

PEGADA HÍDRICA DO ARROZ CULTIVADO SOB DIFERENTES MANEJOS DE IRRIGAÇÃO

EMANUELE BAIFUS MANKE¹; ARYANE FARIAS DOS SANTOS²; MARÍLIA ALVES BRITO PINTO²; JOSÉ MARIA BARBART PARFITT³; ADILSON LUÍS BAMBERG³ E LESSANDRO COLL FARIA²

¹Doutora em Ciências, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, UFPel. Capão do Leão, RS, Brasil, manumanke@gmail.com

²Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, UFPel. Pelotas, RS, Brasil, aryanefarias@hotmail.com; ma.agro@gmail.com; lessandro.faria@ufpel.edu.br

³Embrapa Clima Temperado, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, Pelotas, RS, jose.parfitt@embrapa.br; adilson.bamberg@embrapa.br

1 RESUMO

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo. O manejo da água na orizicultura é complexo, sendo os estudos acerca da pegada hídrica do arroz menos frequentes em relação a outras culturas. O objetivo deste trabalho foi estimar de forma simplificada a pegada hídrica do arroz irrigado por aspersão e inundação sob diferentes manejos de irrigação, adotando como base a metodologia tradicional de estimativa da pegada hídrica. Os dados utilizados são provenientes de dois experimentos conduzidos na Estação Experimental Terras Baixas, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Clima Temperado, Capão do Leão, RS, Brasil. No Experimento 1 foram analisados três manejos de irrigação na safra do arroz de 2011/2012 e quatro na safra de 2012/2013. No Experimento 2 foram analisados quatro manejos de irrigação nas safras 2015/2016 e 2016/2017. Os manejos nas tensões de 20 e 10 kPa (aspersão) e por irrigação contínua (inundação) apresentaram menor pegada hídrica simplificada. Comparando-se a irrigação por aspersão e inundação, concluiu-se que na inundação, o manejo de irrigação contínua resultou em uma pegada hídrica simplificada menor.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, métodos de irrigação, inundação, aspersão

**MANKE, E. B.; SANTOS, A. F. dos; PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.;
BAMBERG, A. L.; FARIA, L. C.**

**WATER FOOTPRINT OF RICE CULTIVATED UNDER DIFFERENT IRRIGATION
MANAGEMENTS**

2 ABSTRACT

Rice is one of the most produced and consumed cereals in the world. The water management in rice farming is complex, and studies on the rice water footprint are less frequent than other cultures. The objective was to estimate the simplified water footprint of a sprinkler and flood-irrigated rice under different irrigation management, taking as model the traditional methodology of water footprint estimation. The raw data used are from two experiments

performed using rice in the “Terras Baixas”, Experimental Station, Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa) Temperate Climate, located in Capão do Leão, RS, Brazil. In Experiment 1, three irrigation management applied in the rice cropping season of 2011/2012 and four in the cropping season of 2012/2013 were analyzed. In Experiment 2, four irrigation managements in the 2015/2016 and 2016/2017 cropping seasons were evaluated. The irrigation managements in the tensions of 20 and 10 kPa (sprinkler) and continuous irrigation (flood) presented smallest simplified water footprint. Comparing sprinkler and flood irrigation, it can be concluded that the flood method, under continuous irrigation, resulted in a smallest simplified water footprint.

Keywords: *Oryza sativa*, irrigation methods, flooded, sprinkler

3 INTRODUÇÃO

O arroz é o segundo cereal mais produzido no mundo, estima-se que a produção mundial em 2018 tenha sido de 750 milhões de toneladas de grãos com casca (FOOD AND AGRICULTURAL ORGANISATION, 2020) e que, aproximadamente, metade da população mundial o utilize como principal fonte de calorias (MUTHAYYA et al., 2014). De acordo com o Departamento de Economia e Estatística, no Rio Grande do Sul (RS), o arroz é cultivado predominantemente em terras baixas, sendo direcionado ao abastecimento do mercado brasileiro, cuja demanda manteve-se estável na última década (FEIX; LEÚSIN JÚNIOR, 2019). Na safra 2018/2019, a produção no RS correspondeu a 7.241.458 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 7.508 kg ha⁻¹ (INSTITUTO RIO GRANDENSE DE ARROZ, 2019).

