

ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DA PRODUÇÃO INTERANUAL DE CULTIVO IRRIGADO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA A PARTIR DA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Rafael Henrique Bloedow Kayser^{1}; Christian Chreties²; Magdalena Crisci³ & Walter Collischonn⁴*

Resumo – Grande parte da agricultura irrigada orizícola, em especial no extremo sul do país, é atendida por uma rede de pequenos reservatórios, podendo ser encontrados milhares de pequenas reservas por bacia hidrográfica. Devido à alta demanda de água requerida para esta cultura, não são incomuns as situações de estresse hídrico em tais locais, mesmo com a existência das reservas, aliando-se ainda ao fato de que há uma variabilidade interanual da distribuição de chuvas bastante forte na região. Com o objetivo de compreender melhor os processos de alocação de água nestes locais, concebeu-se um modelo de balanço hídrico voltado para bacias com intenso uso de água, cuja principal saída é a estimativa da área plantada a cada safra em função do volume armazenado nos reservatórios. Aplicou-se o modelo na bacia do rio Santa Maria (RS) e comparou-se os valores calculados de área plantada com uma série histórica de safras observadas, verificando-se uma relação muito próxima, com raiz do erro médio quadrático igual a 6.996 ha e R^2 igual a 0,58. Com isso, pode-se comprovar uma forte dependência da produção agrícola regional em função da disponibilidade hídrica, e espera-se que seja possível contribuir na gestão de recursos hídricos em bacias semelhantes.

Palavras-Chave – irrigação, balanço hídrico, pequenos reservatórios

ESTIMATION OF THE INTERANNUAL VARIABILITY OF IRRIGATED CROP PRODUCTION IN A WATERSHED USING HYDROLOGICAL MODELING

Abstract – Much of irrigated rice farming, especially in the extreme south of Brazil, is served by a network of small reservoirs, and thousands of small reserves can be found by watershed. Due the high demand of water required for this crop, water stress situations are not uncommon in such places, even with the reservoir existence, in addition to the fact that there is an interannual variability of the rainfall distribution in the region. In order to better understand the processes of water allocation in these places, a water balance model was designed for water-intensive basins whose main output is the estimation of the cultivated area to each crop as a function of the volume stored in the reservoirs. The model was applied in the Santa Maria river basin (RS) and the calculated values of cultivated area were compared with crop historical series, with a very close relationship, with RMSE equal to 6.996 ha and R^2 equal to 0,58. With this, it was possible to show a strong dependence on regional agricultural production as a function of water availability, and it is hoped that it will be possible to contribute to improve the management of water resources in similar basins.

Keywords – irrigation, water balance, small reservoirs

¹ Doutorando - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: rafael.hbkayser@gmail.com

² Professor – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental – Universidad de la República (Uruguai). Email: chreties@fing.edu.uy

³ Professor – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental – Universidad de la República (Uruguai). Email: mcrisci@fing.edu.uy

⁴ Professor Adjunto - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: waltercollischonn@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada é o setor econômico com a maior demanda de água no país. Estima-se que cerca de 70% do total consumido no país seja para atender este setor (ANA, 2013). Dentre as principais culturas agrícolas, o arroz irrigado por inundação é a cultura que demanda a maior quantidade de água, pois necessita a manutenção de uma lâmina contínua de água durante todo o período de safra, que corresponde a um período de 100 a 120 dias durante os meses de novembro a fevereiro. O Rio Grande do Sul apresenta 54% do total da área plantada de arroz no país, e mais de 70% do total da produção, conforme dados do último censo agrícola (IBGE, 2017). Tal posição coloca o Estado, também, como umas das demandas hídricas mais elevadas do país, acarretando em diversas situações de estresse hídrico em algumas bacias hidrográficas. Embora o clima seja caracterizado por chuvas bem distribuídas ao longo do ano, existe uma variação interanual bastante significativa, devido principalmente à influência dos fenômenos ENOS (El Niño Oscilação Sul), acarretando na ocorrência de chuvas acima ou abaixo da média, dependendo do fenômeno vigente (El Niño e La Niña, respectivamente) (Grimm et al., 2000).

Boa parte desta demanda hídrica é atendida por um conjunto de pequenas reservas construídas na maior parte pela iniciativa dos próprios irrigantes. Estima-se que mais da metade da demanda da orizicultura no Estado seja atendida diretamente por açudes, conforme os dados de outorga. Estas estruturas tem a capacidade de armazenar poucos Hm^3 , dependendo da demanda a ser atendida, sendo normalmente estabelecidos em regiões de cabeceira. Além disso, na maior parte são constituídas por estruturas simples sem capacidade de controle da vazão de saída.

