atual (área 4) o aumento foi de 64 a 81 kg decada⁻¹ (Apêndice F), com os maiores aumentos na semeadura de 01/01.

8 CONCLUSÃO

A avaliação do SoySim indicou que o modelo pode ser usado para simular o crescimento, desenvolvimento e a produtividade de cultivares de soja de tipo de crescimento indeterminado e grupos de maturação até 6.0 enquanto a versão revisada do modelo ainda não está disponível. A hipótese é que uma revisão nos parâmetros e na relação entre as funções de temperatura e fotoperíodo possam melhorar a simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade de soja no Sul do Brasil, onde os grupos de maturação das cultivares de soja é maior que 4.2.

As simulações para a produtividade potencial e com limitação por água, em dois cenários climáticos futuros, utilizando os modelos agrícolas SoySim e CROPGRO-Soybean mostraram um efeito positivo na produtividade de grãos de soja no Estado do Rio Grande do Sul. Sendo a região norte/nordeste do Estado (área 4) beneficiada por esses cenários futuros devido ao aumento na concentração de CO₂.

9 REFERÊNCIAS

- ANDRESEN, J.A.; ALAGARSWAMY, G.; ROTZ, A.; RITCHIE, J.T.; LEBARON, A.W. Weather impacts on maize, soybean, and alfalfa production in the Great Lakes region, 1895-1996. **Agronomy Journal**, v.93, p.1059-1070, 2001.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environment, Part I. **Journal of Atmospheric Sciences**, Washington DC, v. 31, n. 3, p. 674-701, 1974. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2)>. Acesso em: 05 set. 2013.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; JUNIOR, J.Z.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.11, p. 1057-1064, 2004.
- BARCELLOS, C., MONTEIRO, A.M.V., CORVALÁN, C., GURGEL, H.C., CARVALHO, M.S., ARTAXO, P., HACON, S., RAGONI. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v.18, p.285-304, 2009.
- BOOGARD, H.L., VAN DIEPEN, C.A., RÖTTER, R.P., CABRERA, J.M.C.A., VAN LAAR, H.H. User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical Document 52. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands., 1998.
- BUTTERFIELD, R.E.; MORISON, J.I.L. Modeling the impact of climate warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 62, n. 3, p. 241-261, 1992.
- DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. Biosphere-atmosphere-transfer scheme (BATS) version 1E as coupled to NCAR Community Climate Model. **NCAR Technical Note, National Center for Atmosphere Research**, Boulder, 1993.
- FRITSCH, J.M.; CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Science**, 37, 1722-1733, 1980.
- GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R.; BATES, G. T. Development of a second-generation Regional Climate Model, RegCM2. Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes. **Monthly Weather Review**. 121, 2749-2813, 1993a.
- GIORGI, F.; MARINUCCI, M. R.; BATES, G. T. Development of a second-generation Regional Climate Model, RegCM2. Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. **Monthly Weather Review**. 121, 2814-2832, 1993b.
- GRELL, G. A., Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. **Monthly Weather Review**, 121, 764-787, 1993.

HOSTSLAG, A. A. M.; de Bruijn E. I. F.; PAN, L. H. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, **Monthly Weather Review.**, 118, p.1561-1575, 1990.

HUNT, L.A.; VAN DER POORTEN, G.; PARARAJASINGHAM, S. Postanthesis temperature effects on duration and rate of grain filling in some winter and spring wheats. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 71, n. 5, p. 609-617, 1991.

KIEHL, J.T.; HACK, J.J.; BONAN, G.B.; *et al.* Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). **Technical Note, NCAR/TN-420+STR**, Colorado: Boulder, 1996, 152 p.

KERR, R. A. Millennium's hottest decade retains its title, for now. **Science**, V.307, p. 828-829, 2005.

LAGO, I.; STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M.; OLIVEIRA, F.B.; PAULA, G.M. de. Impact of increasing mean air temperature on the development of rice and red Rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1441-1448, 2008.

MARENGO, J.A.; CAMARGO, C.C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. **International Journal of Climatology**, v.28, p.893-904, 2008.

MARQUES, J. R. Q.; STEINMETZ, S.; DINIZ, G.; SIQUEIRA, O.J.; WREGGE, M.S.; HERTER, F.; REISSER JUNIOR, C. Aumento da temperatura mínima do ar no Rio Grande do Sul, sua relação com o aquecimento global e possíveis impactos no arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado, 2005. Vol. 1, p. 224-226.

