

SIMULAÇÃO DO EFEITO DA IRRIGAÇÃO SOBRE O RENDIMENTO DA SOJA NA BACIA DO RIO POTIRIBU, RIO GRANDE DO SUL

ALEJANDRO CAMPOS CASTILLO¹; JOSÉ ANTÔNIO SALDANHA LOUZADA² E
NILZA MARIA DOS REIS CASTRO²

¹ Engenheiro Ambiental. Mestre em Recursos Hídricos. alecamposcastillo@gmail.com

² Professor(a), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves 9500, Caixa Postal 15029, CEP: 91501-970 Porto Alegre – RS, email: louzada@iph.ufrgs.br e nilza@iph.ufrgs.br

1 RESUMO

A soja cultivada em condições de sequeiro é a principal cultura do estado do Rio Grande do Sul e o estresse hídrico é o fator isolado que mais influencia a variação interanual do seu rendimento. Especificamente, a precipitação do período de dezembro a março explica cerca de 80% desta variação. A bacia do rio Potiribu, situada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, apresenta características predominantemente agrícolas e tem no cultivo da soja sua atividade econômica mais importante. O objetivo deste trabalho foi estimar o efeito da irrigação sobre o rendimento da soja na bacia do rio Potiribu, o que se justifica por sua importância para a economia do estado e mais especificamente para a região escolhida para o seu desenvolvimento. O modelo AquaCrop Versão 4.0 foi ajustado para simular o crescimento da soja em condições de sequeiro para um histórico de dez safras no período 2003/2004 – 2012/2013. Esse ajuste teve como variável de referência registros de produtividades de soja na região. Definidos os parâmetros do modelo, as simulações foram repetidas com aplicação de irrigação. Os resultados mostraram um incremento médio no rendimento de 1,67 t ha⁻¹ comparado à média histórica para o período de estudo.

Palavras – chave: AquaCrop, modelagem agro-hidrológica, estresse hídrico, soja.

CASTILLO, A.C.; LOUZADA, J.A.S.; CASTRO, N.M.R.
SIMULATION OF THE EFFECT OF IRRIGATION ON SOYBEAN YIELD IN
POTIRIBU RIVER WATERSHED, RIO GRANDE DO SUL

2 ABSTRACT

Soybean cultivated under rainfed conditions is the main crop of Rio Grande do Sul state and water stress is the single factor that most influences the interannual variation of its yield. Specifically, the precipitation of the period from December to March accounts for about 80% of this variation. The Potiribu river basin, located in the northwest region of the state of Rio Grande do Sul, presents predominantly agricultural characteristics and soybean cultivation is its most important economic activity. The objective of this study was to estimate the effect of irrigation on soybean yield in Potiribu river basin, which is justified by its importance for the state economy and more specifically for the region chosen for its development. The AquaCrop Version 4.0 model was adjusted to simulate soybean growth under rainfed conditions for a set of ten harvests cycles in the period 2003/2004 – 2012/2013. This adjustment had as reference

variable records of soybean productivities in the region. Once the model parameters were defined, the simulations were repeated under irrigation application. The results showed an average yield increase of 1.67 t ha⁻¹ compared to the historical average for the analyzed period.

Keywords: AquaCrop, agro-hydrological modeling, water stress, soybean

3 INTRODUÇÃO

O rendimento de uma cultura depende da interação de três grupos de fatores de crescimento. O primeiro grupo, denominado fatores definidores de crescimento, determina o rendimento potencial que pode ser atingido para uma espécie em um dado ambiente físico. A concentração de dióxido de carbono, a radiação solar, a temperatura e as características próprias de cada cultura são os principais fatores definidores do crescimento. O segundo grupo consiste em fatores limitantes do crescimento e compreende a água e os nutrientes. Por último, tem-se o grupo de fatores redutores de crescimento, o qual inclui fatores bióticos como ervas daninhas, pestes e doenças; e abióticos como poluentes químicos (ITTEKSUM, KEULEN e KROPFF, 2003).

No caso da soja no Rio Grande do Sul, principal cultura do estado, a água é o fator isolado que maior influência exerce na definição do rendimento (FONTANA et al., 2001), independentemente do ciclo da cultivar, da época de semeadura e do local (CUNHA et al., 1998). As correlações obtidas por Berlatto, Fontana e Gonçalves (1992) indicam que o período fenológico da soja mais crítico em relação à água é o período reprodutivo. Esse período corresponde aos três grupos de maturação (precoce, médio e semitardio/tardio) e se estende de meados de janeiro a meados de março. Especificamente, a precipitação do período de dezembro a março explica cerca de 80% da variação interanual dos rendimentos (BERLATO; FONTANA, 1999).