Na produção do arroz são utilizados métodos e manejos de irrigação visando garantir a alta produtividade (CONAB, 2016). O cultivo do arroz se difere da maioria das culturas, pois como é uma espécie de gramínea anual semiaquática, a presença de uma lâmina de água durante a maior parte do ciclo de cultivo é determinante para a obtenção de altas produtividades. Sendo a captação de água dos mananciais hídricos para suplementação nas lavouras fundamental

(HONGYING et al., 2017). Portanto, a gestão e o uso racional da água na orizicultura representa um grande desafio em comparação a outras culturas.

O crescimento da população e do consumo de alimentos têm tornado cada vez mais frequente os conflitos relacionados à disponibilidade hídrica e a qualidade da água no mundo. Isso faz com que os setores públicos e privados reconheçam a estimativa do uso da água e da pegada hídrica como questões importantes à segurança hídrica (LAMASTRA et al., 2014). Desta forma, visando o uso racional dos recursos hídricos, alguns pesquisadores têm utilizado as metodologias existentes, bem como, realizado adaptações à metodologia de cálculo da pegada hídrica do arroz, como observado nas pesquisas de Sheresta, Chapagain e Babel (2017), Hongying et al. (2017), Xinchun et al. (2018) e Arunrat et al. (2020).

De acordo com Silva et al. (2013), a pegada hídrica pode ser considerada uma metodologia que possibilita mensurar a quantidade de água virtual utilizada em um determinado produto. Além disso, segundo Hoeskstra et al. (2011), definir o objetivo do cálculo da pegada hídrica é a primeira etapa para a aplicação deste conceito.

A pegada hídrica pode ser utilizada para estimativa da água utilizada em um processo produtivo ou ainda no cultivo de uma cultura específica (BLENINGER; KOTSUKA, 2015), podendo também servir

para avaliar a sustentabilidade ambiental, social e econômica de um determinado produto, visando minimizar o total de água utilizado e possibilitar uma produção eficiente e, conseqüentemente, mais sustentável (HOEKSTRA et al., 2011).

O cálculo da pegada hídrica total considera três tipos: pegada hídrica azul (PH_{azul}), pegada hídrica verde (PH_{verde}) e pegada hídrica cinza (PH_{cinza}) (EMPINOTTI; TADEU e MARTINS, 2013; ALMEIDA et al., 2019). A PH_{azul} mede a quantidade de água disponível captada de mananciais hídricos por um determinado período, ou seja, representa o volume de água que não retorna imediatamente para a mesma bacia hidrográfica. A PH_{verde} é o volume da água da chuva utilizado durante o processo de produção, correspondendo ao volume de água pluvial armazenado no solo e submetido à evapotranspiração nos campos de cultivo. De acordo com Hoeskstra et al. (2011), a PH_{cinza} indica a quantidade de água utilizada para diluição de poluentes com base nos padrões naturais do ambiente.

A estimativa precisa da pegada hídrica envolve uma série de fatores e exige um volume significativo de informações, que, muitas vezes, não são monitoradas em nível de propriedade rural. Ela tem sido objeto de diversos estudos, sendo que no Brasil existem alguns relacionados a culturas agrícolas, como cana-de-açúcar (SILVA et al., 2015), cacau (ORTIZ-RODRIGUEZ et al., 2015), celulose (EMPINOTTI; TADEU; MARTINS, 2013), soja (BLENINGER et al., 2015), entre outras, porém, são raras as pesquisas que abordam essa temática aplicada à cultura do arroz.

No cultivo do arroz, o uso de manejos alternativos de irrigação pode reduzir consideravelmente o volume de água captado de mananciais hídricos (água azul) e, correspondentemente, aproveitar melhor a disponibilidade hídrica

proveniente de eventos de precipitação (água verde). Além disso, a irrigação por aspersão e os manejos de irrigação por inundação com fornecimento intermitente ganharam notoriedade ao reduzir o volume de água aplicado via irrigação durante o ciclo da cultura. Todavia, é crucial avaliar também o impacto destes métodos e manejos alternativos de irrigação sobre a produtividade da cultura e verificar se eles resultam na redução efetiva da sua pegada hídrica.