McINTYRE, S.; McKITRICK, R. Corrections to the Mann et. al. (1998) proxy data base and northern hemispheric average temperature series. **Energy & Environment**, v. 14, n. 6, p. 751-771, 2003.

McINTYRE, S.; McKITRICK, R. The M&M Critique of the MBH98 Northern Hemisphere climate index: update and implications. **Energy & Environment**, v. 16, n.1, p. 69-100, 2005a.

McINTYRE, S.; McKITRICK, R. Hockey sticks, principal components, and spurious significance. **Geophysical Research Letters**, v. 32, L03710, 2005b.

PAN, D.M. & RANDALL, D. A. A Cumulus Parameterization with a Prognostic Closure. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.124, p.949-981, 1998.

PENG, S.; HUANG, J.; SHEEHY, J.E.; LAZA, R.C.; VISPERAS, R.M.; ZHONG, X.; CENTENEO, G.S.; KHUSH, G.S.; CASSMAN, K.G. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. **National Academy of Sciences of the USA**, v. 101, n. 27, p. 9971-9975, 2004.

QIAN B., JONG R., YANG J., Wang H., GAMEDA S. Comparing simulated crop yields with observed and synthetic weather data. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2011. V.151, p.1781-1791. Disponível em: <doi:10.1016/j.agrformet.2011.07.016>.

ROECKNER, E., 2005. IPCC DDC AR4 ECHAM5/MPI-OM SRESA1B run1. **World Data Center for Climate. CERA-DB "EH5_MPI_OM_SRESA1B_1**. Disponível em: < http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Compact.jsp?acronym=EH5_MPI_OM_SRESA1B_1>.

SANSIGOLO, C.A.; KAYANO, M.T. Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in Southern Brazil for the 1913-2006 period. **Theoretical and Applied Climatology**, v.101, p.209-216, 2010.

SIQUEIRA, O.J.W.; STEINMETZ, S.; SALLES, L. A. B. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A.; CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. EMBRAPA: Jaguariúna, SP, 2001. p. 33-63.

STEINMETZ, S.; PINHEIRO, M.J.; FERREIRA, J.S.A.; DEIBLER, A.N. Aumento da temperatura mínima do ar na região de Pelotas, sua relação com o aquecimento global e possíveis conseqüências para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM. (Trabalho completo).

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. Incorporating a chronology response into prediction of leaf appearance rate in winter wheat, **Annals of Botany**, v. 92, p. 181-190, 2003a.

STRECK, N. A.; WEISS, A.; XUE, Q.; BAENZIGER, S. Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, p. 139-150, 2003b.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 424-433, 2006 .

STRECK, N. A.; GABRIEL, L. F.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; PAULA, G. M. Variabilidade interdecadal na série secular de temperatura do ar em Santa Maria, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.781-790. 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artemed, 5ª ed. 2013. 918p.

TAO, F.; YOKOZAWA, M.; XU, Y.; HAYASHI, Y.; ZHANG, Z. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 138, n. 1-4, p. 82–92, 2006.

THOMAS, A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 102, n. 2-3, p. 71-81, 2000.

Von STORCH, H. et al. Reconstructing Past Climate from Noisy Data. **Science**, Washington, v. 306, p. 679-682, out. 2004.

WALTER, L.C. **Simulação do rendimento de grãos de arroz irrigado em cenários de mudança climática**. 2010. 68p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010a.

WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A., FERRAZ, S.E T., CERA, J.C. Mudanças climáticas e seus efeitos no rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.12, p.915-924, 2014.

APÊNDICE A – SOME PARAMETERS AND CARDINAL TEMPERATURES OF SOYSIM MODEL

We did some sensible tests in some parameters inside the model, that was the R_{\max} (maximum development rate (d^{-1})): RMAXINITEMGV1 (Initial R_{\max} for development rate from emergence to V1), RMAXINITVSTG (Initial R_{\max} for node appearance), RMAXINITV0R0 (Initial R_{\max} for development rate from V0 to R0), RMAXINITR0R1 (Initial R_{\max} for development rate from R0 to R1), RMAXINITR1R5 (Initial R_{\max} for development rate from R1 to R5), RMAXINITR1R7 (Initial R_{\max} for development rate from R1 to R7) and RMAXINITR7R8 (Initial R_{\max} for development rate from R7 to R8). But just the parameters RMAXINITEMGV1, RMAXINITV0R0 and RMAXINITR7R8 responded to changes and we can observe changes in phenology.