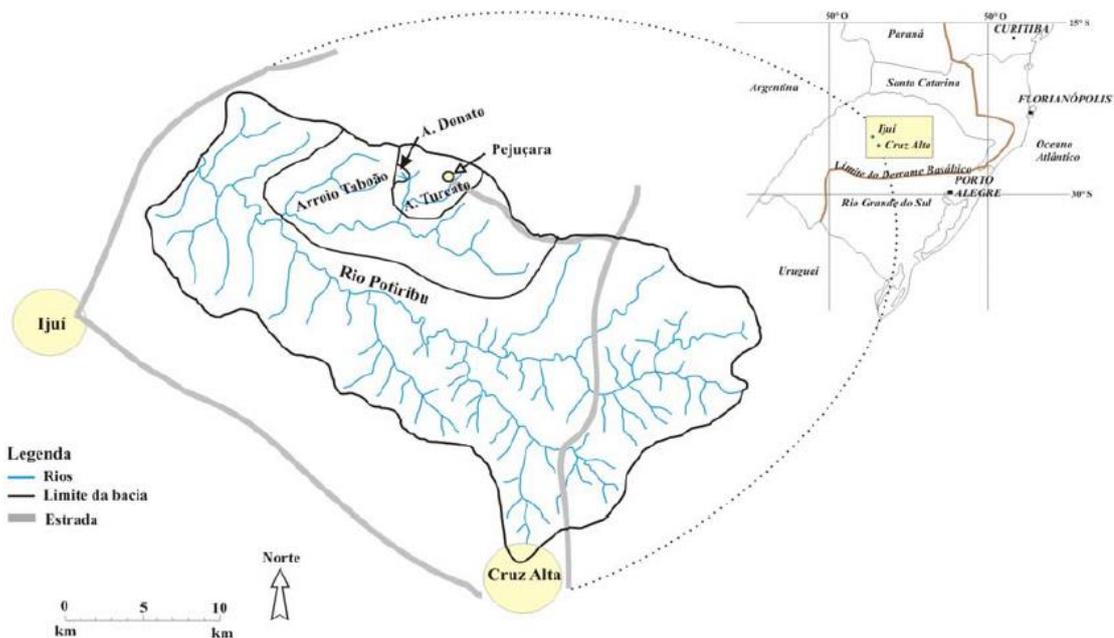
Mota et al. (1996), a partir de um balanço hídrico meteorológico diário, analisaram a necessidade de irrigação da soja em oito localidades das diferentes regiões climáticas do Rio Grande do Sul, incluída a região do Planalto, na qual se encontra inserida a bacia do rio Potiribu. Eles encontraram que todas as localidades necessitam de irrigação em qualquer época de semeadura entre as recomendadas, para todos os grupos de maturação e em todos os subperíodos estudados. A verificação do comportamento de uma determinada cultura à diferentes práticas de manejo, com ou sem irrigação, por exemplo, pode ser feita com o emprego de modelos agro-hidrológicos. Neste trabalho foi utilizado o modelo AquaCrop em sua versão 4.0. Trata-se de um modelo consagrado com aplicação em diferentes regiões climáticas do mundo (MKHABELA; BULLOCK, 2012; MANIRUZZAMAN et al. 2015; MONTOYA et al., 2016; RAZZAGHI et al., 2017) e que apresenta uma interface que facilita seu uso. A partir de sua calibração, o objetivo deste trabalho foi simular o efeito da irrigação sobre o rendimento da soja na bacia do rio Potiribu, situada na principal região produtora desse grão no Rio Grande do Sul. Este objetivo se justifica pela importância dessa cultura para a economia do Rio Grande do Sul e mais especificamente para a economia da região noroeste do estado. Na safra 2017/2018 a área cultivada com soja no estado atingiu 5.570.000 ha com uma produção que excedeu 18.000.000 t. Esses números o colocam como o terceiro maior produtor do Brasil (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A bacia do rio Potiribu está localizada na região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). Essa bacia ocupa uma área de 664 Km² e cobre parte dos municípios de Ijuí, Cruz Alta e Pejuçara (PEREIRA; KOBIYAMA; CASTRO, 2014). A precipitação média anual é de 1700 mm, distribuída homogeneamente ao longo do ano, a temperatura média no mês mais frio (julho) é de 14 °C, e a média no mês mais quente (janeiro) é de 24 °C (JIMÉNEZ; MELO; LOUZADA, 2013). A bacia é predominantemente agrícola, tendo a soja como sua cultura principal.

