Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ESTIMATIVA DO USO SAZONAL DA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL NA CULTURA DO MILHO EM NÍVEL DE OITO BACIAS HIDROGRÁFICAS NO RIO GRANDE DO SUL

Seasonal use of central pivot irrigation in corn crop at the level of eight river basins in Rio Grande do Sul

Estimación del uso estacional del riego por pivote central en el cultivo del maíz a nivel de ocho cuencas hidrográficas en Rio Grande do Sul

Bruna de Villa
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
bruna.devilla.5000@gmail.com

Mirta Teresinha Petry
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
mirta.petry@gmail.com

Juliano Dalcin Martins
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
julianodalcinmartins@gmail.com

Giane Lavarda Melo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS e professora EBTT – Instituto Federal Catarinense, Camboriú, SC
giane.lavarda@gmail.com

Luciene Kazue Tokura
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Cascavel, PR
lucienetokura@gmail.com

Cassio Miguel Ferrazza
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
cassiom.ferrazza@gmail.com

Maicon Sérgio Nascimento dos Santos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
maiconsergions@gmail.com

Clarissa Moraes da Silva
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, RS
clarissamoraes37@outlook.com

Resumo: A preocupação com o uso dos recursos hídricos (indústrias, uso doméstico e agricultura), tem motivado o uso de ferramentas de modelagens, que visam melhorar a gestão da água na agricultura. Assim, o objetivo deste estudo foi (i) estimar o requerimento hídrico (CWR) e a necessidade líquida de irrigação suplementar (NIR) no milho em nível de Bacia Hidrográfica (BH) no RS, usando o modelo SIMDualKc, e (ii) quantificar o volume bruto de água a ser retirado de recursos hídricos para atender a área irrigada nas diferentes BH no ciclo do milho. As simulações para a demanda hídrica da cultura foram realizadas para as oito bacias hidrográficas que concentram os pivôs, no estado do RS: Alto Jacuí, Apauê, Butuí, Ijuí, Passo Fundo, Piratini, Turvo e Várzea. Os dados de entrada do programa foram: características físico-hídricas do solo, dados da cultura; presença de cobertura do solo (*mulch*), da irrigação, ascensão capilar e escoamento superficial, entre 2010 e 2022. Os maiores consumos de água para irrigação se deram para as bacias hidrográficas de Alto Jacuí, Ijuí e Piratini. A bacia hidrográfica de Piratini ocupou o maior percentual de vazão, com 7,3% e 7,2%, para as semeaduras de 05/10 e 20/10, respectivamente. A simulação do balanço hídrico se mostrou importante para a quantificação da lâmina de água durante o ciclo de desenvolvimento do milho e posterior quantificação da vazão necessária em nível de bacias hidrográficas. O balanço hídrico sequencial diário facilitou o acesso a conhecimentos sobre as irrigações para agricultores, alunos, pesquisadores e demais usuários.
Palavras-chave: Demanda hídrica. Bacias hidrográficas. SIMDualKc. *Zea mays*.

Abstract: Concern about the use of water resources (industries, domestic use and agriculture) has motivated the use of modeling tools, which aim to improve water management in agriculture. Thus, the objective of this study was (i) to estimate the water requirement (CWR) and the net need for supplementary irrigation (NIR) in corn at the Hydrographic Basin (BH) level in RS, using the SIMDualKc model, and (ii) quantify the gross volume of water to be removed from water resources to serve the irrigated area in the different BH in the corn cycle. The simulations for the crop´s water demand were carried out for the eight river basins that concentrate the pivots, in the state of RS: Alto Jacuí, Apauê, Butuí, Ijuí, Passo Fundo, Piratini, Turvo and Várzea. The program´s input data were: physical-water characteristics of the soil, crop data; presence of soil cover (mulch), irrigation, capillary rise and surface runoff, between 2010 and 2022. The highest water consumption for irrigation occurred in the Alto Jacuí, Ijuí and Piratini river basins. The Piratini hydrographic basin occupied the highest percentage of flow, with 7.3% and 7.2%, for the sowings of 05/10 and 20/10, respectively. The water balance simulation proved to be important for quantifying the water depth during the corn development cycle and subsequently quantifying the flow required at the river basin level. The daily sequential water balance facilitated access to knowledge about irrigation for farmers, students, researchers and other users.
Keywords: Water demand. Watersheds. SIMDualKc. *Zea mays.*

Resumen: La preocupación por el uso de los recursos hídricos (industrias, uso doméstico y agricultura), ha motivado el uso de herramientas de modelación, que tienen como objetivo mejorar la gestión del

agua en la agricultura. Así, el objetivo de este estudio fue (i) estimar el requerimiento hídrico (CWR) y la necesidad neta de riego suplementario (NIR) en maíz a nivel de la Cuenca Hidrográfica (BH) en RS, utilizando el modelo SIMDualKc, y (ii) cuantifican el volumen bruto de agua a extraer del recurso hídrico para atender el área irrigada en los diferentes BH del ciclo del maíz. Las simulaciones de demanda hídrica del cultivo fueron realizadas para las ocho cuencas que concentran los pivotes, en el estado de RS: Alto Jacuí, Apauê, Butuí, Ijuí, Passo Fundo, Piratini, Turvo y Várzea. Los datos de entrada del programa fueron: características físico-hídricas del suelo, datos del cultivo; presencia de cobertura del suelo (mulch), riego, ascenso por capilaridad y escurrimiento superficial, entre 2010 y 2022. El mayor consumo de agua para riego se presentó en las cuencas de los ríos Alto Jacuí, Ijuí y Piratini. La cuenca hidrográfica de Piratini ocupó el mayor porcentaje de caudal, con el 7,3% y 7,2%, para las siembras del 05/10 y 20/10, respectivamente. La simulación del balance hídrico demostró ser importante para cuantificar la profundidad del agua durante el ciclo de desarrollo del maíz y posteriormente cuantificar el flujo requerido a nivel de la cuenca del río. El balance hídrico secuencial diario facilitó el acceso al conocimiento sobre riego a agricultores, estudiantes, investigadores y otros usuarios.

Palabras clave: Demanda hídrica. Cuencas hidrográficas. SIMDualKc. *Zea mays*.

Submetido em: 24/10/2023
Aceito para publicação em: 18/01/2024
Publicado em: 25/01/2024

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é crucial para a segurança alimentar do planeta, contribuindo com aproximadamente 40% da produção de alimentos no mundo (SIEBERT; DÖLL, 2010). Quando a precipitação natural for insuficiente para atender a demanda de água da vegetação, natural ou cultivada, a irrigação é essencial para assegurar o desenvolvimento das culturas e obtenção de rendimentos potenciais (ANAPALLI *et al.*, 2022). Por outro lado, a agricultura irrigada é responsável pela retirada de 70-90% de águas superficiais e subterrâneas, em nível mundial (ZHANG *et al*., 2023), volume esse que, muitas vezes ultrapassa as taxas de recarga natural, podendo acarretar riscos a sustentabilidade da agricultura irrigada em muitos locais (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016).

A retirada de água dos aquíferos, para fins de irrigação, vem a ser a mais importante intervenção antropogênica no ciclo hidrológico (SIEBERT; DÖLL, 2010) e da energia (WADA; BURNETT; GURDAK, 2016), exacerbando os problemas de escassez de água, nas regiões áridas e semiáridas. Entretanto, a intensificação do crescimento da população mundial e o aquecimento global (BRANQUINHO; ROLIM; TEIXEIRA, 2021), requerem uma expansão da área irrigada, como forma de diminuir as perdas por déficit hídrico e manter a produtividade das culturas (ROSA *et al*., 2020). Assim, quantificar o requerimento hídrico das culturas é um pré-requisito para melhorar o manejo da água na agricultura (KOCH *et al*., 2020), além de, estabelecer regramentos para a outorga de direito de uso de recursos hídricos para a irrigação (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

A área irrigada no Brasil tem expandido significativamente nos últimos anos, apresentando aproximadamente 7 milhões de hectares irrigados (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019), distribuídos dentre os diferentes sistemas de irrigação, com potencial de aumentar a sua área, devido a sua extensão territorial. No Rio Grande do Sul, a área irrigada por pivô central, aumentou 72% nos últimos 5 anos, apresentando 191 mil hectares em 2021 (MARTINS *et al*., 2021), distribuídos em 3850 equipamentos. A necessidade de produzir mais alimentos, aliada aos riscos de perdas de safras devido ao déficit hídrico, sobretudo do milho, são os principais fiadores do aumento da área irrigada no RS (PETRY; MARTINS; CARLESSO, 2020). Entretanto, é importante considerar que o aumento da área irrigada, por pivô central, aumentou a pressão sobre o sistema agrícola, devido à maior demanda por água e energia

(PETRY; MARTINS; CARLESSO, 2020), e às exigências ambientais (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017), inclusive em locais mais abastados em recursos hídricos (WADA; VAN BEEK; BIERKENS, 2011), como é o caso do RS. Assim, melhorar a eficiência da irrigação é um passo fundamental para uma agricultura irrigada mais sustentável, do ponto de vista da produção e do uso dos recursos hídricos (PACIOLLA; CORBARI; MANCINI, 2023).