Tal arranjo de utilização das águas necessita de estudos aprofundados, uma vez que desempenham um papel fundamental na produção agrícola, e em termos de gestão de recursos hídricos, podem ocasionar um impacto cumulativo no sentido da redução da disponibilidade. A modelagem hídrica oferece uma abordagem alternativa para reconstituir o balanço hídrico nos reservatórios e trechos de rio a partir de dados históricos de precipitação, vazão e outras variáveis. Existem algumas abordagens que permitem a inclusão e simulação desse tipo de configuração hídrica (Malveira et al, 2012; Collishonn et al, 2011; Nathan et al, 2005), porém com diversas simplificações ou com pouca facilidade para reaplicar a mesma metodologia em outros locais. Kayser (2014) apresenta um modelo de balanço hídrico voltado a bacias com intenso uso de água para irrigação, sendo aplicado na bacia do Quaraí, com o objetivo de dirimir questões envolvendo a gestão transfronteiriça de suas águas, uma vez que se trata de uma bacia compartilhada com o Uruguai, sendo também utilizado no contexto deste presente estudo.

O objetivo deste trabalho é explorar os dados relativos à produção orizícola na bacia do rio Santa Maria, no Rio Grande do Sul, e testar a hipótese de que a disponibilidade hídrica é o principal fator que define a área a ser plantada anualmente, e que esta área depende do volume armazenado nos reservatórios ao longo do período de entressafra. A partir da série histórica de dados observados de área colhida por safra, objetiva-se mostrar que é possível inserir este dado na modelagem hidrológica, podendo-se assim testar outras variáveis, como estimar o valor da demanda hídrica da cultura orizícola na bacia.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia do rio Santa Maria, localizada na região da campanha no Rio Grande do Sul, junto à fronteira com o Uruguai. Possui uma área de 15.740 km^2 , sendo afluente do rio Ibicuí, e que por sua vez faz parte da bacia hidrográfica do rio Uruguai (Figura 1). A lavoura orizícola é uma das principais atividades agrícolas da bacia, contribuindo significativamente para a economia da região (Forgiarini, 2008). A cultura de arroz teve início na década de 40 e início dos

anos 50, expandindo-se devido à grande disponibilidade de terras, recursos hídricos, crescimento do mercado de consumo e crédito subsidiado. De acordo com o Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), instituição responsável por promover o desenvolvimento da cultura orizícola no Estado, na safra de 2015/2016 houve uma produção de 92.800 ha de arroz, valor que corresponde à cerca de 8% do total da produção de arroz do Estado. Para atender esta demanda, estima-se que existam mais de 1000 reservatórios distribuídos pela bacia, com capacidade de armazenamento de quase 1000 Hm³ em sua totalidade.