Figura 1. Localização da bacia do rio Potiribu



Fonte: Oliveira, Castro e Goldenfum (2010)

4.2 Modelo AquaCrop Versão 4.0

O AquaCrop Versão 4.0 (STEDUTO, HSIAO e RAES, 2009) é um modelo focado em simular a resposta do rendimento de uma cultura específica ao estresse hídrico durante todo o período de crescimento. O processo de crescimento se dá a partir da simulação do desenvolvimento do dossel (para calcular a transpiração) e da expansão das raízes (para calcular a extração de água do solo) sob as condições ambientais (clima, solo e práticas agrícolas) especificadas durante o ciclo da cultura. Como resultado da transpiração, a biomassa é produzida. A produção acumulada de biomassa (B) é obtida pela soma da relação diária entre a transpiração (Tr) e a evapotranspiração de referência (ET_o) durante todo o período de crescimento (Equação 1). O rendimento (Y) resulta da multiplicação entre a biomassa produzida e o índice de colheita (HI) (Equação 2).

$$B = K_{S_b} \cdot WP \cdot \sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right) \quad (1)$$

$$Y = HI \cdot B \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2), ETo é a evapotranspiração diária de referência (mm dia⁻¹), Tr é a transpiração diária da cultura (mm dia⁻¹), WP é a produtividade de uso da água normalizada (g m⁻²), Ksb é o coeficiente de estresse térmico adimensional, B é a biomassa acumulada produzida (g m⁻²), Y é o rendimento final (g m⁻²) e HI é o índice adimensional de colheita.

A evapotranspiração de referência é calculada pela equação de Penman-Monteith. A transpiração é estimada como uma fração de ETo a partir de uma série de procedimentos que levam em consideração o balanço hídrico de água no solo, as características da cultura e os estresses hídrico, salino e de fertilidade do solo. A produtividade de uso da água é um parâmetro característico de cada cultura e é ajustado pela concentração atmosférica de CO₂ e pelos estresses térmico e de fertilidade do solo. O coeficiente de estresse térmico depende da soma térmica diária, e o índice de colheita, característico de cada cultivar, é ajustado pelos estresses térmico e hídrico.

De acordo com o esquema anterior de cálculo, o rendimento potencial da cultura é determinado pelas variáveis climáticas utilizadas no cálculo da ETo (temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade do ar) e pelas características próprias da cultura. Este rendimento potencial é ajustado para levar em consideração os quatro tipos de estresses mencionados anteriormente (hídrico, térmico, salino e de fertilidade do solo) e a concentração atmosférica de CO₂ como fator modificador da produtividade de uso da água. Assim, o rendimento real da cultura é estimado.

Uma vantagem deste esquema de cálculo sobre o que utiliza o modelo ajustado por Berlatto (1987), amplamente utilizado para estimar o rendimento da soja no Rio Grande do Sul (BARNI; MATZENAUER, 2000; CUNHA et al., 2001; FONTANA et al., 2001) é que possibilita estimar o rendimento real da cultura e não só o rendimento relativo. Desta forma, o efeito em termos absolutos que poderia gerar a irrigação sobre o rendimento da soja pode ser estimado também.

Especificamente o estresse hídrico, de especial interesse neste estudo, é levado em consideração pelo modelo a partir da introdução de coeficientes de estresse (Ks), os quais afetam o desenvolvimento do dossel e da zona de raízes, reduzem a taxa de transpiração da cultura e alteram o índice de colheita. Estes coeficientes variam de 1 (ausência de estresse) a 0 (estresse máximo) e seu valor depende do conteúdo de água no solo (θ), o qual é determinado por meio de uma técnica de diferenças finitas. Com esta técnica as equações de fluxo vertical e de extração de água pelas raízes são resolvidas para uma série de nós distribuídos ao longo do perfil do solo para um dado incremento de tempo.