The phenology part inside the SoySim model is from the SOYDEV model and their cardinal temperatures are different for each phase (Table 1).

Cardinal temperatures used in the SoySim. T_{\min} =temperature below which the development rate is zero ($^{\circ}\text{C}$), T_{opt} = temperature at which the development rate is optimal ($^{\circ}\text{C}$), T_{\max} = temperature above which the development rate is zero ($^{\circ}\text{C}$).

Phase	T_{\min} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{opt} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)
Emergence-V ₁	5.0	31.5	45.0
Emergence-V ₀	5.0	31.5	45.0
V ₁ -V _n	7.6	31.0	45.0
V ₀ -R ₀	-	-	-
R ₀ -R ₁	7.0	32.4	41.9
R ₁ -R ₅	3.6	25.0	40.0
R ₁ -R _{3.5}	3.6	25.0	40.0
R ₁ -R ₇	0.0	21.5	38.7

APÊNDICE B – DETALHES E PARAMETRIZAÇÕES UTILIZADAS PARA GERAR OS DOIS MODELOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Modelagem numérica

Para realizar as simulações de clima futuro foi utilizado o modelo RegCM (Giorgi et al., 1993 a-b). A primeira versão do modelo, RegCM1, foi desenvolvido em 1989 e, desde então, sofreu grandes atualizações em 1993 (RegCM2), 1999 (RegCM2.5), 2006 (RegCM3) e, mais recentemente, 2010 (RegCM4). Ele pode ser aplicado a qualquer região do mundo, com espaçamento da grade de até cerca de 10 km (limite hidrostático), e para uma ampla gama de estudos, desde estudos do processo de paleoclima e simulação do clima futuro, através de downscaling dinâmico.

Para descrever os processos de interação solo-planta-atmosfera o RegCM utiliza o esquema BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme; Dickinson et al. 1993). Este esquema considera a presença de vegetação e a interação com o solo nas trocas turbulentas de momento, energia e vapor d'água entre a superfície e atmosfera. Atualmente, o BATS possui uma camada de vegetação, uma de neve e três camadas de solo em diferentes profundidades: uma de 10 cm de espessura, uma na zona de raiz (2 m de espessura) e uma de solo profundo (3 m de espessura). Na presença de vegetação, as temperaturas do ar no dossel e na folhagem são diagnosticadas através do balanço de energia. O ciclo hidrológico é obtido através de equações de previsão do conteúdo de água nas três camadas de solo. Os fluxos de calor, vapor d'água e momento na superfície são calculados em função dos coeficientes de arrastos obtidos da teoria da similaridade aplicada à camada superficial. Os transportes turbulentos de calor, momento e umidade na camada limite planetária (CLP) resultam do produto entre o gradiente vertical destas variáveis e o coeficiente de difusão vertical turbulenta com correções para turbulência não local propostas por Holtslag et al. (1990).

Para a transferência radiativa o RegCM utiliza o mesmo esquema de Kiehl et al., (1996). Neste esquema são calculadas separadamente as taxas de aquecimento e fluxos na superfície para a radiação solar e infravermelho sob condições de céu claro e nublado. Os cálculos de transferência radiativa consideram os efeitos dos gases CO₂, H₂O, O₃ no infravermelho e dos gases CO₂, H₂O, O₃ e O₂ para radiação solar.

Os processos úmidos no RegCM são resolvidos através de um esquema para a convecção em cúmulos profundo e outro para a precipitação na escala da grade. Os esquemas de cúmulos disponíveis estão descritos a seguir.

Parametrizações de cúmulus

A convecção cúmulus tem um papel essencial na circulação atmosférica geral. Os MCGs (Modelos Climáticos Globais), por terem uma resolução horizontal na ordem de centenas de quilômetros ou mais, não conseguem resolver as nuvens cúmulus, que tem diâmetros na ordem de 1-10 km. A representação dos cúmulus em termos de sub-grade é chamada parametrização de cúmulus.