Desta forma, objetivo deste trabalho foi estimar de forma simplificada a pegada hídrica da cultura do arroz irrigado por aspersão e inundação sob diferentes manejos de irrigação, adotando como base a metodologia tradicional de estimativa da pegada hídrica.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados são provenientes de experimentos realizados com a cultura do arroz, em uma área localizada na Estação Experimental Terras Baixas (ETB), da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Clima Temperado, Capão do Leão, no Rio Grande do Sul, Brasil. O solo é classificado como Planossolo Háplico (CUNHA; COSTA, 2013), presente em amplos territórios de terras baixas do RS.

As informações disponibilizadas são correspondentes aos experimentos de campo realizados por Pinto (2015) e por Parfitt et al. (2018), os quais utilizaram distintos métodos e manejos de irrigação. Para fins de diferenciação, considera-se neste trabalho a classificação de Experimento 1 para referir-se aos dados de Pinto (2015) e Experimento 2 para referir-se aos dados de Parfitt et al. (2018). O manejo da irrigação do Experimento 1 e do Experimento 2 foi realizado conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Manejo de irrigação adotado com base na fase de desenvolvimento das culturas e na tensão de água no solo.

| Experimento 1 - Irrigação por aspersão | | | |
|--|----------------------------|-----------------|-----------------|
| Manejo de Irrigação | | Irrigação | |
| Tensão da Água | Período | Safra 2011/2012 | Safra 2012/2013 |
| 10 kPa | TCC | | + |
| 20 kPa | TCC | + | + |
| 40/10 kPa | 40 kPa - FV 10 kPa - FR | | + |
| 40/20 kPa | 40 kPa - FV 20 kPa - FR | + | |
| 40 kPa | TCC | + | + |
| Experimento 2 - Irrigação por inundação | | | |
| Tensão da Água | Período | Safra 2015/2016 | Safra 2016/2017 |
| IC | TPI | + | + |
| ICFI | RL | + | + |
| II 10 kPa | FA | + | |
| II 40 kPa | FA | + | |
| ICFI 40 kPa | FV | | |
| II 40/10 kPa | 40 kPa - FV 10 kPa - FR | | + |
| II 40 kPa/ICFI | 40 kPa- FV II - FA | | + |

Fonte: Adaptado de Pinto (2015) e Parfitt et al. (2018)

TCC - Todo o Ciclo da Cultura; FV - Fase Vegetativa, ou seja, da emergência até a diferenciação da panícula (R1); FR – Fase Reprodutiva, ou seja, a partir de R1; FA - Fase Aerada; IC - Inundação Contínua; ICFI - Inundação Contínua com Fornecimento de Água Intermitente; II - Irrigação Intermitente; TPI - Todo o Período de Irrigação: da entrada de água na lavoura até a maturação fisiológica da cultura; RL - Reposição da Lâmina até o nível máximo.

O Experimento 1 foi realizado nas safras do arroz de 2011/2012 e 2012/2013. A área experimental foi irrigada por meio de um sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo lateral móvel (Valley®). O equipamento possui 275 m de comprimento sendo dividido em seis vãos, sendo o último em balanço. Os aspersores instalados no equipamento lateral móvel de irrigação são do modelo I-Wob, Senninger®, possuem bocal número 16 (6,35 mm) e placa oscilante de 9 jatos com vazão máxima de 1.313 L h⁻¹.

No Experimento 1, safra 2011/2012, foram delimitadas três faixas com dimensões de 20 m de largura e 40 m de

comprimento, sendo o manejo de irrigação adotado com base na tensão de água no solo (Tabela 1). Na segunda safra do Experimento 1 (2012/2013) as faixas tiveram dimensões de 7 m de largura e 40 m de comprimento. A tensão de água no solo foi monitorada por meio de sensores Watermark®, instalados na profundidade de 0,10 m. Na primeira safra foram utilizados 12 sensores por faixa e na segunda safra 14 sensores.

O Experimento 2 foi conduzido nas safras 2015/2016 e 2016/2017. A área experimental foi constituída por módulo com área de 0,7 ha, sendo irrigado por inundação. A área, sem diferença de nível

no terreno, foi dividida em quatro seções, submetidas a diferentes manejos de irrigação.