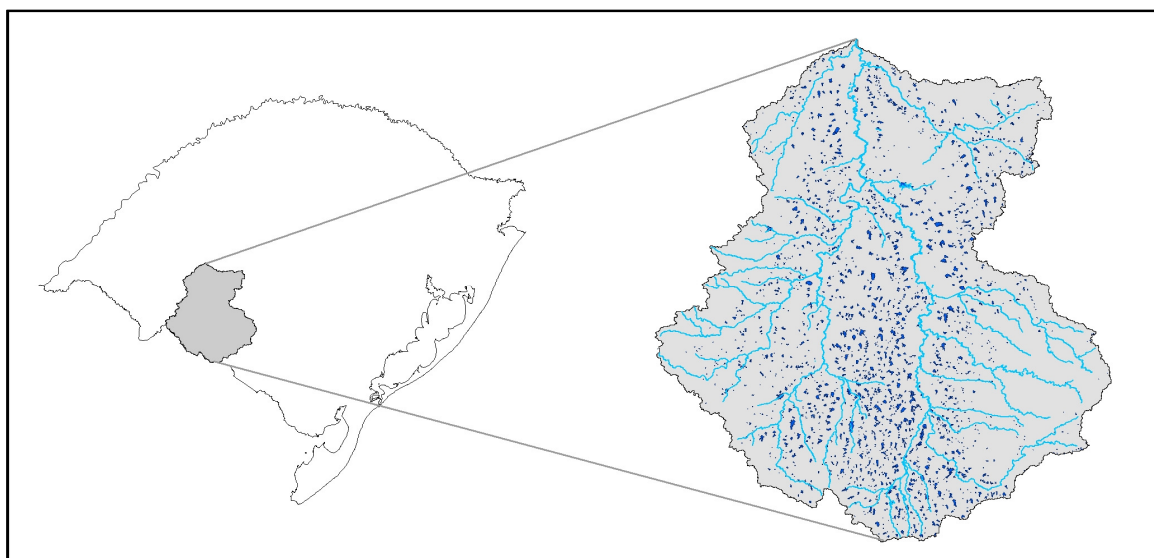


Figura 1 - Mapa de localização da bacia do rio Santa Maria e a representação dos açudes existentes.

2.2. Descrição do modelo de balanço hídrico

O modelo de balanço hídrico para reservatórios e trechos de rio utilizado neste trabalho é apresentado em Kayser (2014). O modelo é operado em regime não permanente de vazões, utiliza o modelo hidrológico MGB-IPH (Collischonn, 2001) como base para seus dados de entrada, no entanto é executado de forma desacoplada ao mesmo. O passo de tempo adotado é em escala semanal, suficiente para representar os eventos críticos da bacia e também para negligenciar os processos de propagação da onda de cheia, sendo adotado um esquema de translação simples entre os trechos.

O modelo proposto adota unidades irregulares de bacia, definidas a partir de dados do relevo de um Modelo Digital de Elevação (MDE), e denominadas minibacias (ou ottobacias, conforme a base hidrográfica gerada pela ANA). Esta é a mesma escala adotada atualmente pelo modelo hidrológico MGB-IPH, que fornece as séries de entrada de vazão e precipitação e evapotranspiração interpoladas para o modelo de balanço.

O processo de geração das minibacias a partir de um MDE é proveniente a partir da aplicação de ferramentas de geoprocessamento (Maidment, 2002; Siqueira et al, 2015). O grau de discretização é definido automaticamente a partir do valor de área limite para geração da rede de drenagem. Quanto menor este valor, mais densa será a rede e maior será o número de minibacias que drenam para cada segmento. Para o estudo de caso, foram definidas 981 minibacias, com área média em torno de 12 km², podendo haver bacias com mais de 100 km².

Por outro lado, os açudes geralmente possuem uma área de drenagem muito pequena, com valor mediano de cerca de 2 km² para as cerca de 1000 reseravações identificadas na bacia. Como a premissa do modelo de balanço é gerar as séries afluentes de cada reservatório, tem-se aí um problema de escala e de definição de cada bacia de drenagem. Como dito anteriormente, alguns modelos similares adotam abordagens mais simplificadas para contornar esta questão, como a definição de açudes equivalentes que representem um determinado conjunto de armazenamentos. Como a hipótese de geração da bacia de drenagem implicaria numa nova configuração topológica da bacia e acarretaria

também na necessidade de executar novamente o modelo hidrológico, descartou-se essa possibilidade pois seria bastante dispendiosa no sentido da inserção de novos reservatórios.

Nesse sentido, adotou-se um esquema intermediário, onde uma segunda base de rede de drenagem é utilizada, com uma densidade muito maior que a utilizada na etapa anterior, suficiente para contemplar as áreas de drenagens dos açudes. A Figura 2 apresenta um esquema desta representação, na figura da esquerda temos a bacia do Santa Maria com sua discretização principal formada por 981 trechos e minibacias, e no detalhe apresenta-se uma minibacia contendo 3 açudes, sendo 2 em série e um em paralelo com os demais. O algoritmo inserido no modelo de balanço identifica a ordem dos açudes e calcula a área de drenagem a partir da rede de drenagem mais densa (azul claro), e a vazão afluyente é definida então de modo proporcional em relação à minibacia (para os açudes de ordem 1), ou verificam a saída dos açudes de montante e contabilizam a área incremental (para os açudes de ordem superior).