A reprodução da circulação atmosférica em modelos numéricos é extremamente sensível a formulação da parametrização cúmulus (Pan e Randall, 1998). Em termos gerais, a convecção cúmulus modifica os campos de temperatura e umidade de grande escala através do desentranhamento e subsidência induzida pelos cúmulos no ambiente. O desentranhamento causa esfriamento e umedecimento da grande escala e a subsidência induzida pelos cúmulus causa aquecimento e secamento da grande escala (Arakawa e Shubert, 1974).

Existem diversos esquemas desenvolvidos para a parametrização de cúmulos atualmente, neste trabalho foi utilizado os esquemas Grell (Grell, 1993) com fechamento Arakawa e Schubert.

O esquema Grell

O esquema Grell considera a nuvem como duas circulações em equilíbrio, uma ascendente e outra descendente. Não há entranhamento lateral, somente na parte superior e inferior da nuvem, sendo o fluxo de massa constante no interior. A advecção de calor e umidade na nuvem é determinada pelo entranhamento e pelo fluxo de massa (Equação 1). Este esquema começa a funcionar quando uma parcela de ar é levantada e atinge o Nível de Condensação por Levantamento (NCL) tornando-se saturada. Assim, a condensação na corrente ascendente é calculada pelo levantamento de uma parcela saturada. Na corrente descendente o fluxo de massa depende da corrente ascendente, já que o fluxo de massa deve se manter constante dentro da nuvem.

$$m_0 = \frac{\beta l_1}{l_2} m_b \quad (1)$$

- m_0 é o fluxo de massa na corrente descendente;
- m_b é o fluxo de massa na corrente ascendente;

- l_1 é a condensação corrente ascendente;
 - l_2 é a evaporação corrente descendente;
 - β é a fração de condensação corrente ascendente que evapora na corrente descendente.
- β depende do cisalhamento do vento e varia entre 0,3 e 0,5.

A precipitação é descrita pela equação 2:

$$P^{cu} = l_1 m_b (1 - \beta) \quad (2)$$

Duas hipóteses de fechamento podem ser utilizadas: Arakawa e Schubert - AS (ARAKAWA & SCHUBERT, 1974) e Fritsch e Chappell - FC (FRITSCH & CHAPPELL, 1980).

As hipóteses adotadas pelos esquemas tratam da modulação da convecção pelo ambiente, que é o controle dinâmico na parametrização Grell (1993), da modulação do ambiente pela convecção (feedback) e do controle estático, ou seja, do modelo de nuvem usado para determinar as suas propriedades termodinâmicas.

A figura 1 é a base do fechamento de AS, neste fechamento é assumido que numa certa área há três tipos de nuvens: nuvens rasas na camada limite planetária (CLP), nuvens profundas originadas na CLP e nuvens profundas originadas acima da CLP, no entanto em quantidades pequenas de modo a cobrir apenas uma pequena área da grande escala.

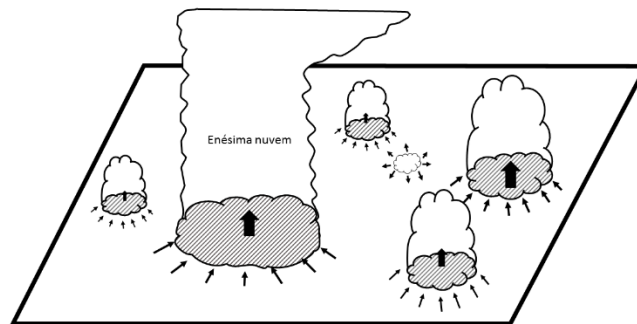


Figura 1 – Área unitária horizontal em um nível entre a base e o topo da nuvem. As nuvens mais altas são mostradas penetrando neste nível e entranhando ar ambiente. A nuvem que tem perda de empuxo é mostrada desentranhando ar da nuvem para o ambiente - adaptado de Arakawa e Schubert, 1974.

No fechamento AS assume-se que as nuvens convectivas estabilizam o ambiente tão rápido quanto os processos não-convectivos desestabilizam.

$$m_b = \frac{ABE'' - ABE}{NA \Delta t} \quad (3)$$

- ABE é a energia disponível para a convecção;

- ABE'' é a energia disponível para a convecção gerada por processos não convectivos durante o intervalo de tempo Δt ;
- NA é a energia disponível para a convecção gerada por processos não convectivos.

A diferença $ABE'' - ABE$ pode ser pensada como a taxa de desestabilização ao longo do tempo Δt . ABE'' é calculado a partir dos campos atuais mais as futuras tendências resultantes da advecção de calor e umidade e o ajuste pela adiabática seca.

