

Modelagem numérica para previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul

Michel Rocha da Silva⁽¹⁾, Nereu Augusto Streck⁽²⁾, Simone Erotildes Teleginski Ferraz⁽³⁾, Giovana Ghisleni Ribas⁽⁴⁾, Ary José Duarte Júnior⁽⁵⁾, Moisés de Freitas do Nascimento⁽⁵⁾, Cleber Maus Alberto⁽⁶⁾ e Geter Alves Machado⁽⁶⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Avenida Roraima, nº 1.000, Camobi, CEP 97105-900 Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: michelrs@live.com ⁽²⁾UFSM, Departamento de Fitotecnia, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: nstreck2@yahoo.com.br ⁽³⁾UFSM, Departamento de Física, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: simonette@gmail.com ⁽⁴⁾UFSM, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: giovana.ghisleni@hotmail.com ⁽⁵⁾UFSM, Curso de Agronomia, Santa Maria, RS, Brasil. E-mail: ary.duarte@gmail.com, moises.fn@gmail.com ⁽⁶⁾Universidade Federal do Pampa, Campus Itaqui, Curso de Agronomia, Rua Luiz Joaquim de Sá Britto, s/nº, Promorar, CEP 97650-000 Itaqui, RS, Brasil. E-mail: cleberalberto@unipampa.edu.br, geteralves@yahoo.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar um método de previsão de safra de arroz irrigado por inundação para o Rio Grande do Sul, por meio do modelo SimulArroz e do modelo climático regional RegCM4. Dados diários de temperatura mínima, temperatura máxima e radiação solar, simulados a partir de nove membros do modelo RegCM4, foram usados como dados de entrada no modelo SimulArroz para previsão de safra. Para testar o desempenho da previsão de safra, experimentos foram realizados durante o ano agrícola 2013/2014, nos municípios de Restinga Seca e Itaqui, RS, onde foi avaliada a variável produtividade de grãos. A produtividade de grãos observada variou de 6.898 a 10.272 kg ha⁻¹, e a produtividade de grãos prevista variou de 2.853 a 9.636 kg ha⁻¹. As previsões de produtividade de grãos de arroz, geradas pelos membros 31, 19, 13 e 01, apresentaram raiz do quadrado médio do erro de 1.218, 1.134, 1.354 e 1.374 kg ha⁻¹, respectivamente. A previsão de safra de arroz irrigado por inundação para o Rio Grande do Sul pode ser realizada por meio do modelo SimulArroz, ao se utilizar, como dados meteorológicos de entrada, a previsão climática sazonal obtida com o modelo RegCM4.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, produtividade, RegCM4, simulação, SimulArroz.

Numerical modeling for yield forecast of flooded rice in the state of Rio Grande do Sul, Brazil

Abstract – The objective of this work was to evaluate a method of yield forecast for flooded rice in the state of Rio Grande do Sul (RS), Brazil, using the SimulArroz rice model and the RegCM4 regional climate model. Daily data of minimum temperature, maximum temperature, and solar radiation, simulated from nine members of the RegCM4 model, were used as input data to the SimulArroz model for rice yield forecast. To test the yield forecast performance, field experiments were carried out during the 2013/2014 growing season, in the municipalities of Restinga Seca and Itaqui, RS, Brazil, where grain yield was evaluated. The observed rice grain yield ranged from 6,898 to 10,272 kg ha⁻¹, while the predicted one ranged from 2,853 to 9,636 kg ha⁻¹. The rice grain yield forecasts, generated by members 31, 19, 13, and 01, had a root mean square error of 1,218, 1,134, 1,354, and 1,374 kg ha⁻¹, respectively. Flooded rice yield forecast for the state of Rio Grande do Sul can be made through the SimulArroz model, using, as input meteorological data, the seasonal climate forecast obtained with the RegCM4 model.

Index terms: *Oryza sativa*, yield, RegCM4, simulation, SimulArroz.

Introdução

No Brasil, o arroz apresenta grande importância econômica e social, em que os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina são responsáveis por 70% da produção (Reunião..., 2014). Assim, uma previsão de safra precisa e confiável é necessária para a produção de arroz.

Atualmente, o monitoramento e a previsão de safra de arroz no Brasil são realizados por meio de entrevistas com agricultores, feitas por Técnicos Agrícolas e Engenheiros Agrônomos, sobre a produtividade esperada (Monteiro et al., 2013). Em outros países, além desse método das entrevistas, modelos mecanísticos são utilizados como ferramentas complementares para a previsão de safra, pois são capazes de descrever as

complexas interações em agroecossistemas e prever a produtividade das culturas (Hoogenboom, 2000). Por exemplo, o estado da Flórida nos Estados Unidos, utiliza modelos mecanísticos acoplados a modelos climáticos regionais, para gerar a previsão de safra de milho e de amendoim (Shin et al., 2006; Shin et al., 2010).

Para a cultura do arroz, há modelos mecanísticos mais complexos para a simulação de produtividade de grãos, como o Ceres-Rice (Singh et al., 1993) e o Oryza2000 (Bouman et al., 2001), e outros mais simples, como o InfoCrop (Aggarwal et al., 2006). Esses modelos foram desenvolvidos para simular o desenvolvimento da cultura do arroz em ecossistemas asiáticos e, por este motivo, suas utilizações podem ser inviáveis para o Rio Grande do Sul, RS. Com o objetivo de suprir essa necessidade, desenvolveu-se o SimulArroz, um modelo mecanístico baseado em processos para simular o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade de grãos de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Rosa et al., 2015). Este modelo reúne as características necessárias para ser usado em uma plataforma de previsão de safra, pois considera práticas de manejo predominantes nas lavouras de arroz no Estado.

Um sistema de previsões sazonais de precipitação e temperatura foi implantado para o Rio Grande do Sul, pelo Grupo de Pesquisas em Clima, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com uso do modelo climático regional RegCM4 (Giorgi et al., 2012). O modelo RegCM4 gera dados meteorológicos diários, o que é pré-requisito para a acoplagem de modelos climáticos a modelos agrícolas.