Na safra 2015/2016, pode-se verificar que um dos manejos adotados refere-se à inundação contínua (IC), no qual a água mantém-se no nível máximo do quadro durante todo o período de irrigação (estádio V4 a R7), com lâmina de água com altura de 75 mm de V4 até R0 e altura de 100 mm de R0 até R7. O segundo foi à inundação contínua com fornecimento intermitente (ICFI), em que após a primeira irrigação, com implantação de lâmina de 75 mm (V4), o manejo consiste em interromper o fornecimento de água à lavoura até atingir nível próximo ou igual ao do solo, de modo que, o solo permaneça saturado durante todo o ciclo do arroz.

No Experimento 2, na safra 2015/2016, também foi avaliado, em dois modelos físicos, o manejo do arroz por meio da inundação intermitente com retorno de irrigação (II), em que a manutenção da lâmina foi baseada na tensão de água no solo, sendo que o fornecimento de água foi realizado durante a fase aerada da cultura quando a tensão atingia o valor de 10 kPa em um dos modelos e 40 kPa no outro. A tensão do solo foi controlada por sensores Watermark®. O monitoramento foi

realizado por meio de seis repetições por parcela e a partir da leitura do sensor, no início da manhã, decidia-se pela necessidade de irrigação ou não.

Na safra 2016/2017 (Experimento 2) utilizou-se em um dos modelos físicos o manejo de IC e em outro o ICFI. Também foram utilizados dois manejos de II considerando-se a tensão de água do solo. Em um desses, uma das parcelas da lavoura de arroz foi irrigada por meio da ICFI na fase vegetativa quando a tensão atingia 40 kPa e na fase reprodutiva, independentemente da tensão, aplicou-se a ICFI. Em outro, foi utilizada a ICFI quando a tensão atingia 40 kPa na fase vegetativa e 10 kPa na fase reprodutiva. O ciclo de desenvolvimento da cultura de arroz foi acompanhado por meio da escala de referência proposta por Counce, Keisling e Mitchell (2000), sendo a data da fase fenológica do R0 foi determinada, seguindo recomendações de STEINMETZ et al. (2004), pelo método de graus-dia.

Na Tabela 2, pode-se visualizar os valores das lâminas aplicadas pelos sistemas de irrigação, bem como a precipitação e a produtividade da cultura de arroz de cada uma das safras do Experimento 1 (PINTO, 2015) e do Experimento 2 (PARFITT et al., 2018).

Tabela 2. Lâmina aplicada, precipitação, chuva efetiva (CE) e produtividade da cultura do arroz em duas safras agrícolas para cada um dos métodos e manejos de irrigação adotados.

| Experimento 1 - Irrigação por aspersão | | | | |
|--|----------------|---|----------------------|--------------------------------|
| Safras | Manejo | Lâmina Aplicada (m ³ ha ⁻¹) | Precipitação (mm) | Prod. (t ha ⁻¹) |
| 2011/2012 | 20 kPa | 2910 | 409 | 5,85 |
| | 40/20 kPa | 2730 | | 5,48 |
| | 40 kPa | 2310 | | 4,27 |
| 2012/2013 | 10 kPa | 5340 | 429 | 7,38 |
| | 20 kPa | 3150 | | 4,5 |
| | 40 kPa | 1860 | | 3,37 |
| | 40/10 kPa | 3990 | | 6,36 |
| Experimento 2 - Irrigação por inundação | | | | |
| Safras | Manejo | Lâmina Aplicada (m ³ ha ⁻¹) | CE (mm) | Prod. (t ha ⁻¹) |
| 2015/2016 | IC | 5140 | 77 | 10,459 |
| | ICFI | 5140 | 327 | 9,851 |
| | II 10 kPa | 5140 | 291 | 9,407 |
| | II 40 kPa | 5140 | 306 | 9,014 |
| 2016/2017 | IC | 4730 | 121 | 11,28 |
| | ICFI | 4730 | 187 | 10,80 |
| | II 40 kPa/ICFI | 4730 | 313 | 10,58 |
| | II 40/10 kPa | 4730 | 331 | 9,83 |

Fonte: Adaptado de Pinto (2015) e Parfitt et al. (2018)

IC = Inundação Contínua; ICFI = Inundação Contínua com Fornecimento Intermitente; II 10 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de água no solo de 10 kPa na fase aerada; II 40 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase aerada; II 40/ICFI = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase vegetativa, e com ICFI na fase reprodutiva; II 40/10 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase vegetativa e com 10 kPa na fase reprodutiva; CE = Chuva Efetiva; Prod. = Produtividade.