A diferença fundamental entre as duas hipóteses é que o fechamento AS relaciona os fluxos convectivos e precipitação às tendências no estado da atmosfera, enquanto que o fechamento FC relaciona os fluxos convectivos com o grau de instabilidade na atmosfera. Ambos os esquemas tendem a alcançar um equilíbrio estatístico entre convecção e os processos de grande escala.

Dados utilizados

Dados de superfície

A topografia e tipos de cobertura de solo usadas nas simulações do modelo RegCM4 utilizam arquivos globais com uma resolução espacial de um quilômetro e são fornecidos pelo United States Geological Survey (USGS) e pelo Global Land Cover Characterization (GLCC) que interpolados com o RegCM4 fornecem as condições de fronteira sobre o continente.

Dados dos cenários

Foram utilizados dois cenários de mudança climática, sendo um baseado no cenário SRES-A1B (CMIP 3 – Climate Model Intercomparison Project 3) do 4º relatório do IPCC (IPCC, 2007). Para este cenário as condições de contorno e CO_2 foram as da rodada do modelo global ECHAM5 (ROEKNER, 2005) que foi regionalizado utilizando a técnica de downscaling dinâmico (HOSTETLER et al., 2011) a partir de rodadas do modelo RegCM3 (Regional Climate Model versão 3, PAL et al., 2007). O cenário SRES-A1B (CMIP3) é intermediário entre os cenários mais pessimistas (A1, A2) e os mais otimistas (B1, B2) do 4º relatório do IPCC. A concentração de CO_2 inicia com cerca de 300 ppm em 1960 e se estende até 700 ppm por volta de 2100.

O outro cenário de mudança climática utilizado é o cenário RCP4.5 (CMIP5) do 5º relatório internacional do IPCC (IPCC, 2013). As condições de contorno e CO_2 foram as da rodada do modelo global HadGEM2-ES (JONES et al., 2011) e foi regionalizado por downscaling dinâmico

(HOSTETLER et al., 2011) a partir de rodadas do modelo RegCM4 (Regional Climate Model versão 4). O cenário RCP4.5 também é um cenário intermediário dentre os cenários apresentados no 5º relatório, sendo próximo ao cenário B1 do 4º relatório do IPCC (IPCC, 2007), com a concentração de CO₂ em torno de 300 ppm em 1960 e se estende até 538 ppm por volta de 2100 (IPCC, 2013).

As variáveis meteorológicas e oceânicas utilizadas para rodar o modelo regional, oriundas destes dois cenários são: temperatura do ar e do mar (essa apenas em superfície), altura geopotencial, vento zonal, vento meridional e umidade relativa em 18 níveis verticais de pressão. Estes dados possuem resolução espacial de 2,5° e resolução temporal de 6 horas (00:00, 06:00, 12:00, 18:00).

As variáveis extraídas do modelo regional e utilizadas nos modelos agrícolas foram:

Sunshine - duração de horas de Sol

Evapotranspiração - em (kg/m² dia)

Umidade relativa - em (%)

Precipitação - em (kg/m² dia)

Temperatura Máxima - a 2 metros em (k)

Temperatura Mínima - a 2 metros em (k)

Grade utilizada para rodar o modelo

Na figura 2 é possível observar a grade na qual o modelo foi rodado. A área marcada representa a região em que os dados foram extraídos.