Com base neste novo cenário de previsão sazonal, o acoplamento do modelo SimulArroz ao modelo climático é mais realista e, consequentemente, a previsão de safra pode ser mais precisa, ao utilizar a atual previsão do tempo, que é realizada para 5 a 7 dias, aliada à previsão sazonal, que é realizada para 3 meses. Com a previsão de safra de arroz mais precisa e confiável, os produtores e tomadores de decisão terão uma ferramenta para mitigação de riscos – antes da e durante a – estação de crescimento do arroz.

O objetivo deste trabalho foi avaliar um método para a previsão de safra de arroz irrigado por inundação para o Estado do Rio Grande do Sul, por meio do modelo SimulArroz e do modelo climático regional RegCM4.

Material e Métodos

O modelo utilizado para a simulação da produtividade de arroz foi o SimulArroz (Rosa et al., 2015), versão 1.0 (Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS). O SimulArroz é um modelo mecanístico baseado em processos, desenvolvido pelo Grupo de Agrometeorologia da UFSM, para simular a produtividade de arroz irrigado no sistema por inundação, no Estado do Rio Grande do Sul. O SimulArroz é resultado de dois modelos anteriores de arroz, o Oryza2000 (Bouman et al., 2001) e o InfoCrop (Aggarwal et al., 2006), e parte do código fonte foi desenvolvido para adaptar o modelo às cultivares de arroz do Rio Grande do Sul, o que diferencia o SimulArroz dos outros simuladores (Walter et al., 2012; Rosa et al., 2015). O SimulArroz estima os principais processos ecofisiológicos de um cultivo de arroz no tempo de um dia, como a acumulação de biomassa de raízes, folhas, caule e panículas, o desenvolvimento da cultura, com uso da escala de Counce et al. (2000), e a emissão de folhas, com a escala de Haun (1973). Na versão 1.0, o SimulArroz simula a produtividade potencial da cultura e a produtividade em três níveis tecnológicos da lavoura (alto, médio e baixo) (Figura 1).

O modelo utilizado para a simulação de dados diários de previsão climática foi o modelo climático regional RegCM4, que foi desenvolvido para ser aplicável a qualquer região do Planeta (Pal et al., 2007). Este modelo utiliza como condições de fronteira as previsões climáticas sazonais elaboradas pelo Centro Nacional de Previsão Ambiental (NCEP), acoplado ao sistema de previsão climática versão 2 (CFSv2) por meio da técnica de refinamento, com periodicidade de seis horas (Giorgi et al., 2012), o que é suficiente para alimentar com dados diários o modelo SimulArroz. O modelo RegCM4 apresenta uma grade mais refinada do que os modelos de circulação geral (MCG), e tem sido utilizado para simular os movimentos de pequena escala, como as nuvens cumulus (Giorgi et al., 2012). Em termos gerais, a convecção cumulus modifica a temperatura e a umidade de grande escala, por meio do desentranhamento e subsidência induzidos pelas nuvens cumulus no ambiente, que geram o aquecimento e o resfriamento em grande escala (Arakawa & Schubert, 1974). No presente trabalho, para a parametrização de cumulus, utilizaram-se os esquemas Grell (Grell, 1993), MIT-Emanuel (Emanuel, 1991) e a convecção mista, tendo-se caracterizado nove membros (01, 07, 10, 13,

19, 22, 31, 34 e 37) com diferentes parametrizações de convecção cumulus (Tabela 1).

Dados diários, simulados a partir do modelo regional RegCM4 de temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$), temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) e radiação solar (MJ m^{-2} por dia) foram fornecidos pelo Grupo de Pesquisas em Clima da UFSM. Para cada mês, foram geradas quatro previsões para cada um dos nove membros (Tabela 2). Para o mês de setembro de 2013, por exemplo, houve simulações que se iniciaram em junho de 2013, nos dias 05 (iniciação 1), 17 (iniciação 2), 23 (iniciação 3) 30 (iniciação 4). Sempre que possível, procurou-se manter a data inicial de cada simulação no início da semana.

Para testar o desempenho do modelo RegCM4, acoplado ao modelo SimulArroz, para previsão de safra de arroz no Rio Grande do Sul, realizaram-

se experimentos durante o ano agrícola 2013/2014, em cinco lavouras comerciais de arroz irrigado por inundação. Três experimentos foram conduzidos no Município de Restinga Seca ($29^{\circ}42'48''\text{S}$, $53^{\circ}18'19''\text{W}$, à altitude de 40 m), região orizícola da Depressão Central, e dois experimentos no Município de Itaqui ($29^{\circ}09'44''\text{S}$, $56^{\circ}33'51''\text{W}$, à altitude de 63 m), região orizícola da Fronteira Oeste (Tabela 3). As lavouras arroseiras, em Restinga Seca, são predominantemente de áreas inferiores a 100 ha e, em Itaqui, predominantemente acima de 100 ha.

O solo das lavouras em Restinga Seca é um Argissolo Amarelo alítico típico, da Unidade de Mapeamento Santa Maria, e o solo das lavouras em Itaqui é um Plintossolo Háplico (Santos et al., 2006). Em ambos os locais, o clima é do tipo Cfa – subtropical úmido, com verões quentes e sem estação seca definida –,