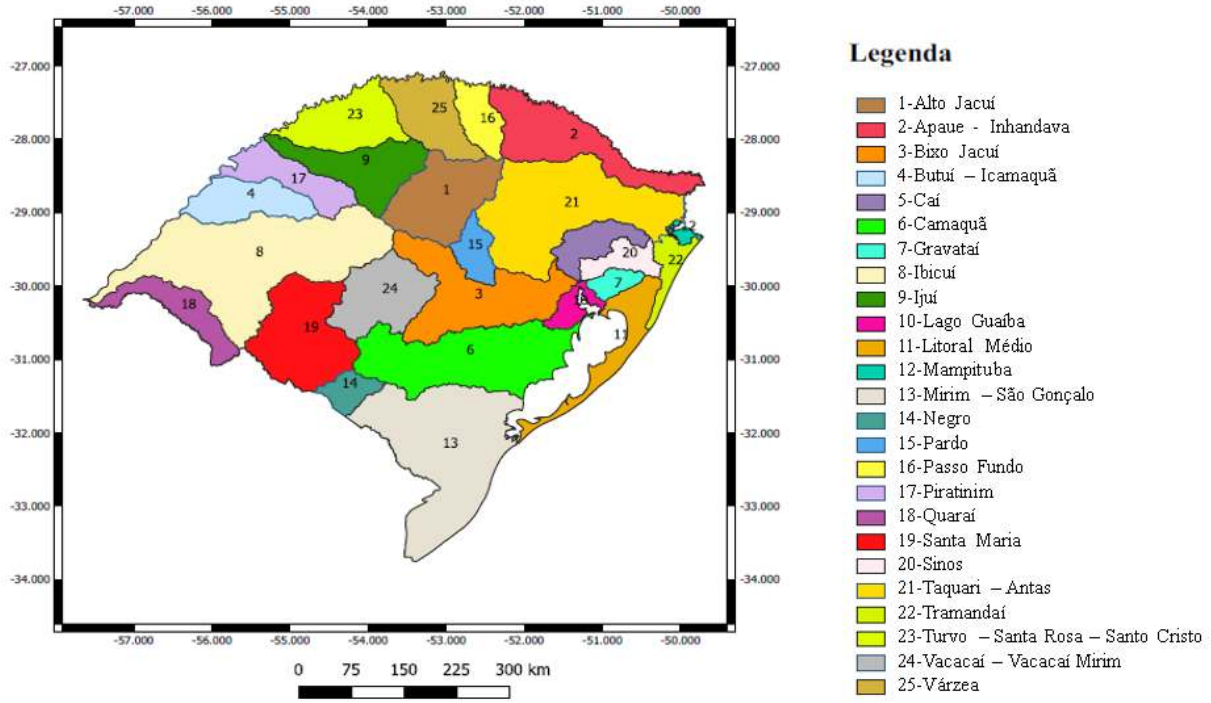
A gestão da água, em nível de propriedade ou de bacia hidrográfica, requer informações precisas e atualizadas sobre o uso e a disponibilidade de água para a irrigação. Muitas técnicas e ferramentas têm sido desenvolvidas ao longo dos anos visando melhorar o manejo da irrigação, seja via modelos de balanço hídrico sequencial diário (SWB) mediante a estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) (PEREIRA *et al*., 2020), por observações de superfície ou dados de satélite (CALERA *et al.*, 2017). Redes de sensores de umidade do solo de baixo custo (NAVARRO-HELLÍN *et al*., 2015), tem sido usada para auxiliar na tomada de decisão espaço-temporal da necessidade de irrigação. As informações dos sensores podem ser melhoradas quando combinados com os modelos de SWB, de informações meteorológicas ou dados de satélite, para estimar o requerimento hídrico das culturas em questão (LORITE *et al*., 2015).

Assim, os objetivos desse estudo foram: (i) estimar o requerimento hídrico (CWR) e a necessidade líquida de irrigação (NIR) na cultura do milho em nível de Bacia Hidrográfica (BH) no RS, usando o modelo SIMDualKc e (ii) quantificar o volume da necessidade bruta de irrigação (GIR) a ser retirado de recursos hídricos para atender a área irrigada nas oito diferentes BH com maior concentração de pivôs, durante um ciclo do milho.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

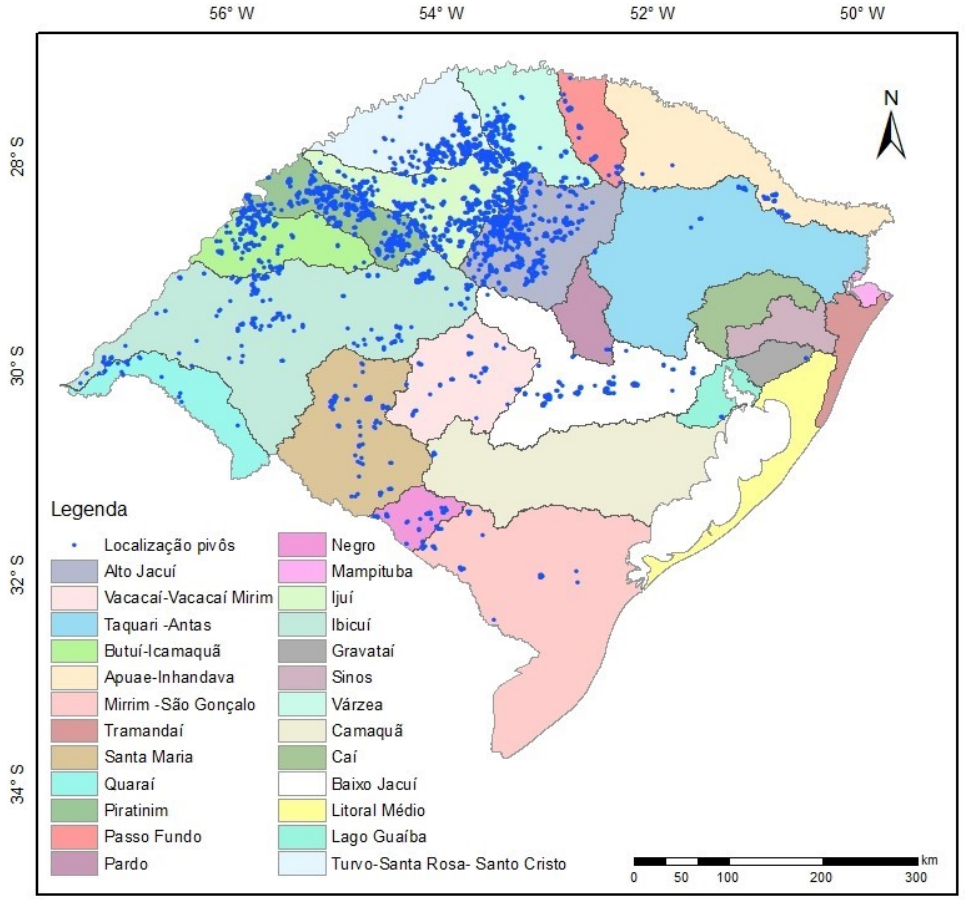
Uma visão geral da área do estudo é apresentada nas Figuras 1 e 2. A área irrigada por pivô central está distribuída em 20 bacias hidrográficas, das quais 8 foram trabalhadas neste estudo: Alto Jacuí, Apauê, Butuí, Ijuí, Passo Fundo, Piratini, Turvo e da Várzea.

Figura 1 - Divisões geográficas das Bacias Hidrográficas do RS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 2 - Localização geográfica dos pivôs centrais nas diferentes bacias hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul, 2021.



Fonte: Adaptado de Martins *et al.* (2021).