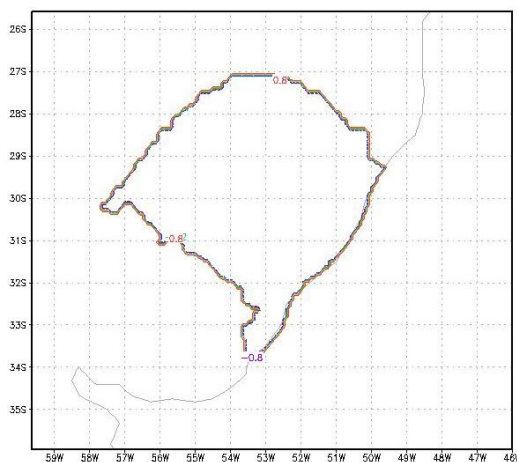
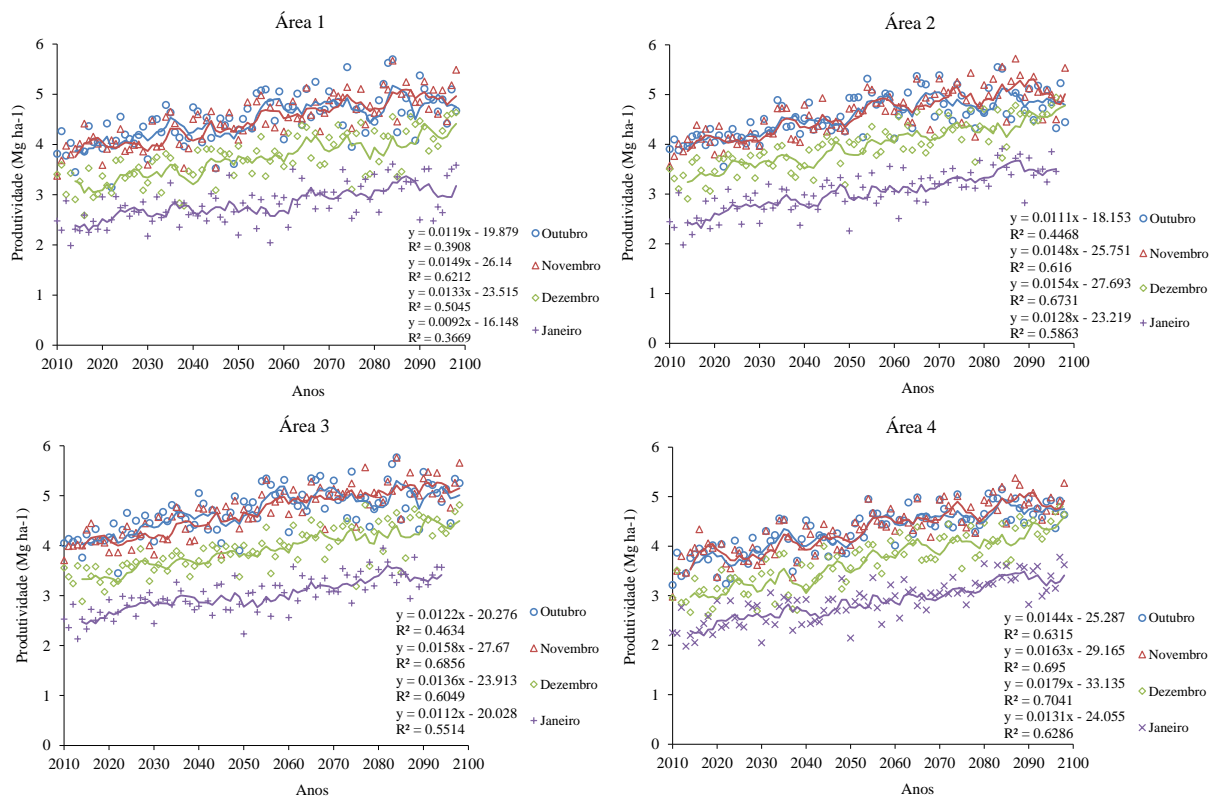