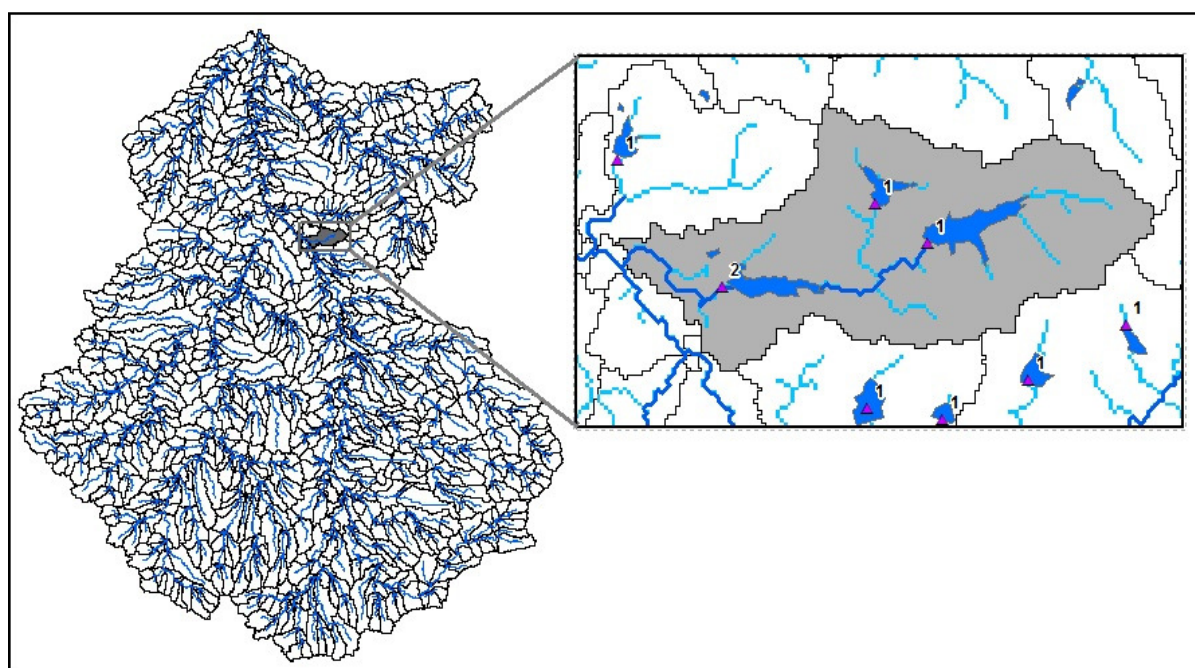


Figura 2 – Discretização adotada para a bacia do rio Santa Maria e esquema de balanço para açudes de mesma minibacia.

Os reservatórios existentes na bacia são aqui considerados de forma explícita e individual, ao contrário de outros modelos citados anteriormente. A identificação dos açudes e a sua incorporação no modelo pode ser feita a partir da identificação dos espelhos d'água a partir de imagens de satélite, procurando adquirir imagens que retratam uma situação na qual os açudes estejam em sua capacidade máxima. A informação extraída de cada corpo hídrico é referente à área superficial, na qual será estimado um volume a partir de uma relação entre as duas variáveis obtida a partir de dados observados.

A metodologia de balanço hídrico baseia-se na aplicação da equação básica da continuidade ou conservação do volume para um reservatório ou trecho de rio, sendo dada por:

$$S_{i+1,r} = S_{i,r} + Q_{i,r} + P_{i,r} - E_{i,r} - R_{i,r} - O_{i,r} \quad (1)$$

Onde $S_{i,r}$ e $S_{i+1,r}$ são o volume armazenado no reservatório no passo de tempo i e $i + 1$, respectivamente; $Q_{i,r}$ é o volume de entrada, $P_{i,r}$ e $E_{i,r}$ são os volumes precipitados e evaporados em relação à área superficial; $R_{i,r}$ é a retirada associada ao reservatório, e $O_{i,r}$ é a vazão de saída, que no caso desta aplicação se restringe ao extravasamento da estrutura, quando existir. O valor de $Q_{i,r}$ é

obtido a partir do balanço hídrico resultante das bacias de montante, e em relação à $P_{i,r}$ e $E_{i,r}$, estes são extraídos a partir do próprio modelo hidrológico, que realiza a interpolação dos dados observados para cada unidade de discretização, ou minibacia.

Com relação ao valor da retirada associada ao reservatório, admitiu-se uma hipótese, baseada no procedimento adotado pelos próprios irrigantes, de que a área orizícola a ser cultivada é variável anualmente, e que esta variação depende basicamente do volume de água disponível nos reservatórios um pouco antes do início da safra, geralmente ao final do mês de outubro. A área a ser plantada, para uma determinada safra, dada por Ap_s , é obtida então pela relação:

$$Ap_s = \frac{S_{t_d}}{DC} \quad (2)$$

Onde S_{t_d} é o volume armazenado no período t_d , correspondente imediatamente anterior ao início da safra, e DC é o valor da demanda por hectare e por safra, adotada de modo fixo para todos os anos. Assim, há uma garantia de 100% de atendimento, ainda que não ocorra nenhuma precipitação no período de irrigação, embora também possa se admitir a hipótese de que haja uma margem de produção superior à quantidade de água disponível.