Os totais de precipitação correspondentes ao Experimento 1, de ambas as safras, foram disponibilizados pela Embrapa Clima Temperado. Já os dados do Experimento 2 foram obtidos por meio de equipamentos instalados na lavoura de arroz. Nesse, na entrada de água de cada módulo de área foi instalado um hidrômetro para quantificar o volume utilizado em cada manejo de irrigação. A chuva diária em cada área foi obtida por meio do registro da altura da lâmina de água em cada parcela experimental. Além disso, foi instalado um

pluviômetro para mensurar a chuva de 24 horas, sendo que as medições da lâmina de água e da precipitação acumulada no pluviômetro foram realizadas simultaneamente.

A quantidade de água utilizada para o crescimento e desenvolvimento do arroz normalmente é estimada por meio da pegada hídrica, a qual considera a parcela de água efetivamente incorporada pela planta por meio da evapotranspiração de referência da cultura, conforme proposto por Hoekstra et al. (2011).

No método de irrigação por inundação, mesmo que apenas uma parte da água seja efetivamente utilizada pela cultura do arroz, a presença de uma lâmina d'água sobre o solo desde a fase vegetativa até a maturação fisiológica geralmente favorece sua produtividade, ou seja, a cultura responde positivamente quando um determinado volume de água está sempre disponível em sua área de cultivo, mesmo que uma parte desta não esteja efetivamente envolvida na evapotranspiração. Desta forma, uma lâmina de água permanece constantemente sobre o solo, assim, a água captada no manancial é destinada especificamente para essa finalidade e limitada para outros possíveis usos.

Com base no exposto neste estudo adotou-se uma metodologia simplificada para a estimativa da pegada hídrica do arroz a partir dos conceitos definidos por Hoekstra et al. (2011). As equações foram adaptadas visando à estimativa de um valor que represente a quantidade de água requerida pela cultura do arroz durante todo o seu ciclo, ou seja, considerando-se o valor da lâmina de água disponibilizada para planta e restrita a esse uso.

A Equação 1 corresponde a Pegada Hídrica Azul (PH_{azul}) simplificada, a qual relaciona a lâmina de água disponibilizada durante o período de irrigação da cultura do arroz sobre a sua produtividade, sendo uma simplificação do método proposto por Hoekstra et al. (2011).

$$PH_{azul} = \frac{10.LI}{P_{rtv}} \quad (1)$$

PH_{azul} = Pegada Hídrica Azul (m^3t^{-1})
 LI = Lâmina de Irrigação multiplicada pelo fator 10, o qual possibilita converter a altura de lâmina de água em milímetros para volume de água por área ($m^3 ha^{-1}$)

P_{rtv} = Produtividade ($t ha^{-1}$)

A Pegada Hídrica Verde (PH_{verde}), apresentada na Equação 2, é obtida por meio da lâmina de precipitação disponível no solo após um evento de chuva, a qual é utilizada pela cultura e que contribui para manutenção da altura de água sobre a superfície do solo durante o cultivo sobre a produtividade do arroz.

$$PH_{verde} = \frac{10.P}{P_{rtv}} \quad (2)$$

PH_{verde} = Pegada hídrica verde (m^3t^{-1})

P = Precipitação multiplicada pelo fator 10, o qual possibilita converter a lâmina da água em milímetros para volume de água por área ($m^3 ha^{-1}$)

P_{rtv} = Produtividade ($t ha^{-1}$)

No Experimento 1, utilizou-se o valor da precipitação e no Experimento 2 considerou-se a chuva efetiva para o cálculo da PH_{verde} conforme apresentado na Tabela 2.

A Equação 3 representa a estimativa da Pegada Hídrica Simplificada (PHS), resultante do somatório da pegada hídrica azul simplificada e da pegada hídrica verde, baseando-se na metodologia de Hoekstra et al. (2011). Contudo, cabe destacar que foi denominada como pegada hídrica simplificada, pois não foi estimada a pegada hídrica cinza, que é uma das componentes da pegada hídrica total.

$$PHS = PH_{azul} + PH_{verde} \quad (3)$$

PHS = Pegada Hídrica Simplificada ($m^3 t^{-1}$)

PH_{azul} = Pegada Hídrica Azul (m^3t^{-1})