A Equação 3 de fluxo vertical é utilizada para simular a redistribuição de água em uma camada de solo e a drenagem da base do perfil do solo.

$$\frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} = \tau(\theta_{SAT} - \theta_{FC}) \frac{e^{\theta_i - \theta_{FC}} - 1}{e^{\theta_{sat} - \theta_{FC}} - 1} \quad (3)$$

Na Equação 3, $\Delta\theta_i/\Delta t$ (m³ m⁻³ dia⁻¹), é a variação do conteúdo de água no solo a uma profundidade i durante o incremento de tempo Δt , τ é um parâmetro adimensional que descreve as características da drenagem, θ_i é o conteúdo volumétrico real de água no solo à profundidade i (m³ m⁻³), θ_{SAT} é o conteúdo volumétrico de água no solo à saturação (m³ m⁻³), θ_{FC} é o conteúdo volumétrico de água no solo à capacidade de campo (m³ m⁻³) e Δt é o incremento de tempo (dia). A equação de fluxo vertical descreve a quantidade de água perdida por drenagem livre ao longo do tempo entre a saturação e a capacidade de campo. Quando a capacidade de campo é

atingida, a drenagem cessa. O parâmetro τ expressa a diminuição do conteúdo de água em uma camada de solo, originalmente à saturação, ao final do primeiro dia de drenagem livre. O valor de τ pode variar entre 1 (drenagem total após um dia) e 0 (presença de camada impermeável), e é calculado a partir da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) (Equação 4).

$$\tau = 0.0866 \cdot K_{sat}^{0.35} \quad (4)$$

Na Equação 4, K_{sat} é dado em mm dia^{-1} . Quanto maior o valor de τ , mais rápido a camada de solo atingirá sua capacidade de campo.

A equação de extração de água pelas raízes considera a taxa máxima de extração e o coeficiente de estresse hídrico (Equação 5).

$$S_i = Ks_i \cdot S_{x,i} \quad (5)$$

Na Equação 5, S_i ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$) representa a taxa de extração na profundidade i , Ks_i é o coeficiente adimensional de estresse hídrico para um conteúdo de água θ_i à profundidade i e $S_{x,i}$ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$) é a taxa máxima de extração à profundidade i . S_i expressa a quantidade de água que pode ser extraída pelas raízes a uma profundidade específica por unidade de volume de solo por unidade de tempo. O valor de Ks_i é determinado a partir de relação de Ks vs θ , e $S_{x,i}$ é um parâmetro específico de cada cultura que pode ser ajustado pelo usuário.

Os requerimentos de entrada do modelo AquaCrop Versão 4.0 podem ser divididos em quatro grupos: (1) informações climáticas, (2) dados da cultura, (3) características físicas do solo e (4) práticas de manejo que definem o ambiente no qual a cultura se desenvolverá. Os processos de obtenção das informações climáticas, assim como a parametrização do solo e da cultura serão descritos nas seções a seguir.

4.3 Dados meteorológicos

Foi utilizada uma série de 11 anos de dados (2003 – 2013) obtida do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação Cruz Alta – RS (OMM: 83912), localizada a $-28,63^\circ$ latitude, $-53,60^\circ$ longitude e 472,5 m de altitude. Os dados diários foram: precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade média do vento, insolação e umidade relativa média.

4.4 Parametrização do solo

A parametrização do solo foi baseada na caracterização física do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no ajuste dos parâmetros da curva de retenção de água no solo realizado por Jiménez, Melo e Louzada (2013). O modelo requer a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), assim como os valores do conteúdo volumétrico de água no solo para o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), capacidade de campo (θ_{FC}) e saturação (θ_{SAT}). Estes valores são apresentados na Tabela 1. A espessura do perfil do solo adotada foi de 1,65 m, mesmo valor utilizado para a profundidade máxima efetiva das raízes. O perfil do solo não apresenta camadas de impedimento e o lençol freático é bastante profundo.

Tabela 1. Características hidráulicas do solo utilizadas nas simulações

Característica	Valor
θ_{PMP}^* ($m^3 m^{-3}$)	0,415
θ_{FC}^{**} ($m^3 m^{-3}$)	0,49
θ_{SAT}^{***} ($m^3 m^{-3}$)	0,54
K_{sat}^{****} ($mm dia^{-1}$)	140

* Valor da curva de retenção correspondente a um potencial matricial de 1.500 kPa. ** Valor da curva de retenção de água no solo correspondente a um potencial matricial de 6 kPa. *** Umidade do solo saturado. **** Condutividade hidráulica saturada.