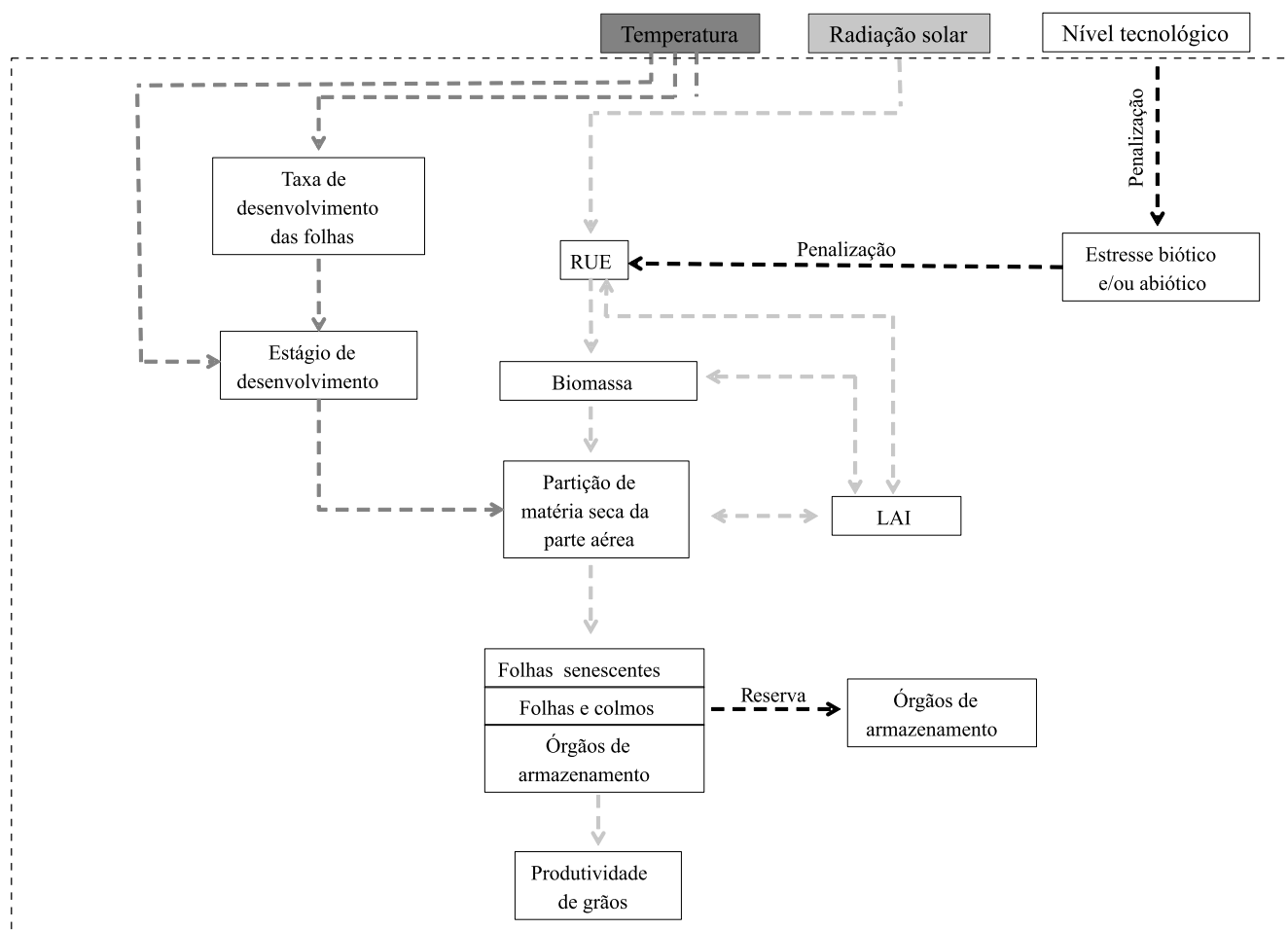


Figura 1. Fluxograma do modelo SimulArroz, com as variáveis de entrada, fora do quadro e com linha pontilhada, e os principais processos de crescimento e desenvolvimento, dentro do quadro e com linha pontilhada, que definem a produtividade de grãos da cultura do arroz. RUE, eficiência de uso da radiação; LAI, índice de área foliar.

segundo a classificação de Köppen-Geiger. O nível tecnológico das lavouras foi definido pelo critério de expectativas de rendimento em cada lavoura, com base no sistema de cultivo (sistemizado ou em taipas com curvas de nível), nível de fertilidade do solo (Tabela 4), semeadura dentro do período preferencial e incidência de doenças, pragas e plantas daninhas. A semeadura foi realizada em sistema de cultivo mínimo nas lavouras

1 e 2, em Itaqui, e 1 e 2, em Restinga Seca, e sob semeadura direta na lavoura 3, em Restinga Seca (Tabela 3), com espaçamento entre linhas de 0,17 m, nas cinco lavouras.

Cada lavoura foi dividida em quatro quadrantes, tendo-se seguido o método utilizado por Gabriel et al. (2014), em que cada quadrante foi considerado uma repetição. O tamanho dos quadrantes foi de 750, 1.750 e 4.000 m², para as lavouras 1, 2 e 3, respectivamente,

Tabela 1. Esquemas de parametrização cumulus (membros), utilizados na previsão sazonal do modelo RegCM4.

Membro	Descrição	ICUP	Grell param. mínimo	PECA	PECA máximo
01	Emanuel	4	-	-	-
07	Grell FC	2	Seco	0,25	1,00
10	Emanuel terra – Grell FC oceano	98	Seco	0,25	1,00
13	Emanuel oceano – Grell FC terra	99	Seco	0,25	1,00
19	Emanuel terra – Grell FC oceano	98	Úmido	0,25	0,50
22	Emanuel oceano – Grell FC terra	99	Úmido	0,25	0,50
31	Emanuel oceano – Grell AS terra	99	Seco	0,25	1,00
34	Grell AS	2	Úmido	0,25	0,50
37	Emanuel terra – Grell AS oceano	98	Úmido	0,25	0,50

ICUP, parâmetro que define o tipo de esquema de parametrização adotado. Grell param., parâmetro do esquema Grell, que permite controlar a fração da precipitação evaporada na corrente descendente; PECA, precipitação evaporada na corrente ascendente. Seco, tem-se PECA entre 0,25 e 1,0, o que aumenta a fração de evaporação. Úmido, tem-se PECA entre 0,25 e 0,50, o que diminui a fração de evaporação.

Tabela 2. Data de início de cada simulação, período de estabilização (mês) e período da previsão (mês), gerados pelo modelo climático regional RegCM4.

Início da rodada	Período de estabilização	Período da previsão	Início da rodada	Período de estabilização	Período da previsão
05/06/2013	06 e 07	08, 09, 10	05/11/2013	11 e 12	01, 02, 03
17/06/2013	06 e 07	08, 09, 10	24/11/2013	11 e 12	01, 02, 03
23/06/2013	06 e 07	08, 09, 10	01/12/2013	12 e 01	02, 03, 04
30/06/2013	06 e 07	08, 09, 10	08/12/2013	12 e 01	02, 03, 04
14/07/2013	07 e 08	09, 10, 11	16/12/2013	12 e 01	02, 03, 04
21/07/2013	07 e 08	09, 10, 11	22/12/2013	12 e 01	02, 03, 04
28/07/2013	07 e 08	09, 10, 11	30/12/2013	12 e 01	02, 03, 04
11/08/2013	08 e 09	10, 11, 12	05/01/2014	01 e 02	03, 04, 05
18/08/2013	08 e 09	10, 11, 12	12/01/2014	01 e 02	03, 04, 05
25/08/2013	08 e 09	10, 11, 12	19/01/2014	01 e 02	03, 04, 05
02/09/2013	09 e 10	11, 12, 01	28/01/2014	01 e 02	03, 04, 05
09/09/2013	09 e 10	11, 12, 01	02/02/2014	02 e 03	04, 05, 06
22/09/2013	09 e 10	11, 12, 01	09/02/2014	02 e 03	04, 05, 06
06/10/2013	10 e 11	12, 01, 02	16/02/2014	02 e 03	04, 05, 06
13/10/2013	10 e 11	12, 01, 02	08/04/2014	04 e 05	06, 07, 08
21/10/2013	10 e 11	12, 01, 02	13/04/2014	04 e 05	06, 07, 08
28/10/2013	10 e 11	12, 01, 02	20/04/2014	04 e 05	06, 07, 08