3. METODOLOGIA

3.1. Modelagem do balanço hídrico: o SIMDualKc

O modelo SIMDualKc, descrito por Rosa, Ramos e Pereira (2012) e Rosa *et al*. (2012), foi utilizado para simular o balanço hídrico diário na zona radicular das plantas. O modelo usa a abordagem dos coeficientes de cultura duais, descrita em Allen *et al*. (1998; 2007), para estimar a evapotranspiração da cultura ($K_c=K_e+K_{cb}$), em que o K_e é o coeficiente de evaporação do solo e K_{cb} é o coeficiente de cultura basal, que representa a transpiração da cultura. O procedimento computacional dos diferentes módulos e bases de dados, para a estimativa diária da ET_c é apresentado na Figura 3. Na presente simulação, os seguintes dados de entrada foram utilizados:

a) Dados meteorológicos diários: os dados meteorológicos, para o período de 2010-2022, foram provenientes do sistema de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Sistema Irriga (CARLESSO; PETRY; TROIS, 2009). Os dados coletados foram: precipitação (mm), umidade relativa máxima ($RH_{máx}$, %) e mínima (RH_{min}, %), velocidade do vento (U_2, m s^{-1}), temperatura ($T_{máx}$, ºC) máxima e temperatura mínima diária ($T_{mín,}$ °C), radiação solar global (MJ m^{-2} dia^{-1}) e pressão atmosférica média (kPa). A evapotranspiração de referência ($ET_{o,}$) foi computada usando o método de Penman-Monteith (ALLEN *et al*., 1998).
b) Dados de solo: os dados de solo são oriundos do banco de dados de análises físicas do Sistema Irriga (MANTOVANELLI *et al*., 2021) e encontram-se resumidos na Tabela 1. Essas informações permitem a computação do total de água disponível (TAW) e a água prontamente disponível (RAW), na profundidade de solo explorada pelo sistema radicular do milho, assim como, os valores iniciais da evaporação do solo (TEW, total de água evaporável, mm; REW, água facilmente evaporável, mm) e da espessura da camada evaporável do solo (Z_e, m). Essas informações seguiram as recomendações de Allen *et al*. (1998) e Pereira *et al*. (2015).

Tabela 1 - Saturação de água no solo (Sat.), capacidade de campo a -0,03Mpa (θ_{CC}), ponto de murcha permanente a -1,5Mpa (θ_{PMP}), total de água disponível (TAW) (até a profundidade de 70cm), granulometria e número de observações em cada Bacia Hidrográfica (n).

Bacia Hidrográfica	θ_{Sat}	θ_{CC}	θ_{PMP}	TAW	Areia	Argila	Silte	n
	$cm^3\ cm^{-3}$			mm		%		
Turvo	0,50	0,42	0,24	119	10	63	27	163
Apauê	0,52	0,42	0,25	119	8	57	35	7
Passo Fundo, Várzea Alto Jacuí	0,48	0,42	0,24	105	32	41	27	454
Butuí, Ijuí e Piratini	0,52	0,40	0,25	105	14	51	35	246
Butuí	0,42	0,36	0,20	112	25	34	40	100

θ_{Sat}: umidade de saturação; θ_{CC}: umidade capacidade de campo; θ_{PMP}: umidade ponto de murcha permanente, TAW: total de água disponível, MAD: fração de depleção máxima permitida; n: número de observações.
Fonte: Adaptado de Mantovanelli *et al.* (2021).

c) Dados referentes à cultura: os dados referentes à cultura compreendem as datas de semeadura, a duração dos estádios, a profundidade do sistema radicular (Z_r, m), a altura média das plantas em cada estádio (h, m), o fator de depleção para a não ocorrência de stress (*p*), a fração de solo sombreada pela cultura em cada estádio (f_c) (Tabela 2, Martins, 2013) e os dados do K_{cb} (Tabela 3) para os diferentes estádios. A separação dos estádios em inicial, desenvolvimento vegetativo, intermediário, início da senescência e colheita foi feita usando a soma térmica acumulada (GDA) até o início de cada estádio. Os dados de altura de plantas de milho, f_c e Z_r foram retirados do banco de dados de áreas monitoradas pelo Sistema Irriga® e apresentados na Tabela 2.

d) Dados de resíduos culturais (*mulch*): os dados de *mulch* utilizados obedeceram às observações de campo de áreas monitoradas pelo Sistema Irriga®, considerando o tipo de cultura de cobertura e o intervalo entre a dessecação e o plantio normalmente utilizados pelos produtores. Utilizou-se uma camada de *mulch* de espessura baixa (0 a 3 Mg ha^{-1}) e com uma porcentagem de redução de evaporação de 50% (ALLEN *et al*., 1998; ROSA; RAMOS; PEREIRA (2012);

Tabela 2 – Profundidade do sistema radicular (Z_r), altura de planta (h), fração de esgotamento da água (*p*), fração de cobertura do solo e soma térmica acumulada (GDA), de acordo com os estádios de desenvolvimento da cultura do milho.

Estádios de desenvolvimento	Profundidade do sistema radicular (Z_r) (m)	Altura de planta (h) (m)	Fração de esgotamento de água no solo (*p*)	Fração de cobertura do solo (f_c)	GDA
Inicial	0,2	0,05	0,5*	0,05	-
Desenvolvimento vegetativo (V3)	0,4	0,25	0,5	0,20	195
Intermediário (V13)	0,7	1,2	0,5	0,90	661
Senescência (R3)	0,7	2,2	0,5	0,95	113
Final (R6)	0,7	1,8	0,5	0,75	1460

*Os valores da fração de esgotamento de água no solo (p), foram retirados do trabalho de Martins (2013); V3: 3 folhas desenvolvidas; V13: 13 folhas desenvolvidas; R3: grão leitoso; R6: maturação fisiológica; Z_r: profundidade do sistema radicular (0,7m, também foi considerado para as obtenções da Tabela 3.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

e) Parâmetros de irrigação: o momento e a lâmina a ser irrigada foram definidos no modelo, de forma a evitar qualquer estresse à cultura do milho, ou seja, utilizou-se um valor de *p* de 0,5 (Tabela 2), o qual é dado em função do TAW (RAW=TAW**p*). Uma atualização dos valores de *p* para culturas olerícolas e grandes culturas foi recentemente publicada por Pereira *et al*. (2020, 2021). Deduz-se que, para manter o conteúdo de água no solo (ϑ) acima de *p*, então $\vartheta \geq \vartheta p$. Conforme reportado por Petry, Carlesso e Martins (2021), embora os valores de p sejam corroborados pelo FAO-56 (ALLEN *et al*., 1998; PEREIRA *et al*., 2020, 2021), a sua aplicação para as condições tropicais e subtropicais do Brasil deve ser assumida com cautela, devido a menor homogeneidade do perfil do solo, a restrição química e física ao desenvolvimento radicular (MORAES *et al*., 2019) e aos fatores climáticos. Assim, visando manter a cultura em ótimas condições hídricas, usou-se um MAD (depleção máxima permitida) de 45 a 70% do valor de *p,* para cada estádio de desenvolvimento (Tabela 3) (MAD≤*p*). Assim, as irrigações eram recomendadas quando a ET_c acumulada atingia valor de 30 a 36 mm. Utilizou-se lâminas de irrigação de 8 mm (período inicial), 12 mm (desenvolvimento vegetativo), 15 mm (intermediário) e 15 mm (final), considerando as características técnicas dos pivôs instalados no RS, os quais possibilitam a aplicação de uma lâmina bruta diária (em 21 horas de operação) de 8,5 a 9,5 mm. As lâminas fixas para cada período do ciclo visam atender a praticidade operacional do pivô central. Nesse

estudo, a fração de solo molhada pela irrigação (*fw*) foi igual a 1,0, por se tratar de aspersão;

f) Parâmetros de escoamento e percolação (DP): o escoamento superficial (RO) foi estimado a partir da curva número (CN), seguindo as recomendações de Allen *et al.* (2007). Os parâmetros da percolação (DP) foram estimados utilizando uma equação paramétrica, proposta por Liu, Pereira e Fernando (2006). Os valores a_D e b_D usados foram os calibrados por Martins (2013) para Santa Maria, valores estes, considerados iguais para todas as bacias hidrográficas.