4.5 Parametrização da cultura

Os dados da cultura foram tomados do banco de dados disponibilizado pelo próprio AquaCrop Versão 4.0, já calibrados e validados para a soja. Na Tabela 2 são apresentados unicamente aqueles parâmetros que variam de acordo com as práticas de manejo e o tipo de cultivar. A lista inteira de parâmetros conservativos, utilizados na simulação, que descrevem a fenologia, a transpiração da cultura, a produção de biomassa e os diferentes tipos de estresse pode ser encontrada no Anexo 1 do Manual de Referência do AquaCrop Versão 4.0 (RAES et al., 2012).

Tabela 2. Parâmetros não conservativos da cultura utilizados nas simulações

Parâmetro	Valor
Superfície do solo coberta por uma plântula individual a 90% de emergência ($cm^2/plântula$)	5
Porcentagem máxima de solo coberta pelo dossel (%)	98
Soma térmica da semente até o início da senescência ($^{\circ}C - dia$)	2200
Soma térmica desde a semente até a maturação ($^{\circ}C - dia$)	2700
Soma térmica desde a semente até a floração ($^{\circ}C - dia$)	1500
Duração da floração expressada como soma térmica ($^{\circ}C - dia$)	600
Profundidade mínima efetiva das raízes (m)	0,30
Profundidade máxima efetiva das raízes (m)	1,65
Índice de colheita (%)	28

4.6 Ajuste

O modelo AquaCrop Versão 4.0 foi ajustado para simular o crescimento da soja na bacia do rio Potiribu. Para isto, o rendimento final em condições de sequeiro foi estimado para um conjunto de dez safras do período 2003/2004 – 2012/2013.

Para simular o crescimento de cada safra foram admitidas três diferentes datas de semente no dia 15 dos meses de outubro, novembro e dezembro, de acordo com as recomendações de Cunha et al. (2001). Essa etapa permitiu avaliar qual das três datas de semente resultou no melhor ajuste do modelo. Desta forma, foram concluídas trinta simulações no total.

As simulações foram iniciadas um mês antes da data de semente, de modo que a condição inicial de umidade adotada perdesse influência sobre os resultados da simulação e o solo pudesse se ambientar às condições reais de umidade produzidas pelas chuvas prévias à semente. Isto foi verificado variando a condição inicial de umidade de uma condição úmida

(na capacidade de campo) a uma condição seca (próxima do ponto de murcha permanente), não havendo diferenças no rendimento final da cultura.

Para avaliar a qualidade do ajuste os rendimentos calculados foram comparados com rendimentos históricos do mesmo período, disponibilizados na ferramenta “Cidades” do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015). O histórico foi construído a partir da média dos rendimentos dos municípios cobertos pela bacia do rio Potiribu: Ijuí, Cruz Alta e Pejuçara. Os resultados foram agrupados por data de semeadura, de modo que três diferentes comparações foram feitas, uma para cada conjunto de dez pares de rendimentos históricos e calculados.

Com base nas recomendações de Moriasi et al. (2007) para quantificação sistemática da qualidade da simulação em bacias hidrográficas, três indicadores estatísticos foram escolhidos para fazer a comparação entre rendimentos observados e calculados: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o desvio percentual (PBIAS) e a relação entre a raiz quadrada do erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados (RSR).

Para melhorar o ajuste do modelo dois parâmetros da lista de características da cultura (Tabela 2) foram modificados com respeito aos seus valores originais. A profundidade máxima efetiva das raízes foi diminuída de 2,00 m para 1,65 m. Esta decisão foi tomada levando em consideração a análise global de sensibilidade do rendimento para o modelo AquaCrop Versão 4.0, realizada por Vanuytrecht, Raes e Willems (2014) e a profundidade das raízes para a safra 2008/2009 indicada por Jiménez, Melo e Louzada (2013). Por outro lado, o índice de colheita foi reduzido de 40% para 28%. Este é um parâmetro que depende de cada cultivar e foi alterado porque inicialmente o modelo estava superestimando os rendimentos quando comparados aos valores históricos.

Os estresses salino e por fertilidade do solo não foram considerados nas simulações, por um lado, porque não se contou com as informações necessárias e, por outro lado, porque, como mencionado anteriormente, o estresse hídrico é o fator que mais influência exerce na definição do rendimento da soja no Rio Grande do Sul.