Tabela 3. Data de semeadura e emergência, cultivar ou grupo de maturação e nível tecnológico, observados nas lavouras e utilizados na simulação com o modelo SimulArroz, durante a safra 2013/2014 de arroz irrigado, nos municípios de Restinga Seca e Itaqui, RS.

Local	Data de semeadura	Data de emergência	Cultivar	Nível tecnológico ⁽¹⁾
Observado				
Restinga Seca				
Lavoura 1 (0,3 ha)	10/10/2013	19/10/2013	IRGA 427	Alto
Lavoura 2 (0,7 ha)	10/10/2013	19/10/2013	IRGA 427	Médio
Lavoura 3 (1,6 ha)	26/11/2013	2/12/2013	Puitá-INTA-CI	Médio
Itaqui				
Lavoura 1 (20 ha)	26/11/2013	3/12/2013	IRGA 417	Médio
Lavoura 2 (13 ha)	27/11/2013	3/12/2013	IRGA 417	Alto
Simulado				
Restinga Seca				
Lavoura 1	13/10/2013	19/10/2013	GM Médio	Alto
Lavoura 2	13/10/2013	19/10/2013	GM Médio	Médio
Lavoura 3	28/11/2013	3/12/2013	GM Precoce	Médio
Itaqui				
Lavoura 1	28/11/2013	3/12/2013	IRGA 417	Médio
Lavoura 2	28/11/2013	3/12/2013	IRGA 417	Alto

⁽¹⁾Definido com base no sistema de cultivo (sistemizado ou em taipas com curvas de nível), nível de fertilidade do solo, semeadura dentro do período preferencial e incidência de doenças, pragas e plantas daninhas.

Tabela 4. Caracterização química do solo nas lavouras de arroz irrigado, nos municípios de Restinga Seca e Itaqui, RS.

Parâmetro	Restinga Seca L1	Restinga Seca L2	Restinga Seca L3	Itaqui L1	Itaqui L2
Argila (g kg ⁻¹)	400	320	220	100	140
CTC pH7 (cmol _c dm ⁻³)	13,5	5,8	9,7	18,2	18,4
pH	5,0	4,4	4,9	5,1	5,2
Matéria orgânica (%)	2,1	1,2	2,1	4,9	4,8
P (mg dm ⁻³)	6,8	2,2	9,3	141,0	126,0
K (mg dm ⁻³)	88,0	68,0	88,0	304,0	302,0

em Restinga Seca, e de 5 e 3,25 ha, para as lavouras 1 e 2, respectivamente, em Itaquí. Em cada repetição, avaliou-se a variável produtividade de grãos (kg ha^{-1}) a partir da coleta de panículas, em uma área de 0,5 m^2 por repetição. O material coletado foi levado para secagem em estufa com ventilação forçada, a 60°C, e pesado em uma balança de precisão (0,001 g). A produtividade de cada lavoura foi definida como a média das pesagens das quatro repetições.

Os dados de temperaturas mínima e máxima diárias do ar (°C) e de radiação solar (MJ m^{-2} por dia), geradas pelo modelo RegCM4 para os nove membros, foram utilizadas como dados de entrada no modelo SimulArroz (Figura 1). Utilizaram-se como dados de entrada da cultura do arroz as informações obtidas de cada lavoura, como cultivar ou grupo de maturação, nível tecnológico, data de semeadura e densidade de plantas (Tabela 3). A produtividade prevista pelo modelo SimulArroz, que utilizou como dado de entrada a previsão climática do RegCM4, foi comparada à produtividade medida nas lavouras dos municípios de Restinga Seca e Itaquí.

O desempenho das previsões foi avaliado pelas estatísticas das equações listadas abaixo: raiz do quadrado médio do erro (RQME)

$$\text{RQME} = \left(\sum_{i=1, \dots, n} (Y_i - O_i)^2 \right)^{0.5} / n;$$

raiz do quadrado médio do erro normalizado (RQME_n) conforme Rosa et al. (2015)

$$\text{RQME}_n = 100 \left(\left(\sum_{i=1, \dots, n} (Y_i - O_i)^2 \right) / n \right)^{0.5} / \bar{O};$$

índice de concordância (dw)

$$\text{dw} = 1 - \sum (Y_i - O_i)^2 / \left[\sum (|Y_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|) \right]^2;$$

índice de concordância modificado (dw₁) conforme Willmott et al. (1985)

$$\text{dw}_1 = 1 - \sum (Y_i - O_i) / \sum (|Y_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|);$$

índice “Bias”, Bias = $(\sum Y_i - \sum O_i) / \sum O_i$; e o coeficiente de correlação (r) conforme Samboranza et al. (2013)

$$r = \sum (O_i - \bar{O}_m) \times (Y_i - \bar{Y}_m) / \left\{ \left[\sum (O_i - \bar{O}_m)^2 \right] \times \left[\sum (Y_i - \bar{Y}_m)^2 \right] \right\}^{0.5}$$

em que: O_i são os valores observados; Y_i são os valores simulados; n é o número de observações; $\bar{O}$ é a média de todos os valores; $\bar{O}_m$ é a média dos valores observados; e $\bar{Y}_m$ é a média dos valores simulados.