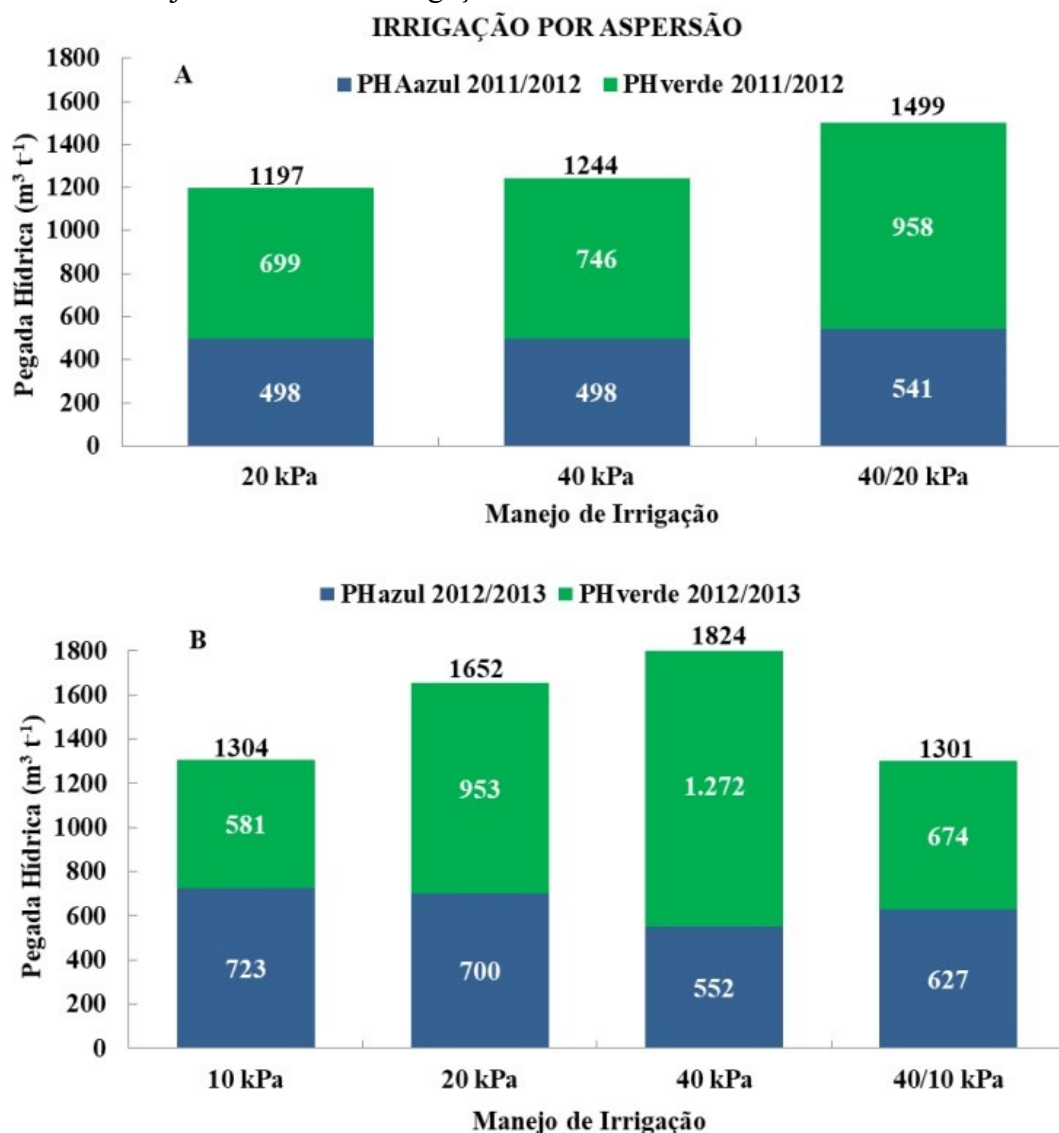
PH_{verde} = Pegada Hídrica Verde (m^3t^{-1})

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, estão dispostos os resultados da estimativa da pegada hídrica azul simplificada e da pegada hídrica verde

do Experimento 1, em que o arroz foi irrigado por aspersão com equipamento do tipo lateral móvel sob diferentes condições de manejo de irrigação em duas safras.