4.7 Irrigação

Uma vez o modelo ajustado as trinta simulações foram repetidas, agora admitindo a aplicação de irrigação, e, paralelamente, a demanda líquida para irrigação foi determinada. Foi admitida uma depleção máxima de 50% na água facilmente disponível (intervalo entre capacidade de campo e o limite hídrico inferior). O limite hídrico inferior da cultura foi fixado em um conteúdo volumétrico de água no solo de $0,4525 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Por último, os rendimentos calculados em condições de irrigação foram comparados com os rendimentos históricos em condições de sequeiro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste do modelo AquaCrop Versão 4.0 para simular o crescimento da soja na bacia do rio Potiribu apresentou valores satisfatórios para os três indicadores estatísticos selecionados, nas três datas de semeadura admitidas. No caso dos índices NSE e RSR, o ajuste que apresentou os valores mais satisfatórios foi o com data de semeadura em novembro, seguido pelas datas de outubro e dezembro. A respeito do PBIAS, a data de semeadura de outubro apresentou o valor mais satisfatório, seguido por novembro e dezembro (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados dos indicadores estatísticos para avaliar o ajuste do modelo AquaCrop Versão 4.0 para simular o crescimento da soja na bacia do rio Potiribu em diferentes datas de semeadura

Indicador	Data de semeadura			Valor satisfatório
	Outubro	Novembro	Dezembro	
NSE* (-)	0,69	0,76	0,62	> 0,50
PBIAS** (%)	3,01	3,24	5,46	[- 25% ; +25%]
RSR*** (-)	0,56	0,49	0,62	≤ 0,70

* coeficiente de Nash-Sutcliffe. ** desvio percentual dos dados observados e calculados. *** relação entre a raiz quadrada do erro médio quadrático e o desvio padrão dos dados observados.

O fato do melhor ajuste do modelo corresponder à data de semeadura em novembro faz muito sentido, pois esse é o mês de semeadura preferencial para a soja no Rio Grande do Sul. Isto porque, como foi demonstrado por Bonato (1998) e Barni e Matzenauer (2000), os maiores rendimentos são alcançados com as semeaduras nesse mês.

Os resultados das simulações revelam que o rendimento médio histórico poderia ter sido aumentado de 2,17 t ha⁻¹ para 3,84 t ha⁻¹, se a irrigação tivesse sido adotada. Isto representa um aumento médio de 1,67 t ha⁻¹ ou um incremento de 77% a respeito da média histórica (Tabela 4).

Tabela 4. Rendimento médio histórico da soja no Rio Grande do Sul (safras 2003/2004 à 2012/2013) e resumo dos resultados médios das simulações

Variável	Média
Rendimento histórico sequeiro (t ha ⁻¹)	2,17
Rendimento simulado irrigado (t ha ⁻¹)	3,84
Incremento no rendimento pela irrigação (t ha ⁻¹)	1,67
Demanda líquida para irrigação (mm)	297,8

Nas simulações, a relação média entre a biomassa real produzida e a biomassa potencial (Br/Bp) passou de 0,57, em condições de sequeiro, para 0,99, quando foi aplicada irrigação. Isso reflete que o modelo deposita todo o peso da redução no rendimento sobre o estresse hídrico. A primeira razão para tanto decorre dos estresses salino e por fertilidade do solo não terem sido considerados, e, em segundo lugar, porque nenhuma das trinta simulações apresentou estresse térmico. Esse último vai ao encontro da constatação de Berlato, Fontana e Gonçalves (1992) quando afirmam que, dentro da faixa recomendada para semeadura, a temperatura não é fator limitante no rendimento de grãos de soja nas principais regiões produtoras do estado. Aliás, o aumento na relação média Br/Bp coincide com os resultados apresentados por Vivan et al. (2013). Esses autores determinaram funções de produção para relacionar o rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação na microrregião de Passo Fundo (inserida na região Planalto Médio). As funções obtidas mostraram que o rendimento relativo pode ser aumentado de aproximadamente 0,65 para 1,00 quando a irrigação é adotada.

É importante ressaltar que o incremento de 1,67 t ha⁻¹ comparado à média histórica foi calculado por meio de simulações que desconsideraram outros fatores limitantes e redutores do crescimento, como a salinidade e fertilidade do solo, e a presença de ervas daninhas, pestes, doenças e poluentes químicos.