Resultados e Discussão

A capacidade de previsão do modelo RegCM4 foi maior para as temperaturas mínima ($T_{\text{mín}}$) e máxima ($T_{\text{máx}}$) diárias do que para a radiação solar diária (RSD) (Figura 2). O desvio entre a $T_{\text{mín}}$ prevista e a observada por meio dos nove membros na iniciação 1 foi de até 15°C, em que 40% dos desvios foram próximos de zero e 45% dos desvios próximos de 5°C. Os desvios entre a $T_{\text{máx}}$ prevista e a observada foram de 0 a 20°C. Observou-se que 40% dos dados de $T_{\text{mín}}$ previstos pela iniciação 1 foram menores do que os dados de $T_{\text{mín}}$ observados (Figura 2). Quando as $T_{\text{mín}}$ diárias são mais baixas, aumenta o tempo necessário para que ocorra cada estágio de desenvolvimento no modelo SimulArroz, ou seja, o ciclo de desenvolvimento da cultura será mais longo (Streck et al., 2011). Para a RSD da iniciação 1, o desvio entre o previsto e o observado foi de 0 a 30 MJ m^{-2} por dia, com 20% dos desvios próximos de zero, 40% próximo de 5 MJ m^{-2} por dia, e 20% próximos de 10 MJ m^{-2} por dia. Observou-se que os maiores desvios diários ocorreram entre os valores de RSD previstos e observados, e que 54% dos dados de RSD previstos pelos membros foram menores do que os observados. Para o modelo SimulArroz, a RSD é a principal variável que influencia a taxa de crescimento diária da cultura e a produtividade de grãos, pois permite maior crescimento e melhor utilização da adubação nitrogenada (Walter et al., 2012). Como o modelo SimulArroz é alimentado no tempo de um dia, os erros diários da RSD simulada e observada podem ser dissolvidos ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura.

Os desvios entre a $T_{\text{mín}}$ prevista e observada na iniciação 2 variaram de 0 a 20°C. Cerca de 30% dos desvios se aproximaram de zero, 45% foram próximos de 5°C e 25% próximos de 10°C (Figura 2). Os desvios entre $T_{\text{máx}}$ prevista e observada variaram de 0°C a 25°C. Verificou-se que 56% dos dados de $T_{\text{mín}}$ e 49% dos dados de $T_{\text{máx}}$, previstos pela iniciação 2, foram menores do que os dados observados. O resultado da iniciação 2 acoplada ao SimulArroz foi o de morte de plantas, pela ocorrência de muitos dias consecutivos com a temperatura do ar menor que ou igual à temperatura letal para a planta de arroz, em oito dos nove membros testados. A morte de plantas por frio ocorre no SimulArroz quando ocorrem quatro dias consecutivos com temperatura média do ar inferior a 12°C (Bouman et al., 2001).

Por este motivo, a iniciação 2 não foi utilizada para a previsão de safra.

O desvio entre a $T_{\min}$ prevista e a observada pelos nove membros, na iniciação 3, foi de até 20°C, com

cerca de 30% dos desvios próximos de zero e 40% próximos de 5°C (Figura 2). O desvio entre a $T_{\max}$ prevista e a observada foi de 0 a 25°C. Na iniciação 3, houve a ocorrência de $T_{\min}$ mais baixas do que as