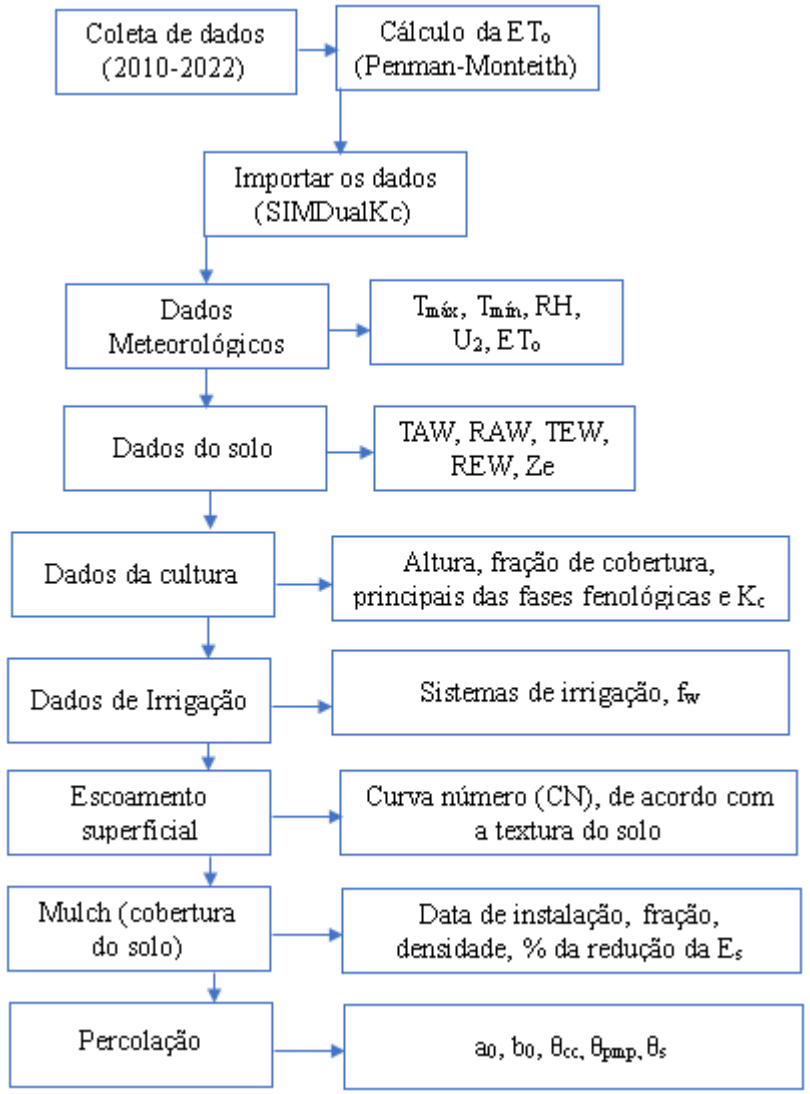
Os valores de K_{cb} para os estádios iniciais, intermediário e final ($K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ e $K_{cb\ end}$), respectivamente, assim como, os valores de *p* e MAD, para os respectivos estádios, de evaporação, escoamento e percolação, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da cultura do milho, evaporação do solo, escoamento e percolação profunda, utilizados no programa SIMDualKc.

Parâmetros	**Representação**	**Inicial, padrão**	**Fontes dos valores iniciais dos parâmetros**
Cultura do milho			
Coeficiente de cultivo basal inicial	$K_{cb\ ini}$	0,20	
Coeficiente de cultivo basal intermediário	$K_{cb\ mid}$	1,05	Martins (2013)
Coeficiente de cultivo basal final	$K_{cb\ end}$	0,50	
Evaporação do solo			
Total de água evaporável	TEW (%)	20	Allen *et al*. (1998)
Profundidade da camada evaporável do solo	Z_e (m)	0,10	
Total de água facilmente evaporável	REW (mm)	7 a 11	
Escoamento e percolação profunda			
Parâmetro da equação de percolação (a)	a_{DP}	300 a 470	Liu, Pereira e Fernando (2006)
Parâmetro da equação de percolação (b)	b_{DP}	-0,0173	Martins (2013)
Curva número	CN	65 a 85	Allen *et al*. (2007)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 3 – Fluxograma conceitual da estrutura e metodologia do modelo SIMDualKc, para retirada dos dados de balanço hídrico do solo.



ET_o: evapotranspiração de referência; Tar: temperatura do ar; UR: umidade relativa; U_2: velocidade do vento; TAW: total de água disponível; RAW: água prontamente disponível; TEW: total de água evaporável; REW: água prontamente evaporável; Z_e: profundidade do sistema radicular; K_{cb}: coeficiente basal da cultura; a,b: parametro de percolação; θ_{CC}: umidade na capacidade de campo; θ_{pmp}: umidade no ponto de murcha permanente e θ_s: umidade de saturação.

Fonte: Adaptado de Rosa, Ramos e Pereira (2012) e Rosa *et al*. (2012).

3.2. Requerimento hídrico da cultura (CWR), necessidade líquida (NIR) e bruta (GIR) de irrigação

O CWR consiste no total de água requerida pela cultura para a obtenção de rendimento potencial, correspondendo, a evapotranspiração máxima ou potencial (ET_c, mm), expressa em escala diária ou sazonal. O CWR foi simulado, para cada data de semeadura, em escala diária,

usando o modelo SIMDualKc. A necessidade líquida de irrigação (NIR) é a quantidade de água que necessita ser aplicada para completar o CWR, quando a água proveniente das precipitações (P, mm), ascensão capilar (CR, mm) ou variação do armazenamento de água no solo (∆ASW, mm), for insuficiente (PEREIRA *et al*., 2020) (Equação 1).

$$NIR = CWR - (P+\Delta ASW+CR) + DP + RO \quad (1)$$

Em que, DP corresponde às perdas por percolação (DP, mm) e RO são as perdas por escoamento superficial (RO, mm).

O requerimento bruto ou a lâmina bruta de irrigação (GIR) para um período qualquer (diário, mensal ou sazonal) é dado por:

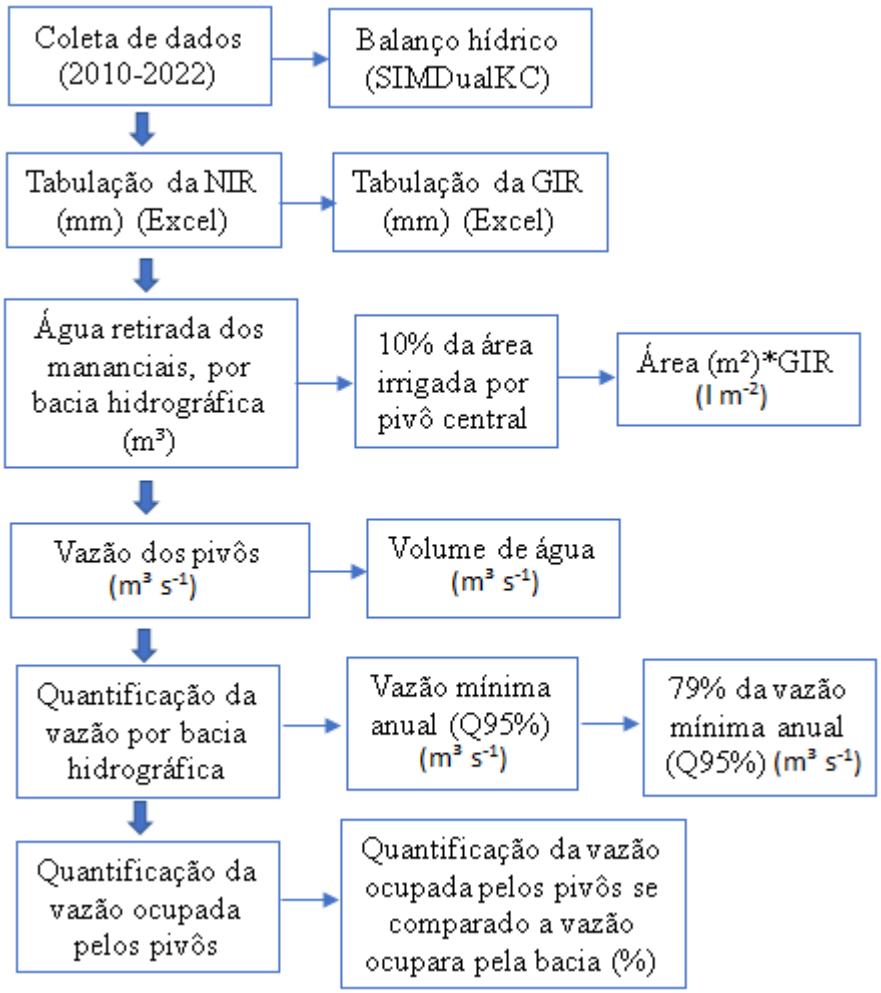
$$GIR = \frac{NIR}{Ea} \quad (2)$$

Em que, E_a é a fração da água aplicada efetivamente usada pela cultura, considerando perdas na distribuição e aplicação (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012) (considerada como 85%).