O valor médio da demanda líquida para irrigação calculado pelo modelo (Tabela 4) se encontra acima da faixa entre 48 e 70 mm calculada por Mota (1996) para a região do Planalto

Médio. Porém, o critério de irrigação utilizado por Mota foi diferente do utilizado neste estudo; ele admitiu uma depleção máxima de 100% na água total disponível (intervalo entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente), justificando assim valores menores de demanda líquida. Franke e Dorfman (2000) e Vivan et al. (2013) estimaram necessidades de irrigação para a região do Planalto Médio maiores do que as calculadas por Mota (1996); esses autores encontraram faixas de 216 a 523 mm e de 163 a 237 mm, respectivamente.

6 CONCLUSÕES

Com base em registros históricos de produtividades da soja na região do estudo, o modelo AquaCrop Versão 4.0 foi inicialmente ajustado a partir da alteração dos valores de dois de seus parâmetros não conservativos relacionados às características da cultura. A calibração mostrou-se satisfatória conforme os resultados dos indicadores NSE, RSR e PBIAS. Posteriormente, o modelo ajustado foi aplicado para simular o crescimento da soja na bacia do rio Potiribu. De acordo com os resultados das simulações realizadas, a irrigação possibilitou incrementar o rendimento da soja em aproximadamente 1,67 t ha⁻¹. Para tanto, foi necessária a aplicação de uma lâmina líquida de irrigação de 297,8 mm.

7 REFERÊNCIAS

- BARNI, N. A.; MATZENAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no Rio Grande do Sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p.189-203, 2000.
- BERLATO, M. A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos da soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 f. Tese (Doutorado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; GONÇALVES, H. M. Relação entre rendimento de grãos da soja e variáveis meteorológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 27, n. 5, p.695-702, 1992.
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. Variabilidade interanual da precipitação pluvial e rendimento da soja no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p.119-125, 1999.
- BONATO, E. R.; BERTAGNOLLI, P. F.; IGNACZAK, J. C.; TRAGNAGO, J. L.; RUBINS, S. A. L. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 6, p.879-884, 1998.
- CUNHA, G. R.; HAAS, J. C.; DALMAGO, G. A.; PASINATO, A. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p.111-119, 1998.
- CUNHA, G. R.; BARNIL, N. A.; HAAS, J. C.; MALUF, J. R. T; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de

semeadura para soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p.446-459, 2001.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; LAUSCHNER, M. H.; MELLO, R. W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 3, p.399-403, 2001.

FRANKE, A. E.; DORFMAN, R. Necessidades de irrigação suplementar em soja nas condições edafoclimáticas do Planalto Médio e Missões, RS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 8, p.1675-1683, 2000.

IBGE. Título do documento. Cidade, ano de publicação. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

JIMÉNEZ, K. Q.; MELO, T. M.; LOUZADA, J. A. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p.496-508, 2013.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigate rice production under varied wáter regimes in bangladesh. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 159, p. 331-340, 2015.

MKHABELA, M. S.; BULLOCK, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 110, p. 16-214, 2012.

MONTOYA, F.; CAMARGO, D.; ORTEGA, J. F.; CÓRCOLES, J. I.; DOMÍNGUEZ, A. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under diferente irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 164, p. 267-280, 2016.

MORIASI, D. N. ARGNOLD, M. J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. John, US, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOTA, F. S.; AGENDES, M. O. O.; ALVES, E. P.; SIGNORINI, E. Análise agroclimatológica da necessidade de irrigação da soja no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 133-138, 1996.

OLIVEIRA, N. T.; CASTRO, N. M. R.; GOLDENFUM, J. A. Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 93-103, 2010.

PEREIRA, M. A. F.; KOBİYAMA, M.; CASTRO, N. M. R. Análise de variâncias pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Taboão – RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 3, p. 409-419, 2014.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. **Reference Manual AquaCrop Version 4.0: Annex I: Crop parameters**. Rome: ed. FAO, 2012. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/docs/AquaCropV40Annexes.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

RAZZAGHI, F.; ZHOU, Z.; ANDESEN, M. N.; PLAUBOR, F. Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 191, p. 113-123, 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento Governança e Gestão. Soja. In: _____ Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <<http://www.atlassocioeconomico.rs.gov.br/soja>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield: Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

ITTERSUM, M. K. L.; KEULEN, P.A.; KROPFF, M. J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 18, p. 201-234. 2003.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; WILLEMS, P. Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdam, v. 51, p. 323-332, 2014.

VIVAN, G. A.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A.; BARBOSA, F. S.; BUSKE, T. Rendimento relativo da cultura da soja em função da lâmina de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 282-292, 2013.