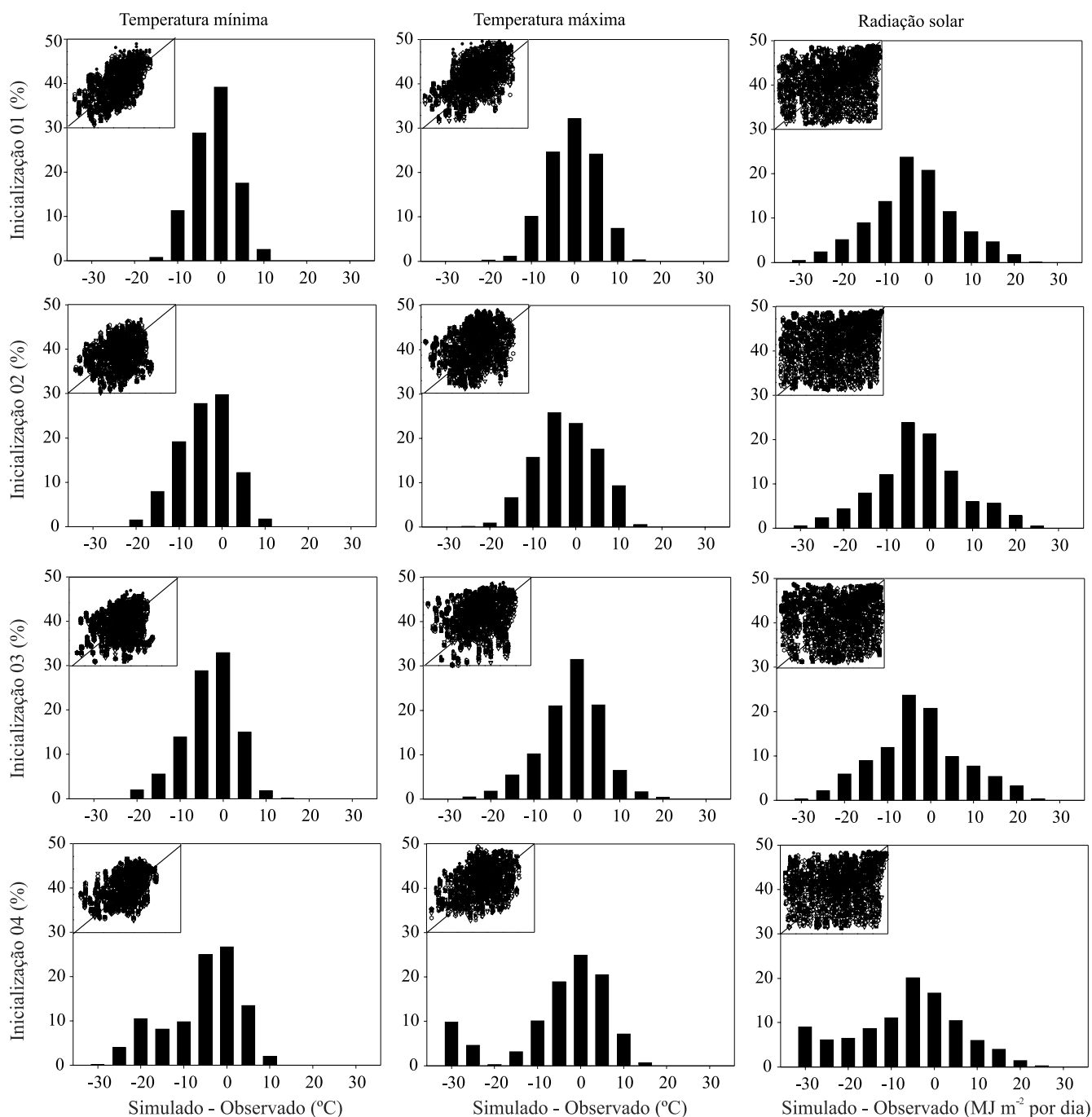


Figura 2. Histograma com desvio entre os dados de temperatura mínima, temperatura máxima e radiação solar, simulados e observados em quatro iniciações semanais (1, 2, 3 e 4) pelo modelo RegCM4, para os municípios de Restinga Seca e Itaquí, RS, durante o período de 1/9/2013 a 30/4/2014.

observadas, em 50% dos dados previstos, e de $T_{mín}$ mais altas do que as observadas, em 17% dos dados previstos. Para a RSD, a iniciação 3 apresentou desvios entre dados previstos e observados de 30 MJ m⁻² por dia. Cerca de 20% dos desvios foram próximos de zero, 35% próximos de 5 MJ m⁻² por dia e 20% próximos de 10 MJ m⁻² por dia. Observou-se que 53% dos dados de RSD previstos pela iniciação 3 foram menores do que os dados observados.

A iniciação 4 não foi acoplada ao SimulArroz, pois se verificou falha de dados nos meses de outubro e novembro (Figura 2). Para a simulação de produtividade de arroz irrigado, com o modelo SimulArroz, é necessário que não existam falhas no arquivo de entrada de dados meteorológicos (Rosa et al., 2015), o que inviabilizou a utilização da iniciação 4.

As médias de produtividade de grãos de arroz, observadas nas lavouras 1, 2 e 3 de Restinga Seca e 1 e 2 de Itaqui, foram de 10.188, 9.717, 8.509, 6.898 e 10.272 kg ha⁻¹, respectivamente. As produtividades previstas pelo SimulArroz e RegCM4 variaram de 2.853 a 9.636 kg ha⁻¹, com coeficientes de correlação que variaram de -0,06 para o membro 34 a 0,78 para o membro 31 (Tabela 5). O desvio médio dos valores de produtividade previstos e observados (BIAS) foi negativo para os nove membros, o que é um indicativo de que a previsão subestima a produtividade de grãos de arroz. O índice de concordância (dw) variou de 0,27

(membro 34) a 0,76 (membro 31), o que é indicativo de que houve membros com baixa capacidade preditiva, enquanto outros apresentaram capacidade preditiva satisfatória, pois, quanto mais próximo de 1 for o índice dw, mais exata será a previsão. O índice de concordância modificado (dw₁) variou de 0,19 (membro 34) a 0,55 (membro 31).

A melhor previsão de produtividade de grãos de arroz foi a do membro 31, que apresentou RQME de 1.218 kg ha⁻¹ (Tabela 5). Os membros 19, 13 e 01 apresentaram valores de RQME próximos ao valor de RQME do membro 31, com 1.134, 1.354 e 1.374 kg ha⁻¹, respectivamente. O valor de RQME foi semelhante ao encontrado por Rosa et al. (2015), que avaliaram o desempenho do modelo SimulArroz em seis regiões orizícolas do Rio Grande do Sul. Os valores de RQME das previsões avaliadas foram de 12,7 a 79,7%, enquanto os valores de RQME encontrados por Rosa et al. (2015) foram de 12,0 a 17,4%. Em um estudo com método semelhante para a previsão de safra, Shin et al. (2010) encontraram valores de RQME que variaram de 43,2 a 88,1% para milho, e de 46,7 a 128,1% para amendoim. Wang et al. (2010) utilizaram imagens de satélite para a previsão de safra de arroz em Taiwan e encontraram valores de RQME para produtividade de grãos de arroz de 1.100 a 1.600 kg ha⁻¹ e de RQME de 13,4 a 43,4%. Esses resultados são indicativos de que o método proposto para a previsão de safra de arroz irrigado, por meio da modelagem numérica, é viável. É recomendável repetir a metodologia apresentada, para prever a safra de arroz irrigado nas quatro regiões orizícolas do Rio Grande do Sul que não foram contempladas no presente estudo.

As produtividades previstas pelo modelo SimulArroz acoplado ao modelo climático regional RegCM4 foram, em geral, menores do que as observadas (Figura 3). Os desvios entre os dados de produtividade observados nas lavouras 1 e 2 de Itaqui e previstos pelos nove membros foram menores do que os desvios entre os dados de produtividade observados e previstos para as lavouras 1, 2 e 3 de Restinga Seca. Essa diferença pode ser explicada pelo uso de cultivares distintas em cada lavoura. Para as lavouras 1 e 2 de Itaqui, a cultivar utilizada foi a 'IRGA 417', calibrada no modelo SimulArroz. As cultivares 'IRGA 427' e 'Puitá INTA CL', utilizadas nas lavouras 1 e 2 de Restinga Seca e na lavoura 3, respectivamente, são cultivares que ainda não foram calibradas no modelo SimulArroz (Tabela 3). Segundo Lorençoni et al.

Tabela 5. Estatísticas RQME, RQMEn, dw, dw₁, BIAS e r, para os membros 01, 07, 10, 13, 19, 22, 31, 34 e 37 do modelo climático RegCM4, acoplado ao modelo SimulArroz, para previsão de produtividade de grãos de arroz, para os municípios de Restinga Seca e Itaqui, RS, para a safra 2013/2014 de arroz irrigado.

Membro	RQME (kg ha ⁻¹)	RQMEn (%)	dw	dw ₁	BIAS	r
01	1374,02	15,83	0,64	0,45	-0,10	0,56
07	1617,33	19,08	0,66	0,42	-0,14	0,65
10	1656,37	19,30	0,52	0,33	-0,12	0,31
13	1354,68	15,66	0,73	0,52	-0,10	0,68
19	1134,01	12,70	0,71	0,49	-0,04	0,57
22	2319,06	28,37	0,47	0,34	-0,21	0,33
31	1218,96	14,08	0,76	0,55	-0,10	0,78
34	5313,72	79,74	0,27	0,19	-0,54	-0,06
37	1782,01	20,83	0,47	0,34	-0,12	0,17

RQME, raiz do quadrado médio do erro; RQMEn, raiz do quadrado médio do erro normalizado; dw, índice de concordância; dw₁, índice de concordância modificado; BIAS, índice bias; r, coeficiente de correlação de Pearson.