Assim como para os açudes, para cada lavoura associada considera-se explicitamente o balanço hídrico considerando a precipitação e a evapotranspiração direta sobre a área de cultivo, obtendo-se a retirada efetiva de água do açude a partir da relação:

$$R_{i,r} = D_{i,l} - P_{i,l} + E_{i,l} \quad (3)$$

Onde $D_{i,l}$ é a vazão demandada para a área Ap_s , atribuindo-se diferentes pesos para cada mês do período de safra (i. e. novembro, dezembro, janeiro e fevereiro).

Além da inserção explícita dos cerca de 1000 reservatórios da bacia, também existem cerca de 150 captações diretas ao longo dos rios principais, conforme o cadastro de outorgas do Estado. Estes dados foram inseridos de forma similar, com a diferença de que se admitiu a hipótese de que a área plantada a partir das captações diretas não varia a cada safra. De qualquer forma, como poderá ser verificado posteriormente, a porção de água irrigada diretamente pelas captações é muito pequena, equivalente à até 10% da área total.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Aplicação do modelo de balanço hídrico e análise de sensibilidade

Numa etapa anterior à aplicação de balanço hídrico, aplicou-se o modelo MGB-IPH para a geração das séries de vazões e das séries interpoladas de precipitação e evapotranspiração, não sendo discutidas neste estudo. O modelo de balanço hídrico foi então aplicado no período de 1998 a 2016, correspondente à disponibilidade de dados referentes à produção anual orizícola, levantados pelo Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA). Verificou-se também a distribuição dos espelhos d'água durante este período a partir das imagens de satélite LANDSAT, e assumiu-se que o número de açudes existentes se manteve constante durante este período.

Inicialmente, testou-se alguns parâmetros e variáveis do modelo de balanço hídrico, a fim de verificar o grau de sensibilidade em relação ao dado de safra observada. O parâmetro com maior sensibilidade é em relação à demanda de água da irrigação. Com o avanço das técnicas agrícolas, permitiu-se uma redução de consumo de água nas quadras de arroz, que em alguns anos atrás eram estimadas em 15.000 m³/ha.ano, e atualmente encontra-se na literatura valores de até 8.000 m³/ha.ano. Nesse sentido, aplicou-se alguns valores típicos de demanda, fixando-se os demais parâmetros, e verificou-se a raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre os valores observados e calculados de área colhida de arroz. O resultado da variação do RMSE é apresentado na Figura 3.a, onde verificou-se que a demanda com o menor erro é referente ao valor de 9.500 m³/ha.safra, com RMSE igual a 6.996 ha. Num segundo momento, testou-se sensibilidade da estimativa das safras em relação à equação que estima o volume armazenado em função da área superficial dos espelhos d'água. Adotou-se uma

equação única para todos os açudes, com o volume igual a multiplicação da área superficial por um fator de 0,03, conforme relação apresentada em SEMA/Profill (2015) a partir de dados observados. Fixou-se a demanda em 9.500 m³/ha.safra e variou-se o coeficiente da equação em valores próximos, constatando-se uma sensibilidade muito grande em relação à este parâmetro, e que de fato, o valor verificado inicialmente gerou o menor erro na estimativa das áreas calculadas (figura 3.b)