Após estas etapas, calculou-se as lâminas e consumos de irrigação sazonal (todo o ciclo de desenvolvimento da cultura) para cada bacia hidrográfica, e quantificando também a demanda hídrica. A porcentagem considerada de milho semeada em outubro, com irrigação por pivô central, foi de 10% (POTT *et al*., 2021) de um total de 50000 ha irrigados (5000 ha). Segundo a Emater, na safra de 2022/2023, a área total de milho no estado foi de 831000 ha, em que destes, 56% foram semeados até 29/09 (465360 ha) e 70% (581700ha) foram semeados até 20/10. Assim, considerando-se as bacias hidrográficas trabalhadas, teve-se uma área de 549870 ha do total de 810380 ha (70%) com milho. Logo, considerou-se 70% dos 116340 ha, resultando em 81438 ha, para áreas cultivadas em outubro nas regiões de estudo.

Para o cálculo da vazão ocupada, se trabalhou com a vazão mínima anual ($Q_{95\%}$) da bacia ($m^3\ s^{-1}$), considerando-se posteriormente, 79% da área da bacia para áreas com irrigação por pivô central, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia e obtenção dos dados das lâminas e vazões da área estudada.



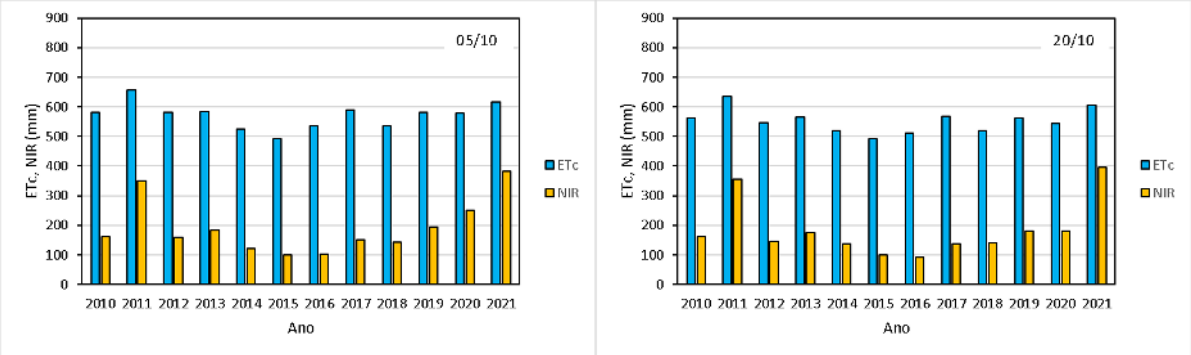
NIR: lâmina liquida de irrigação; GIR: lâmina bruta de irrigação requerida

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

4. DESENVOLVIMENTO

Os valores sazonais de NIR e ET_c, para as datas de semeadura do dia 05/10 e 20/10, nas bacias hidrográficas estudadas, são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Média histórica dos valores de NIR e ET_c, simulados para cultivo de milho precoce nas safras 2010/2011 a 2021/2022, considerando as datas de semeadura de 05/10 e 20/10.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Observa-se que, tanto a ET_c como a NIR apresentaram comportamento semelhantes, para ambas as datas de semeadura. Maiores valores de ET_c foram observadas para 2021/2022, nas BH do Jacuí, Apauê, Ijuí, Passo Fundo e Turvo, e 2011/2012 para as BH do Butuí, Piratini e Várzea, enfatizando a importância do balanço hídrico, uma vez que, a disponibilidade hídrica é um dos principais fatores que afetam o desenvolvimento e a adaptabilidade de culturas (FENNER *et al*., 2015). Com relação a NIR, também se observou os maiores valores de lâminas nas safras de 2021/22, para as BH do Alto Jacuí, Apauê, Ijuí, Passo Fundo e Várzea, e 2011/12, para Butuí, Piratini, Turvo e para as datas 05/10 e 20/10, com valores médios de 383 mm (05/10) e 396 mm (20/10) para 2021/22 e de 351 mm (05/10) e de 355 mm (20/10) para 2011/12, valores estes, superiores aos encontrados por Osti *et al*. (2019), que, considerando equilíbrio econômico e ambiental em áreas irrigadas, relatam lâminas de irrigação em torno de 190 mm, para a cultura do milho.

Além do NIR sazonal, o planejamento ou calendarização da irrigação é fundamental em programas de manejo de mananciais, além do monitoramento das áreas a serem irrigadas, sempre que possível, visando detectar possíveis incongruências entre o recomendado pelo modelo e sua aplicação em nível de campo, em tempo real e futuro (OLIVEIRA *et al*., 2020). O momento e a quantidade a ser irrigada varia em função da distribuição da chuva, do manejo de irrigação e do maior ou menor esgotamento de água no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2020), sendo que a estimativa da demanda hídrica pode contribuir para maior eficiência do uso de água na agricultura irrigada.

A ocorrência de estresse hídrico pode causar danos na cultura do milho, como a redução da produtividade, altura das plantas e diâmetro dos colmos, além da redução na

fotossíntese, causada pelo decréscimo na expansão celular e pelos danos causados no aparato fotossintético (GUIMARÃES; ROCHA; PATERNIAN, 2019). O milho, apresenta sensibilidade ao estresse hídrico, principalmente no período crítico que inicia no florescimento e vai até o enchimento dos grãos (HERNÁNDEZ *et al.*, 2015).

Na Tabela 4 são apresentados os valores de GIR (mm) e volume de água retirado de mananciais, para as datas de semeadura do dia 05/10 e 20/10.

Tabela 4 – Lâmina aplicada (GIR) (mm), água retirada dos mananciais (m^3), para a cultura do milho, considerando duas datas de semeadura (05/10 e 20/10), em diferentes Bacias Hidrográficas do RS.

Bacias hidrográficas	Número de pivôs	Área Total Irrigada (ha)	Área Irrigada considerada (10%) (ha)	GIR (mm)		Água retirada dos mananciais (m^3)	
				Semeadura 05/10	Semeadura 20/10	Semeadura 05/10	Semeadura 20/10
Alto Jacuí	662	34193	3419	240	238	8.206.320	8.125.866
Apauê	35	11224	1122	151	156	1.690.202	1.756.226
Butuí	184	12971	1297	239	232	3.097.780	3.006.220
Ijuí	554	34067	3407	231	229	7.868.809	7.802.011
Passo Fundo	44	2453	245	182	161	447.312	395.366
Piratini	511	31424	3142	238	235	7.486.306	7.393.882
Turvo	372	21074	2107	237	233	4.999.910	4.917.267
Várzea	236	12577	1258	220	209	2.766.940	2.626.374

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Verifica-se que, em todas as bacias hidrográficas, o suprimento hídrico para a cultura do milho foi necessário, enfatizando que no RS, a irrigação suplementar (ANTONELLO, 2019; MELO, 2006; MARTINS, 2013; PETRY; MARTINS; CARLESSO, 2020; YAU; NIMAH; FARRAN, 2011; RODRIGUES *et al*., 2013) é utilizada em períodos de déficits hídricos de diferentes intensidades, causados em função da distribuição irregular das chuvas, mesmo que o total na estação ocorra em volumes elevados.

Quanto a GIR (Tabela 4), a bacia Hidrográfica do Rio Alto Jacuí e Butuí foram as que apresentaram maiores valores, para a data de semeadura em 05/10, com 240 mm e 239 mm, respectivamente. Para a data em 20/10, as Bacias hidrográficas que apresentaram maiores

valores, foram do Rio Alto Jacuí e Piratini, com valores de 238 mm e 235 mm, respectivamente, o que se deve as características climáticas do local. Esses dados demonstram a importância em se fazer o balanço hídrico da cultura, o qual reflete na frequência de irrigação, que é afetada pela textura do solo, condições climáticas e precipitação (ZHANG *et al*., 2018, 2019).