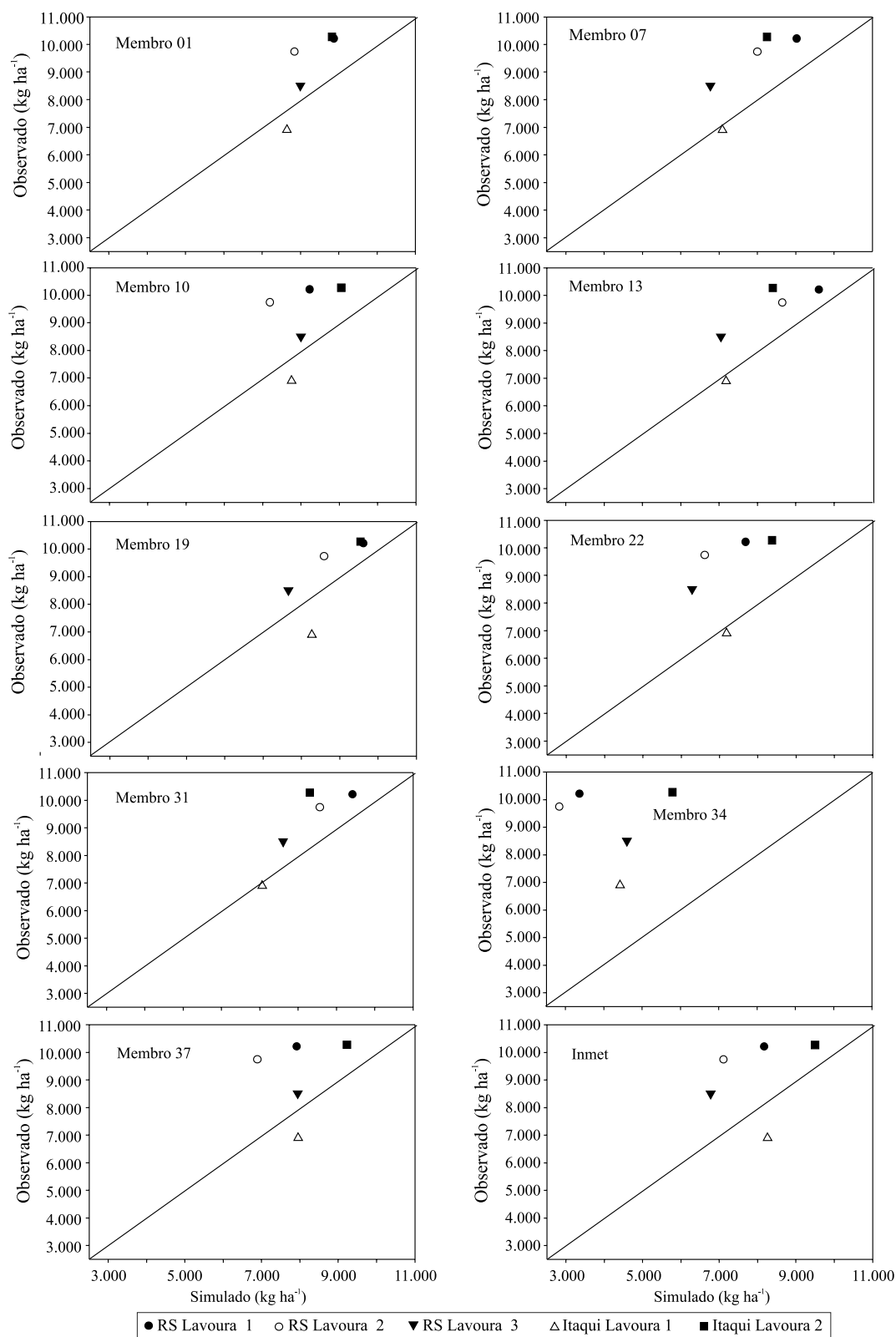


Figura 3. Produtividade de grãos de arroz observada e simulada pelo modelo SimulArroz, com uso da previsão climática de nove membros do modelo climático RegCM4, em cinco lavours, nos municípios de Restinga Seca (RS) e Itaquí, RS, no ano agrícola 2013/2014.

(2010) e Rosa et al. (2015), constantes melhorias e ajustes em modelos agrícolas são necessários.

Entre os nove membros acoplados ao modelo SimulArroz, o 31, 19, 13 e 01 apresentaram desempenho superior aos demais para a previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Tabela 5). Os membros 07, 10 e 37 apresentaram desempenho razoável, porém, não devem ser descartados em futuros trabalhos para a previsão de safra de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, enquanto os membros 34 e 22 não apresentaram bom desempenho para tal previsão. Cabe salientar que o método para a previsão de safra foi desenvolvido para o Estado do Rio Grande do Sul, uma vez que o modelo SimulArroz foi calibrado para cultivares e condições ambientais de produção de arroz deste Estado (Rosa et al., 2015) e a previsão climática sazonal foi gerada para uma área abrangente aos municípios de Itaquí e Restinga Seca. Assim, a previsão proposta pode ser utilizada como um modelo regional, inserida em um modelo nacional para previsão de safra de arroz, como o modelo proposto por Monteiro et al. (2013). O método proposto no presente trabalho pode ser utilizado para prever safra de arroz para o RS, pois atende com maior precisão as características específicas da produção de arroz desse Estado, gerando uma previsão mais segura e confiável.

Técnicas matemáticas, como a que foi usada no presente trabalho e em outros, como os de Klering et al. (2008), Lorençoni et al. (2010), Monteiro et al. (2013), Gabriel et al. (2014) e de Rosa et al. (2015), são importantes ferramentas que podem auxiliar tomadores de decisão na mitigação e adaptação a riscos antes e durante a estação de crescimento das culturas, principalmente com o uso de computadores e plataformas virtuais cada vez mais potentes, em que ferramenta torna-se ainda mais viável e pode ser cada vez mais utilizada na agricultura.