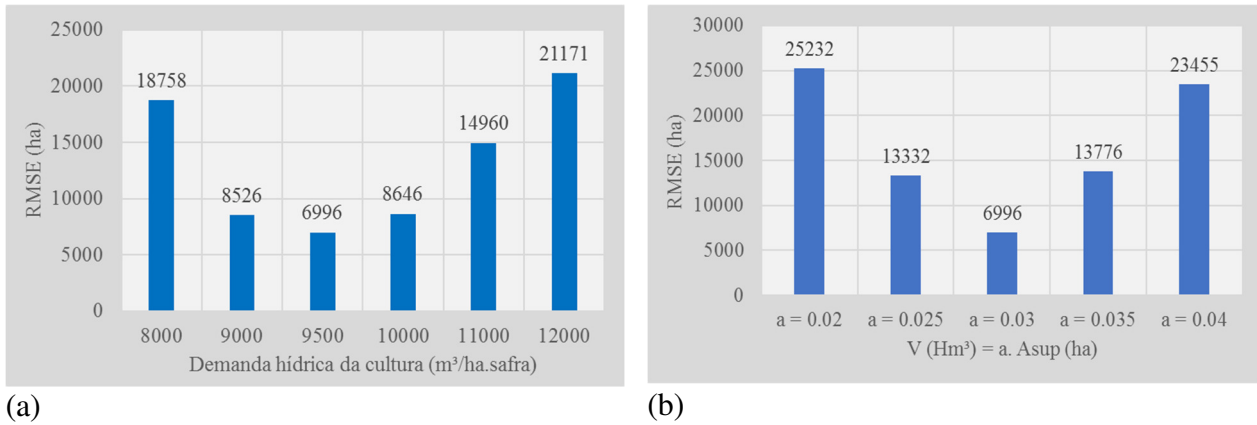


Figura 3 – Variação do RMSE da estimativa de área calculada em relação aos seguintes parâmetros: a) demanda hídrica orizícola; b) coeficiente da equação área-volume dos açudes.

A seguir, a figura 4.a apresenta um gráfico correlacionando a área plantada observada e calculada para o valor de demanda correspondente à 9.500 m³/ha.safra, onde cada ponto representa uma safra analisada. Observa-se que o ajuste dos pontos ficou bastante próximo da relação 1:1, o que não ocorre para as demandas de 8.000 e 12.000 m³/ha.safra por exemplo, apresentados nas figuras 4.b e 4.c, respectivamente.

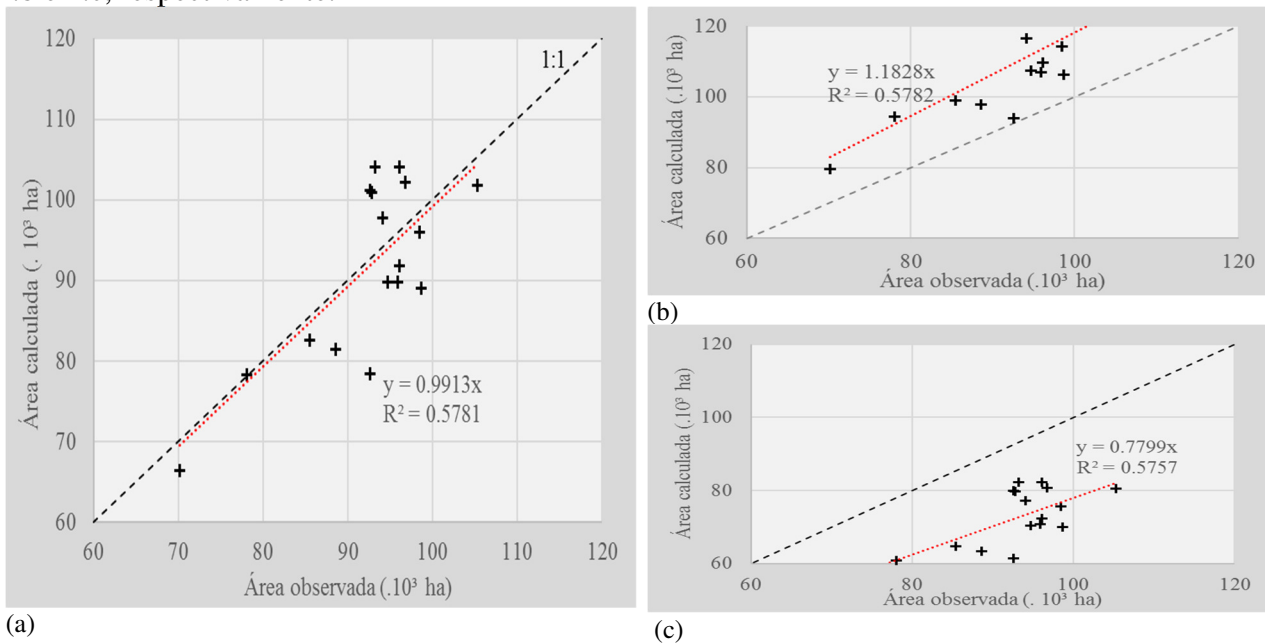


Figura 4 – Correlação entre a safra observada e calculada para diferentes valores de demanda da cultura orizícola: a) 9.500 m³/ha.safra; b) 8.000 m³/ha.safra; c) 12.000 m³/ha.safra.