Observa-se também, na Tabela 4, maior retirada de água dos mananciais das bacias hidrográficas do Alto Jacuí, Ijuí e Piratini, para ambas as datas de semeadura, o que se deve ao fator de que estas bacias hidrográficas apresentam maior área irrigada com pivô central, se comparado as demais BH.

As lâminas de irrigação programadas (8 mm, 12 mm, 15 mm e 15 mm), o esgotamento de água, dado pelos valores de p e MAD e a demanda hídrica (ET_c) em cada estádio definem a frequência de irrigação de acordo com o comportamento da precipitação. Tanto as irrigações como o total e distribuição das precipitações pluviais alteram a distribuição espacial de umidade do solo e o armazenamento de água nele, ou seja, quando se aumenta a frequência de irrigação, aumenta-se a umidade do solo e seu armazenamento na camada superior (ZHANG *et al*., 2018). Verifica-se, com isso, a importância de um manejo adequado da irrigação, que definirá quanto de água aplicar e a frequência, o tempo de funcionamento ou a velocidade de deslocamento do equipamento de irrigação (OLIVEIRA, 2014).

Embora o Brasil seja um dos poucos países com potencial para aumentar a sua área irrigada (6 milhões de hectares irrigados) (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2019), deve-se ter cuidado com a alta concentração de pivôs centrais por unidade de área, pois o uso inadequado desses equipamentos pode promover impactos negativos na agricultura e meio ambiente (FERREIRA *et al*., 2018). A gestão e estimativa de uso dos recursos hídricos é essencial para o correto gerenciamento (PEREIRA, 2017) e conhecimento da disponibilidade e demanda hídrica (MANKE *et al*., 2017, DJAMAN *et al*., 2018).

Salienta-se, assim, a importância de estudos nessa área, pois o uso indiscriminado de pivôs pode ocasionar aumento nas demandas hídricas e energética (SANTOS *et al.*, 2010). Desta forma, evidencia-se a importância de estudos quanto a suplementação da precipitação, através da irrigação, que busquem atender às necessidades hídricas das culturas, evitando déficits hídricos em fases primordiais ao desenvolvimento e produção (SANTOS *et al*., 2020). Observa-se que o balanço hídrico permite diminuir os efeitos da deficiência hídrica e o total

de água retida no solo em cada período de determinada localidade (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

As vazões médias das bacias hidrográficas do RS, bem como as vazões demandadas pelos pivôs centrais, resultando na vazão ocupada e na vazão que se pode aumentar em termos de áreas com estes equipamentos (Tabela 5). Verifica-se que, para a data do dia 20/10 (Tabela 5), menor porcentagem de vazão ocupada de pivôs nas BH se comparada a data de plantio do dia 05/10 para a maioria das BH, com exceção da bacia hidrográfica do rio Apauê.

Tabela 5 – Área (km²) e vazão total ($m^3\ s^{-1}$) (média), vazão por pivô ($m^3\ s^{-1}$), porcentagem de vazão ocupada e a ser ampliada, considerando as datas de semeadura 05 e 20/10, para todo o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho.

Bacias Hidrográficas	Área total (BH) (km²)	Vazão Mín. anual ($Q_{95\%}$) ($m^3\ s^{-1}$)	Vazão (79% consi.) ($m^3\ s^{-1}$)	Vazão	Semeadura 05/10	Vazão	Semeadura 20/10
				Pivôs ($m^3\ s^{-1}$)	Ocupada (%)	Pivôs ($m^3\ s^{-1}$)	Ocupada (%)
Alto Jacuí	13.064	24,33	19	0,78	4,03	0,77	3,99
Apauê	14.508	26,94	21	0,13	0,63	0,14	0,66
Butuí	8.008	16,64	13	0,33	2,47	0,32	2,40
Ijuí	10.766	40,70	32	0,78	2,44	0,78	2,42
Passo Fundo	4.859	13,46	11	0,04	0,42	0,04	0,37
Piratini	7.659	14,76	12	0,85	7,26	0,84	7,17
Turvo	10.793	26,89	22	0,51	2,30	0,50	2,26
Várzea	9.479	29,08	23	0,27	1,17	0,26	1,11

Considerou-se 23 horas de atuação do pivô central/dia; se considerou que 79% da vazão das bacias é destinada para áreas irrigadas do RS; os valores de área das bacias foram retirados as SEMA (2023); as vazões foram retiradas do relatório do 1º plano estadual de recursos hídricos (2021) (relatório da elaboração do cenário de tendências), disponível na SEMA (2023).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A bacia hidrográfica que tem maior ocupação é a do Rio Piratini, que ocupa 7,26% da vazão da bacia hidrográfica (05/10) e 7,17% para 20/10. Já a bacia que ocupa menor quantidade de vazão é a de Passo Fundo, com uma ocupação da bacia de 0,42% (05/10) e de 0,37% (20/10). Esses dados refletem o quanto é importante o conhecimento sobre o balanço hídrico, com reflexos de lâmina requerida, que irá refletir na vazão demandada pelos pivôs

dentro da BH, pois, por mais que as bacias hidrográficas do RS apresentam possibilidades de expansão da irrigação por pivô central e do Brasil contar com boa oferta de água, o aumento dessas áreas deve ser feito de forma racional e com adequada gestão dos recursos hídricos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2017). Assim, a expansão desordenada pode resultar em possíveis desequilíbrios ambientais, fazendo-se necessário um plano de manejo de irrigação junto ao produtor (RIBEIRO *et al.*, 2019). O pivô central é principal sistema de irrigação por aspersão no Brasil (CASTIONE *et al.*, 2015). Ele tem como vantagens uniformidade de aplicação da água, possiblidade de aplicação de fertilizantes e redução de custos de mão de obra (MARTINS *et al.*, 2016).

Tendo em vista que a agricultura irrigada no Brasil apresentou um crescimento superior a 40% nos últimos 20 anos (FERREIRA *et al*., 2018) e que a identificação e monitoramento da expansão das áreas irrigadas é importante para a efetiva implementação das políticas de gestão da água dentro dos princípios de sustentabilidade ambiental (LANDAU; GUIMARÃES; SOUZA, 2014). Assim, a atualização de dados da agricultura irrigada, porque além da consciência sobre o potencial de expansão, juntamente com à boa gestão dos recursos naturais, tem-se a possibilita do conhecimento das localidades, onde a tecnologia da irrigação tem maior importância (MARTINS *et al*., 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As bacias hidrográficas de Alto Jacuí, Ijuí e Piratini apresentem os maiores consumos de água.

A bacia hidrográfica de Piratini ocupa o maior percentual de vazão, cerca de 7,26% (05/10) e 7,17% (20/10) da vazão da bacia.

A simulação do balanço hídrico se mostrou importante para a quantificação do total de lâmina de água durante o ciclo de desenvolvimento da cultura do milho e posterior quantificação da água em nível de bacias hidrográficas.

O balanço hídrico sequencial diário facilita o acesso a conhecimentos sobre as irrigações para agricultores, alunos, pesquisadores e demais usuários

REFERÊNCIAS

ALLEN, Richard Glen; PEREIRA, Luiz Santos; RAES, Dirk; SMITH, Martin. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p.

ALLEN, Richard Glen; WRIGHT, James L.; PRUITT, William Oregon; PEREIRA, Luiz Santos; JENSEN, Marvin Eli. **Design and operation of farm irrigation systems**. 2. ed. St. Joseph: ASABE, p. 208-288, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS**. Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada.** Brasília, DF, 2017. http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>. Acesso em: 14 Jan. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS**. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias/ana-eembrapa-identificam-forte-tendencia-de-crescimento-da-agricultura-irrigada-porpivos-centrais-no-brasil/ana_levantamento-da-agricultura-irrigada-por-pivoscentrais_2019.pdf. Acesso em: 14 jan. 2021.

ANAPALLI, Saseendran S.; PINNAMANENI, Srinivasa Rao; REDDY, Krishna Narasim; SINGH, Gurbir. Eddy covariance quantification of corn water use and yield responses to irrigations on farm-scale fields. **Agronomy Journal**, EUA, v. 114, n. 4, p. 2445–2457, 2022. DOI http://10.1002/agj2.21130.

ANTONELLO, Marília Cossettin. **Simulação do balanço hídrico e rendimento de grãos da soja em condições irrigada e de sequeiro no Rio Grande do Sul**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antonio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Editora UFV, p. 625, 2008.