Conclusões

1. A previsão de safra de arroz irrigado por inundação para o Rio Grande do Sul pode ser realizada por meio do modelo SimulArroz, utilizando-se como dados meteorológicos de entrada a previsão climática sazonal com o modelo RegCM4.

2. Os membros 31, 19, 13 e 01 do modelo RegCM4 acoplados ao modelo SimulArroz são os mais indicados para a previsão numérica de safra de arroz irrigado por inundação para o Rio Grande do Sul.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo 302524/2011-8), pela concessão de bolsas de mestrado e de produtividade em pesquisa; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs, Projeto Pronem n.º 11/2033-8), pelo apoio e permissão de uso da infraestrutura.

Referências

- AGGARWAL, P.K.; KALRA, N.; CHANDER, S.; PATHAK, H. InfoCrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural Systems*, v.89, p.1-25, 2006. DOI: 10.1016/j.agsy.2005.08.001.
- ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W.H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, part I. *Journal of Atmospheric Sciences*, v.31, p.674-701, 1974. DOI: 10.1175/1520-0469(1974)031<0674:IOACCE>2.0.CO;2.
- BOUMAN, B.A.M.; KROPFF, M.J.; TUONG, T.P.; WOPEREIS, M.C.S.; BERGE, H.F.M. ten; LAAR, H.H. van. *Oryza2000*: modeling lowland rice. Philippines: IRRI, 2001. 235p.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, v.40, p.436-443, 2000. DOI: 10.2135/cropsci2000.402436x.
- EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.48, p.2313-2335, 1991. DOI: 10.1175/1520-0469(1991)048<2313:ASFRCC>2.0.CO;2.
- GABRIEL, L.F.; STRECK, N.A.; ROBERTI, D.R.; CHIELLE, Z.G.; UHLMANN, L.O.; SILVA, M.R. da; SILVA, S.D. da. Simulating cassava growth and yield under potential. *Agronomy Journal*, v.106, p.1119-1137, 2014. DOI: 10.2134/agnonj2013.0187.
- GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M.B.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G.T.; NAIR, V.; GIULIANI, G.; TURUNCOGLU, U.U.; COZZINI, S.; GÜTTLER, I.; O'BRIEN, T.A.; TAWFIK, A.B.; SHALABY, A.; ZAKAY, A.S.; STEINER, A.L.; STORDAL, F.; SLOAN, L.C.; BRANKOVIC, C. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, v.52, p.7-29, 2012. DOI: 10.3354/cr01018.
- GRELL, G.A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, v.121, p.764-787, 1993. DOI: 10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEO AUB>2.0.CO;2.
- HAUN, J.R. Visual quantification of wheat development. *Agronomy Journal*, v.65, p.116-119, 1973. DOI: 10.2134/agnonj1973.00021962006500010035x.

- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137-157, 2000. DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00108-8.
- KLERING, E.V.; FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; CARGNELUTTI FILHO, A. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.549-558, 2008. DOI: 10.1590/S0100-204X2008000500001.
- LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; HEINEMANN, A.B. Calibração e avaliação do modelo ORYZA-APSIM para o arroz de terras altas no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, p.605-613, 2010. DOI: 10.1590/S1806-66902010000400013.
- MONTEIRO, J.E.B. de A.; AZEVEDO, L. da C.; ASSAD, E.D.; SENTELHAS, P.C. Rice yield estimation based on weather conditions and on technological level of production systems in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.123-131, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013000200001.
- PAL, J.S.; GIORGI, F.; BI, X.; ELGUINDI, N.; SOLMON, F.; GAO, X.; RAUSCHER, S. A.; FRANCISCO, R.; ZAKAY, A.; WINTER, J.; ASHFAQ, M.; SYED, F.S.; BELL, J.L.; DIFFENBAUGH, N.S.; KARMACHARYA, J.K.; KONARÉ, A.; MARTINEZ, D.; ROCHA, R.P. da; SLOAN, L.C.; 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. DOI: 10.1175/BAMS-88-9-1395.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 30., 2014, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria: SOSBAI, 2014. 189p.
- ROSA, H.T.; WALTER, L.C.; STRECK, N.A.; DE CARLI, C.; RIBAS, G.G.; MARCHESAN, E. Simulação do crescimento e produtividade de arroz no Rio Grande do Sul pelo modelo SimulArroz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.1159-1165, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1159-1165.
- SAMBORANHA, F.K.; STRECK, N.A.; UHLMANN, L.O.; GABRIEL, L.F. Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, p.815-824, 2013. DOI: 10.1590/S1806-66902013000400019.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SHIN, D.W.; BAIGORRIA, G.A.; LIM, Y.-K.; COCKE, S.; LAROW, T.E.; O'BRIEN, J.J.; JONES, J.W. Assessing maize and peanut yield simulations with various seasonal climate data in the southeastern United States. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.49, p.592-603, 2010. DOI: 10.1175/2009JAMC2293.1.
- SHIN, D.W.; BELLOW, J.G.; LAROW, T.E.; COCKE, S.; O'BRIEN, J.J. The role of an advanced land model in seasonal dynamical downscaling for crop model application. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.45, p.686-701, 2006. DOI: 10.1175/JAM2366.1.
- SINGH, U.; RITCHIE, J.T.; GODWIN, D.C. **A User's Guide to CERES Rice - v2.10**. Muscle Shoals: International Fertilizer Development Center, 1993. 131p.
- STRECK, N.A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F.B.; HELDWEIN, A.B.; AVILA, L.A. de; BOSCO, L.C. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Transactions of the ASABE**, v.54, p.371-384, 2011. DOI: 10.13031/2013.36234.
- WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A.; FERRAZ, S.E.T. Adaptação e avaliação do modelo infocrop para simulação do rendimento de grãos da cultura do arroz irrigado. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.510-521, 2012. DOI: 10.1590/S0100-69162012000300010.
- WANG, Y.P.; CHANG, K. -W.; CHEN, R. -K.; LO, J. -C.; SHEN, Y. Large-area rice yield forecasting using satellite imageries. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.12, p.27-35, 2010. DOI: 10.1016/j.jag.2009.09.009.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985. DOI: 10.1029/JC090iC05p08995.

Recebido em 11 de dezembro de 2015 e aprovado em 13 de maio de 2016