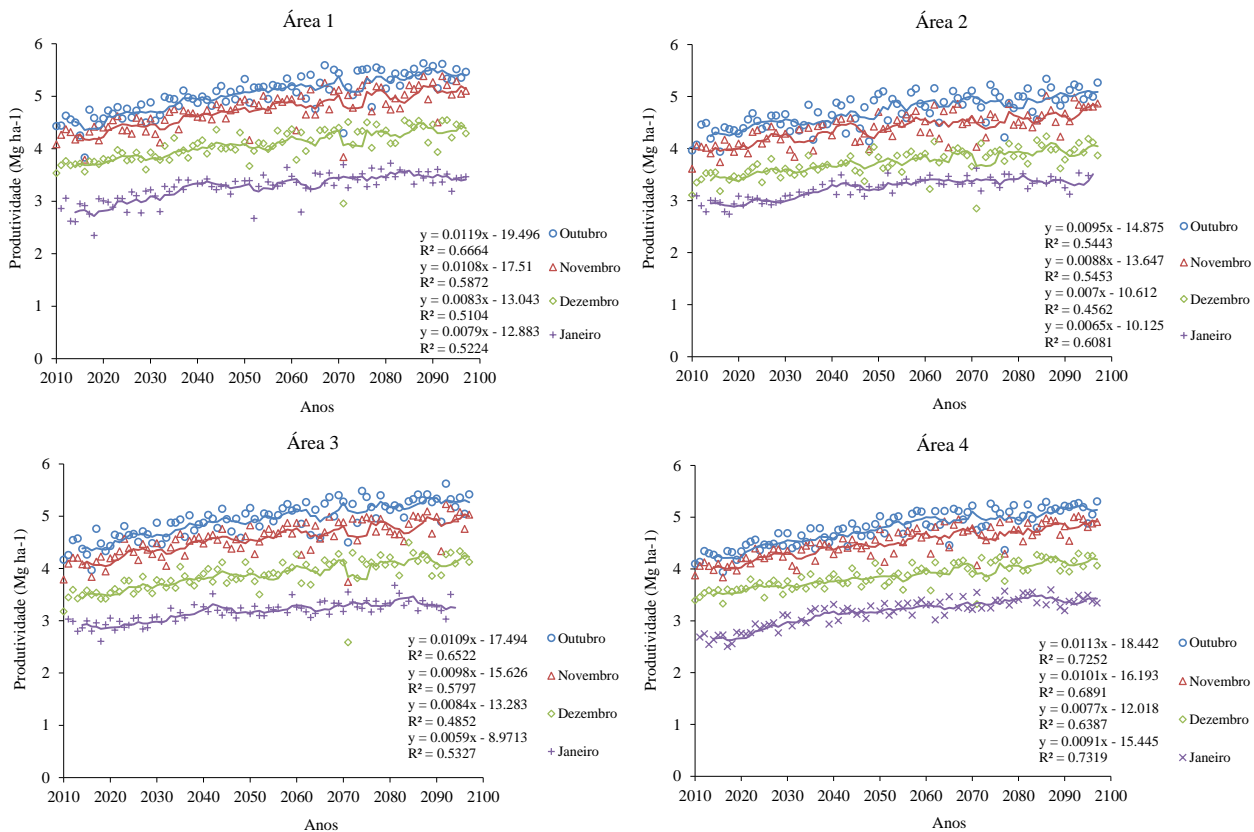