BRANQUINHO, Sofia; ROLIM, João; TEIXEIRA, José Luís. Climate change adaptation measures in the irrigation of a super-intensive olive orchard in the south of Portugal. **Agronomy**, Espanha, v. 11, p. 1658, 2021. DOI http://10.3390/agronomy11081658.

CALERA, Alonso; GARRIDO-RUBIO, Jesús; BELMONTE, Mario; ARELLANO, Irene, FRAILE, Lorena; CAMPOS, Isidro; OSANN, Anna. Remote sensing-based water accounting to support governance for groundwater management for irrigation in la Mancha oriental aquifer, Spain. **Water Resources Management,** IX, v. 220, p. 119-126, 2017. DOI http://10.2495/WRM170121.

CARLESSO, Reimar; PETRY, Mirta Teresinha; TROIS, Célio. The use of a meteorological station network to provide crop water requirement information for irrigation management. *In*: LI, Daoliang; ZHAO, Chunjiang (org.). **Computer and Computing Technologies in Agriculture II, 1.** CCTA 2008. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Boston: Springer, p. 19-27, 2009. DOI http://10.1007/978-1-4419-0209-2_3.

CASTIONE, Guilherme Adalberto Ferreira; SOUZA, Zigomar Menezes; SILVA, Reginado Barbosa; CAMPOS, Milton César Costa; CUNHA, José Maurício. Variabilidade espacial da textura do solo em área irrigada por pivô central em diferentes posições na paisagem. **Revista Agro@mbiente**, Boa Vista, v. 9, n. 3, p. 219-226, 2015. DOI http://10.18227/1982-8470ragro.v9i3.2392.

DJAMAN, Koffi; O'NEILL, Michael; OWEN, Curtis; SMEAL, Daniel; KOUDAHE, Komlan; WEST, Margaret; ALLEN, Samuel; LOMBARD, Kevin; IRMAK Suat. Crop Evapotranspiration, irrigation water requirement and water productivity of maize from meteorological data under semiarid climate. **Water**, Suíça, v. 10, p. 2-17, 2018. DOI http://10.3390/w10040405.

FERREIRA, Daniel Soares; RIBEIRO, Willian Rodrigues; GONÇALVES, Morgana Scaramussa; PINHEIRO, André Alves; SALES, Ramon Amaro; REIS, Edvaldo Fialho. Cenário da área irrigada por pivô central no Triângulo Mineiro, no Estado de Minas Gerais, Brasil. **Nativa**, Sinop, v. 6, n. 6, p. 613-618, 2018. DOI http://10.31413/nativa.v6i6.5864.

FENNER, William; DALLACORT, Rivanildo; MOREIRA, Patrícia Simone Palhana; QUEIROZ, Tadeu Miranda; FERREIRA, Fernanda da Silva; BENTO, Thatiany Silva; CARVALHO, Marco Antônio Rosa. Índices de satisfação de necessidade de água para o milho segunda safra em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 15, n. 2, p. 109-121, 2015. DOI http://10.5380/abclima.v15i0.37309.

GUIMARÃES, Paula de Souza; ROCHA, Daniel Sarto; PATERNIANI, Maria Elisa Ayres Guidetti Zagatto. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidência,** Joaçaba, v.19, n. 2, p. 93-112, 2019. DOI http://10.18593/eba.v19i1.20201.

HERNÁNDEZ, Mirafuentes; ECHARTE, Laura; MAGGIORA, Aída Della; CAMBARERI, Matías; BARBIERI, Pablo Andrés; Cerrudo Diego. Maize water use efficiency and evapotranspiration response to N supply under contrasting soil water availability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 178, n. 1, p. 8-15, 2015. DOI http://10.1016/j.fcr.2015.03.017.

KOCH, Julian; ZHANG, Wenming; MARTINSEN, Grith; HE, Xin; STISEN, Simon. Estimating net irrigation across the north China plain through dual modeling of evapotranspiration. **Water Resources Research**, EUA, v. 56, n. 12, p. e2020WR027413, 2020. DOI http://10.1029/2020WR027413.

LANDAU, Elena Charlotte; GUIMARÃES, Daniel Pereira; SOUZA, Denise Luz de. **Caracterização ambiental das áreas com agricultura irrigada por pivôs centrais na região do Matopiba – Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014.

LIU, Yu; PEREIRA, Luis Santos; FERNANDO, Rui M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 84, n. 1, p. 27-40, 2006. DOI http://10.1016/j.agwat.2006.01.018.

LORITE, Ignacio Jesus; RAMÍREZ-CUESTA, Juan Miguel; CRUZ-BLANCO, María; SANTOS, Cristina. Using weather forecast data for irrigation scheduling under semi-arid conditions. **Irrigation Science**, Califórnia, v. 33, p. 411-427, 2015. DOI http://10.1007/s00271-015-0478-0.

MANKE, Emanuele Baifus; FARIA, Lessandro Coll; PEREIRA, Moises Gomes; Nörenberg, Bernardo Gomes; CALDEIRA, Tamara Leitzke; OLIVEIRA, Henrique Fonseca Elias. Identificação de áreas irrigadas por pivô central e linear móvel no estado do Rio Grande do Sul. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, p. 343-352, 2017. DOI http://10.15809/irriga.2017v22n2p343-352.

MANTOVANELLI, Bruno Campos; PETRY, Mirta Teresinha; WEILER, Elenice Broetto; CARLESSO, Reimar. Geostatistical interpolation based ternary diagrams or estimating water retention properties in soils in the Center-South regions of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Holanda, v. 209, p. 10973, 2021. DOI http://10.1016/j.still.2021.104973.

MARTINS, Juliano Dalcin. **Modelagem técnica e econômica da irrigação deficitária para diferentes métodos de aplicação de água na cultura do milho**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agricola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

MARTINS, Juliano Dalcin; BOHRZ, Iago Samuel; TURA, Enrico Fleck; FREDRICH, Miguel; VERONEZ, Rodrigo Porto; KUNZ, Greisson Alex. Levantamento da área irrigada por pivô central no estado do Rio Grande do Sul**. Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 300-311, 2016. DOI http://10.15809/irriga.2016v21n2p300-311.

MARTINS, Juliano Dalcin; PETRY, Mirta Teresinha; MANTOVANELLI, Bruno Campos; FERRAZZA, Cassio Miguel. Mapeamento da área irrigada por pivô central em nível de bacia hidrográfica no extremo sul do Brasil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial – Sul, v. 1, n. 2, p. 281-296, 2021. DOI http://10.15809/irriga.2021v1n2p281-296.

MARTINS, Juliano Dalcin; RODRIGUES, Gonçalo Carvalho; PAREDES, Paula; CARLESSO, Reimar; OLIVEIRA, Zanandra Boff de; KNIES, Alberto Eduardo; PETRY, Mirta Teresinha; PEREIRA, Luis Santos. Dual crop coefficients for maize in Southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, EUA, v. 15, n. 3, p. 291-310, 2013. DOI http://10.1016/j.biosystemseng.2013.03.016.

MEKONNEN, Mesfin Mergia; HOEKSTRA, Arjen. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, EUA, v. 2, n. 2, p. e1500323, 2016. DOI http://10.1126/sciadv.1500323.

MELO, Giane Lavarda. **Caracterização de sistemas de cultivo em áreas irrigadas por aspersão no Rio Grande do Sul**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MORAES, Moacir Tuzzin; DEBIASI, Henrique; FRANCHINI, Julio Cezar; BONETTI, João de Andrade; LEVIEN, Renato; SCNEPF, Andrea; LEITNER, Daniel. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, Suíça, v. 10, p. 1358, 2019. DOI http://10.3389/fpls.2019.01358.

NAVARRO-HELLÍN, Hono; TORRES-SÁNCHEZ, Roque; SOTO-VALLES, Fulgencio; ALBALADEJO-PÉREZ, Cristina; LÓPEZ-RIQUELME, Juan Antonio; DOMINGO-MIGUEL, R. A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. **Agricultural Water Management,** Países Baixos, v. 151, p. 64–74, 2015. DOI http://10.1016/j.agwat.2014.10.022.

OLIVEIRA, Cíntia Patrícia Martins; SIMÕES, Welson Lima; SILVA, José Aliçandro Bezerra; FARIA, Glaucia Amorim; LOPES, Paulo Roberto Coelho; AMORIM, Magno do Nascimento. Physiological and biochemical responses of apple trees to irrigation water depth in a semiarid region of Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 44, p. e015620, 2020. DOI http://10.1590/1413-7054202044015620.