3.2. Variação interanual da produção irrigada e sua relação com a disponibilidade hídrica

Neste item será apresentada uma relação entre os valores observados e calculados de produção agrícola com a variação da precipitação interanual que ocorreu na bacia neste período. Foram calculadas as anomalias padronizadas dos períodos de safra (novembro a fevereiro) e também dos períodos de entressafra (março a outubro). As anomalias representam o número de desvios padrão

distantes da média da precipitação de cada período, calculadas de 1968 a 2016. Desvios positivos representam períodos em que a precipitação superou a média histórica, e o contrário representa os desvios negativos. A figura 5 apresenta a relação destas informações para o período simulado.

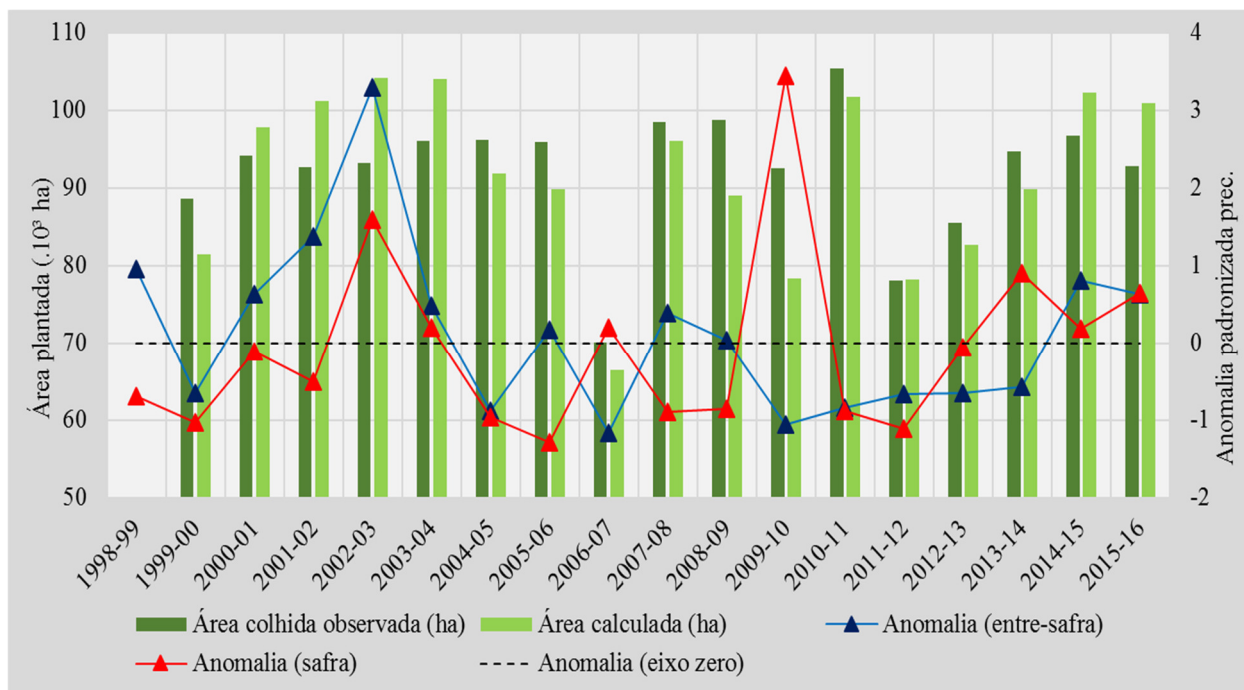


Figura 5 – Relação entre os valores de área colhida por safra (observada e calculada) e as anomalias da precipitação nos períodos da safra e entressafra.