Figura 2 – A área marcada representa a região em que os dados para rodar o modelo foram extraídos.

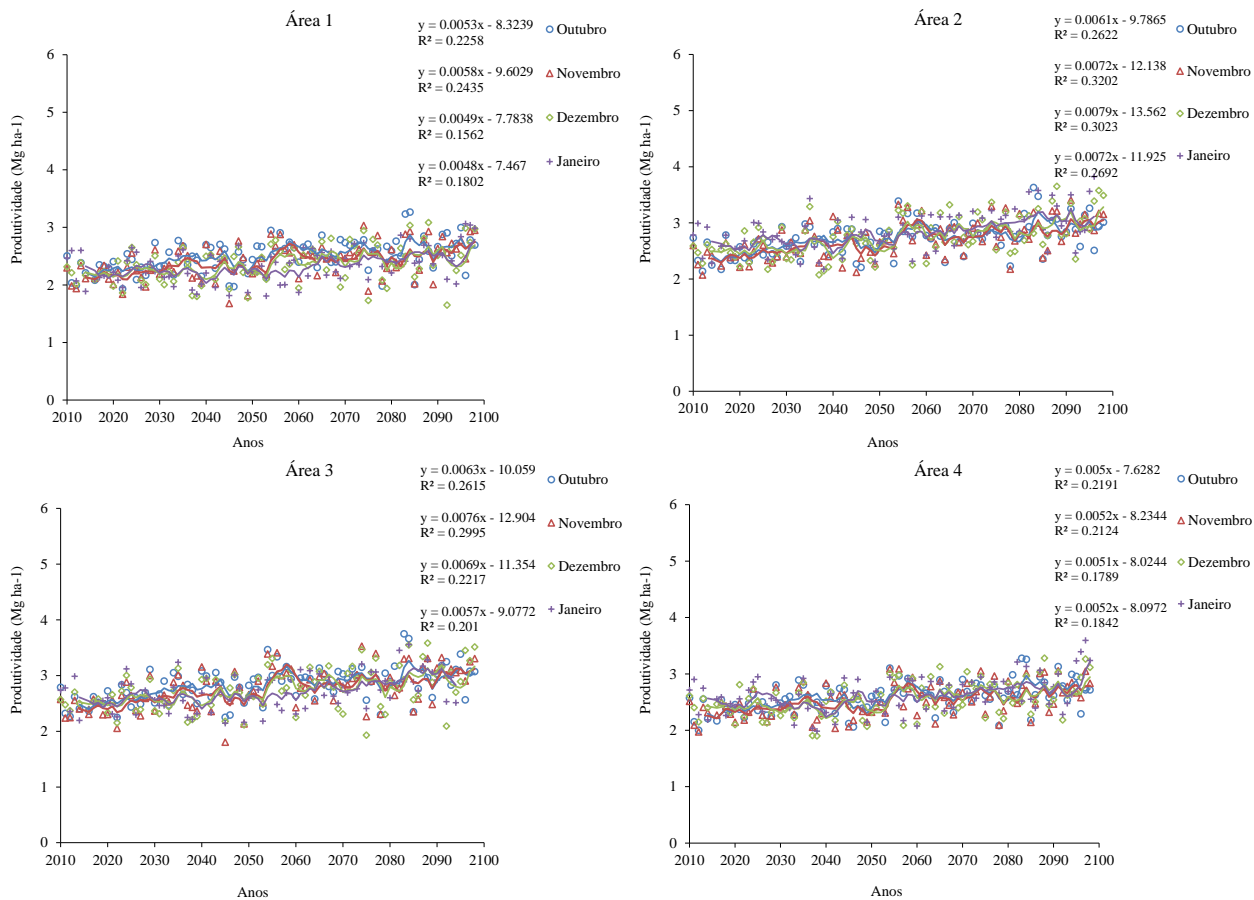
APÊNDICE C – TENDÊNCIA DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE SOJA EM QUATRO ÁREAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (ÁREA 1, 2 E 3 REPRESENTAM AS ÁREAS COM MAIOR ÁREA CULTIVADA COM SOJA E A ÁREA 4 REPRESENTA A ÁREA DE MAIOR PRODUTIVIDADE DE SOJA ATUALMENTE NO ESTADO) EM QUATRO DATAS DE SEMEADURA (01/10, 01/11, 01/12 E 01/01) SIMULADAS PELO MODELO SOYSIM NO PERÍODO DE 2010-2099 DO CENÁRIO SRES A1B (CMIP3)



APÊNDICE D – TENDÊNCIA DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE SOJA EM QUATRO ÁREAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (ÁREA 1, 2 E 3 REPRESENTAM AS ÁREAS COM MAIOR ÁREA CULTIVADA COM SOJA E A ÁREA 4 REPRESENTA A ÁREA DE MAIOR PRODUTIVIDADE DE SOJA ATUALMENTE NO ESTADO) EM QUATRO DATAS DE SEMEADURA (01/10, 01/11, 01/12 E 01/01) SIMULADAS PELO MODELO SOYSIM NO PERÍODO DE 2010-2099 DO CENÁRIO RCP4.5 (CMIP5)



APÊNDICE E – TENDÊNCIA DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE SOJA EM QUATRO ÁREAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (ÁREA 1, 2 E 3 REPRESENTAM AS ÁREAS COM MAIOR ÁREA CULTIVADA COM SOJA E A ÁREA 4 REPRESENTA A ÁREA DE MAIOR PRODUTIVIDADE DE SOJA ATUALMENTE NO ESTADO) EM QUATRO DATAS DE SEMEADURA (01/10, 01/11, 01/12 E 01/01) SIMULADAS PELO MODELO CROPGRO-SOYBEAN NO PERÍODO DE 2010-2099 DO CENÁRIO SRES A1B (CMIP3)



APÊNDICE F – TENDÊNCIA DA PRODUTIVIDADE DE SOJA LIMITADA POR ÁGUA EM QUATRO ÁREAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (ÁREA 1, 2 E 3 REPRESENTAM AS ÁREAS COM MAIOR ÁREA CULTIVADA COM SOJA E A ÁREA 4 REPRESENTA A ÁREA DE MAIOR PRODUTIVIDADE DE SOJA ATUALMENTE NO ESTADO) EM QUATRO DATAS DE SEMEADURA (01/10, 01/11, 01/12 E 01/01) SIMULADAS PELO MODELO CROPGRO-SOYBEAN NO PERÍODO DE 2010-2099 DO CENÁRIO SRES A1B (CMIP3)