OLIVEIRA, Ednaldo Miranda de. **Produtividade do cafeeiro conilon vitória submetido a diferentes lâminas de irrigação**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

OSTI, Alice Medeiros; DALLACORT, Rivanildo; TIEPPO, Rafael Cesar; GRZEBIELUCKAS, Cleci; CONCEIÇÃO, Adelair Mendes. Rentabilidade do milho e do feijão submetido a diferentes lâminas de irrigação em Mato Grosso. **Revista de Economia e Sociologia Rural,** Brasília, v. 57, n. 4, p. 505-518, 2019. DOI http://10.1590/1806-9479.2019.186329.

PACIOLLA, Nicola; CORBARI, Chiara; MANCINI, Marco. Time continuous two-source energy-water balance modelling of heterogeneous crops: FEST-2-EWB. **Journal of Hydrology**, Holanda, v. 619, p. 129265, 2023. DOI http://10.1016/j.jhydrol.2023.129265.

PEREIRA, Luis Santos. Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. **Water Resources Management**, Portugal, v. 31, p. 2985-2999, 2017. DOI http://10.1007/s11269-017-1664-z.

PEREIRA, Luis Santos; CORDERY, Ian; IACOVIDES, Iacovos. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 108, p. 39-51, 2012. DOI http://10.1016/j.agwat.2011.08.022.

PEREIRA, Luis Santos; PAREDES, Paula; MELTON, Forrest; JOHNSON, Lee; WANG, Tianxin; LÓPES-URREA, Ramón; CANCELA, Javier J.; ALLEN, Richard Glen. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 241, p. 106197, 2020. DOI http://10.1016/j.agwat.2020.106197.

PEREIRA, Luis Santos; PAREDES, Paula; MELTON, Forrest; JOHNSON, Lee; MOTA, Margarida; WANG, Tianxin. Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height: Practical application to vegetable, field and fruit crops with focus on parameterization. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 252, p. 106663, 2021. DOI http:// 10.1016/j.agwat.2020.106663.

PEREIRA, Luis Santos; PAREDES, Paula; RODRIGUES, Gonçalo Carvalho; NEVES, Manuela. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall

years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 159, p. 239-254, 2015. DOI http://10.1016/j.agwat.2015.06.006.

PETRY, Mirta Teresinha; CARLESSO, Reimar; MARTINS, Juliano Dalcin. Manejo da irrigação no Brasil: aplicações, desafios e tendências para o futuro. *In*: PAOLINELLI, Alysson; DOURADO NETO, Durval; MANTOVANI, Everardo Chartuni. (org.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: Técnica e Cultura**. 1 ed. Piracicaba: ESALQ-USP, v. 2, p. 215-233, 2021.

PETRY, Mirta Teresinha; MARTINS, Juliano Dalcin; CARLESSO, Reimar. Irrigação de milho: foco em altas produtividades. **Conteúdo Técnico biomatrix**. Rio Claro, SP, p. 18-28, 7 out. 2020. Disponível em: https://sementesbiomatrix.com.br/blog/produtividade/irrigacao-de-milho/. Acesso em: 15 mar. 2021.

POTT, Luan Pierre; AMADO, Telmo Jorge Carneiro; SCHWALBERT, Raí Augusto; CORASSA, Geomar Mateus; CIAMPITTI, Ignacio Antonio. Satellite-based data fusion crop type classification and mapping in Rio Grande do Sul, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,** França**,** v.176, p. 196–210, 2021. DOI http://10.1016/j.isprsjprs.2021.04.015.

RIBEIRO, Wilian Rodrigues; GONÇALVES, Morgana Scaramussa; PINHEIRO, André Alves; SALES, Ramon Amaro de; GUIDINELLE, Rebyson Bissaco; REIS, Edvaldo Fialho. Estimativa da demanda hídrica e área irrigada por pivô central no estado do Espírito Santo. **Irriga**, Botucatu, v.24, n. 2, p. 274-288, 2019. DOI http://10.15809/irriga.2019v24n2p274-288.

RODRIGUES, Gonçalo Carvalho; PAREDES, Paula; GONÇALVES, José Manuel; ALVES, Isabel; PEREIRA, Luis Santos. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 126, p. 85-96, 2013. DOI http://10.1016/j.agwat.2013.05.005.

RODRIGUES, Lineu Neiva; DOMINGUES, Antônio Félix. **Agricultura Irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável.** Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, p. 1-38, 2017.

ROSA, Lorenzo; CHIARELLI, Davide Danilo; RULLI, Maria Cristina; DELL'ANGELO, Jampel; D'ODORICO, Paolo. Global agricultural economic water scarcity. **Science Advances**, v. 6, n. 18, 2020. DOI http://10.1126/sciadv.aaz60.

ROSA, Ricardo D.; RAMOS, Tiago B.; PEREIRA, Luis Santos. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agriculture Water Management**, Países Baixos, v. 103, p. 8 - 24, 2012. DOI http://10.1016/j.agwat.2011.10.013.

ROSA, Ricardo D.; PAREDES Paula; RODRIGUES, Gonçalo Carvalho; FERNANDO, Rui M.; ALVES, Isabel; PEREIRA, Luis Santos; ALLEN, Richard Glen. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 2. Model testing. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 103, p. 62-77, 2012. DOI http://10.1016/j.agwat.2011.10.018.

SANTOS, Cristina; LORITE, Ignacio Jesus; TASUMI, Masahiro; ALLEN, Richard Glen; FERERES, Elías. Performance assessment of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. **Irrigation Science**, New York, n.28, p.461-477, 2010. DOI http://10.1007/s00271-010-0207-7.

SANTOS, Gabriela Chiva de Sá; OLIVEIRA, Gertrudes Macário de; ALMEIDA, Luciano Roniê Calado de; ROCHA, Daise Feitoza da; PEREIRA, Allan Victor Araújo; SILVA JUNIOR, Josemar Elias da. Crescimento do milho cultivado sob diferentes lâminas de irrigação em Juazeiro, BA. **Irriga,** Botucatu, v. 25, n. 4, p. 713-718, 2020. DOI http://10.15809/irriga.2020v25n4p713-718.

SIEBERT, Stefan; DÖLL, Petra. Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. **Journal of Hydrology**, EUA, v. 384, n. 3/4, p. 198-217, April s2010. DOI http://10.1016/j.jhydrol.2009.07.031.

YAU, Sui-Kwong; NIMAH, Musa; FARRAN, Mohamad. Early sowing and irrigation to increase barley yields and water use efficiency in Mediterranean conditions. **Agricultural Water Management**, Países Baixos, v. 98, p. 1776-1781, 2011. DOI http://10.1016/j.agwat.2011.07.009.

WADA, Christopher; BURNETT, Kimberly; GURDAK, Jason. Sustainable agriculture irrigation management: the water-energy-food nexus in Pajaro Valley, California. **Sustainable Agriculture Research**, Havai, v. 5, n. 3, p. 1-19, 2016. Disponível em: https://uhero.hawaii.edu/RePEc/hae/wpaper//WP_2016-6.pdf. Acesso em: 15 mar. 2021.

WADA, Yoshihide; VAN BEEK, Ludovicus P. H.; BIERKENS, Marc F. P. Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability. **Hydrology and Earth System Sciences**, Alemanha, v. 15, p. 3785–3808, 2011. DOI http://10.5194/hess-15-3785-2011.

ZHANG, Chenxiao; YUE, Peng; DI, Liping; WU, Zhaoyan. Automatic identification of center pivot irrigation systems from Landsat images using convolutional neural networks. **Agriculture**, Suíça, n. 8, p. 1-19, 2018. DOI http://10.3390/agriculture8100147.

ZHANG, Liyuan; NIU, Yaxiao; ZHANG, Huihui; HAN, Wenting; LI, Guang; TANG, Jiandong; PENG, Xingshuo. Maize canopy temperature extracted from UAV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. **Frontiers in Plant Science**, Suíça, v. 10, p. 1270, 2019. DOI http://10.3389/fpls.2019.01270.

ZHANG, Qiying; QIAN, Hui; XU, Panpan; LIU, Rui; KE, Xianmin; FURMAN, Alex; SHANG, Jiatao. A numerical assessment and prediction for meeting the demand for agricultural water and sustainable development in irrigation area. **Remote Sensing**, Suíça, v. 15, n. 3, p. 571, 2023. DOI http://10.3390/rs15030571.