Observa-se que entre os anos de 1998 e 2015, ocorreram mínimas bastante próximas às mínimas históricas, como nas entressafras de 2006 (693 mm), 2009 (721 mm) e 2010 (773 mm). A mínima histórica para este período é de 577 mm. Em 2006, ocorreu a maior queda na produção agrícola, constatada nos dados observados e representada também no modelo, devido justamente ao fato de que a entressafra anterior foi caracterizada por escassez de chuvas, impossibilitando a recarga dos açudes até a safra seguinte, ainda que entre novembro e fevereiro o nível de chuvas tenha sido um pouco superior à média. Em relação à safra 2009/10, o modelo subestimou a área plantada 14.000 ha, ainda que tenha havido uma entressafra seca, o período de cultivo superou em mais de três vezes a média de longo período. Pode-se admitir a hipótese de que os irrigantes tenham lançado mão da previsão de médio prazo para cultivar uma área superior à quantidade de água disponível no fim da entressafra, processo não representado no modelo. Na safra 2010/11, embora também tenha havido um período anterior bastante seco, tanto o modelo quanto o dado observado indicaram uma das maiores safras do período analisado, fato explicado devido ao período chuvoso da safra anterior, que acarretou na não utilização das reservas de água dos reservatórios em detrimento da precipitação direta nas lavouras, garantindo a reserva para o ano seguinte. Esse comportamento de reservação interanual não foi possível na safra 2006/07, devido ao fato que a safra anterior teve uma anomalia negativa, acarretando no período de pior disponibilidade hídrica, como já observado anteriormente.

Alguns destes eventos podem ser relacionados com os fenômenos ENOS, principalmente em relação à precipitação acima da média na entressafra 2009/10, período regido por um El Niño, e nos subsequentes períodos de seca de 2010 e 2011, período que estava sob a influência do fenômeno La Niña. Os anos de 2005 e 2006 também estavam sob a influência do La Niña, que embora tenha ocorrido com força moderada, acarretou numa acentuada variação negativa no volume de chuvas na região, ocasionando numa perda de quase 30 mil hectares de área cultivada devido à falta de água disponível para irrigação.

4. CONCLUSÕES

A partir da aplicação do modelo de balanço hídrico para pequenos reservatórios, pode-se verificar a hipótese adotada de que a produção orizícola na região depende basicamente da quantidade de água disponível ao fim de cada período de entressafra, ainda que possam existir outros fatores externos que envolvam esta decisão que não foram contemplados no modelo, principalmente em relação aos fatores econômicos. No entanto, pode-se afirmar que a disponibilidade hídrica é, sem dúvida, o principal fator limite para a produtividade da cultura orizícola nesta região, e uma vez que tenha sido possível emular os valores de produção agrícola com razoável aproximação, abre-se caminho para diversos outros estudos, como a possibilidade de inclusão de modelos de previsão de médio prazo, a verificação do comportamento da produção frente às mudanças climáticas, dentre outras possibilidades. Pretende-se também que a aplicação do modelo possa aperfeiçoar a gestão da água em bacias com características semelhantes, a partir da quantificação da redução da disponibilidade hídrica ocasionada pela existência dos açudes, que embora individualmente seja pequena e muito menor que o impacto das captações diretas, a grande densidade destas pequenas reserções pode estar acarretando numa redução significativa das vazões, impactando usos semelhantes e também outros setores usuários da bacia.

5. DISPONIBILIDADE DO SOFTWARE

O modelo de balanço hídrico utilizado neste trabalho está disponível para download na página da web do grupo de pesquisas de Hidrologia de Grande Escala, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/sigbah-iph/sigbah-irriga/>).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2013). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil -Informe 2013.
- COLLISCHONN, B. et al. (2011) Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 16 (4), pp. 119 - 133
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 6 (1) pp. 95-118.
- FORGIARINI, F. R.; SILVEIRA, G. L. D.; CRUZ, J. C (2008). Modelagem da Cobrança pelo uso da Água Bruta na Bacia do Rio Santa Maria/RS: Estratégia Metodológica e Adaptação à Bacia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. (13), pp. 65-77
- GRIMM, A.; BARROS, V.R.; DOYLE, M.E. (2000). Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*. (13), pp. 35-58.
- NATHAN, R.; JORDAN, P. (2005). Assessing the impact of farm dams on streamflows, Part I: Development of simulation tools. *Australian Journal of Water Resources*. 9 (1), pp. 1 – 12.
- KAYSER, R. H. B. (2014). Metodologia de balanço hídrico e critérios de outorga em bacias hidrográficas com uso intenso de reservatórios de pequeno porte: estudo de caso na Bacia do rio Quaraí. 155 f. Dissertação. (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MAIDMENT, D. R. (2002). Arc Hydro: GIS for Water Resources. Redlands, CA: ESRI Press
- MALVEIRA, V.; ARAÚJO, J.; GUNTNER, A. (2012). Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northeastern Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*. 17 (1), pp. 109 – 117.
- SEMA/Profill (2015). Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. Relatório Técnico.
- SIQUEIRA V. et al. (2016). IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open- source environment. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 21 (1), pp. 274-287