Figura 1. Pegada hídrica azul simplificada, pegada hídrica verde e pegada hídrica simplificada do Experimento 1, conduzido sob irrigação por aspersão e diferentes manejos da lâmina de irrigação.



Fonte: Adaptado de Pinto (2015)

Na safra de 2011/2012 todos os manejos de irrigação avaliados apresentaram uma PH_{verde} maior do que a PH_{azul} simplificada (Figura 1), ou seja, a quantidade de água disponibilizada pela chuva durante todo o cultivo foi maior do

que o volume captado no manancial hídrico.

Uma maior PH_{verde} representa maior volume precipitado disponível para as plantas e, conseqüentemente, uma redução na quantidade de água obtida por meio de

fontes de abastecimento, ou seja, indicando o uso de uma menor lâmina de irrigação para garantir o atendimento da necessidade hídrica da cultura. De acordo Silva et al. (2015), os valores da pegada hídrica azul aumentam à medida que ocorre incremento na irrigação. Essa afirmação encontra-se em concordância com o conceito de pegada hídrica azul simplificada apresentado neste trabalho, haja vista que esta componente representa a água de irrigação utilizada no processo de desenvolvimento da cultura.

Os resultados da estimativa da PH_{azul} simplificada demonstraram que essa apresentou o mesmo valor para os manejos de irrigação com base no limite médio de tensão de água no solo de 20 e 40 kPa nas safras de 2011/2012, o qual correspondeu a $498 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ conforme pode-se visualizar na Figura 1. Além disso, o manejo de irrigação nas tensões de 40/20 kPa de acordo com a fase da cultura do arroz resultou em maior PH_{azul} simplificada de $541 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, mesmo que a PH_{verde} tenha sido de $958 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, ou seja, superior aos demais.

A comparação dos três sistemas de manejo de irrigação também permitiu verificar que o método com base na tensão média de água no solo de 20 kPa proporcionou menor PHS, resultando em $1197 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Percebe-se que no sistema de irrigação por aspersão (Experimento 1), quanto mais úmido for mantido o solo (20 kPa e 40 kPa *versus* 40/20 kPa), melhor é o aproveitamento da cultura. Desta forma, o manejo da irrigação por aspersão a 20 kPa resultou em menor PHS, demonstrando maior aproveitamento da água em comparação aos demais manejos.

Na safra de 2012/2013, conforme exposto na Figura 1, a PH_{verde} foi maior que a PH_{azul} simplificada nos manejos de 20 kPa, 40 kPa e 40/10 kPa, ou seja, esses apresentaram um volume de água disponibilizado pela chuva maior em relação ao utilizado por meio da irrigação.

O manejo de irrigação com base na tensão média de água no solo de 10 kPa

resultou em maior PH_{azul} simplificada, associado a maior produtividade ($7,38 \text{ t ha}^{-1}$) dentre os manejos adotados com o método de irrigação por aspersão (Tabela 2), e também devido a menor contribuição da PH_{verde} . Por outro lado, a menor PH_{azul} simplificada foi obtida no manejo de 40 kPa, relacionado à menor produtividade apresentada ($3,37 \text{ t ha}^{-1}$), resultando também maior valor de PH_{verde} .

A comparação dos quatro sistemas de manejo de irrigação na safra de 2012/2013 possibilitou constatar que os critérios de manejo com base nas tensões de água no solo de 10 kPa e 40/10 kPa, proporcionaram os menores valores pegadas hídricas simplificadas. Esses manejos, pelo fato de terem apresentado as maiores produtividades, resultaram em menores valores de PH_{verde} e PHS.

As menores tensões de água no solo proporcionam disponibilidades hídricas próximas à saturação, o que favorece o desenvolvimento da cultura de arroz. De acordo com Villa et al. (2006), a manutenção da lâmina de água no sistema inundado possibilita efeitos benéficos no controle de plantas daninhas, pois essa funciona como uma barreira física, impedindo a germinação das sementes de plantas daninhas pela redução da oxigenação da superfície do solo, sendo essa condição possível em sistemas por aspersão quando adotadas as menores tensões de manejo irrigação. Além disso, segundo Pinto et al. (2016) a produtividade do arroz irrigado por aspersão é consequência do efeito do conjunto entre a tensão de água no solo e dos atributos químicos, principalmente, pelo fato de a água ser o meio de absorção dos nutrientes pelas plantas

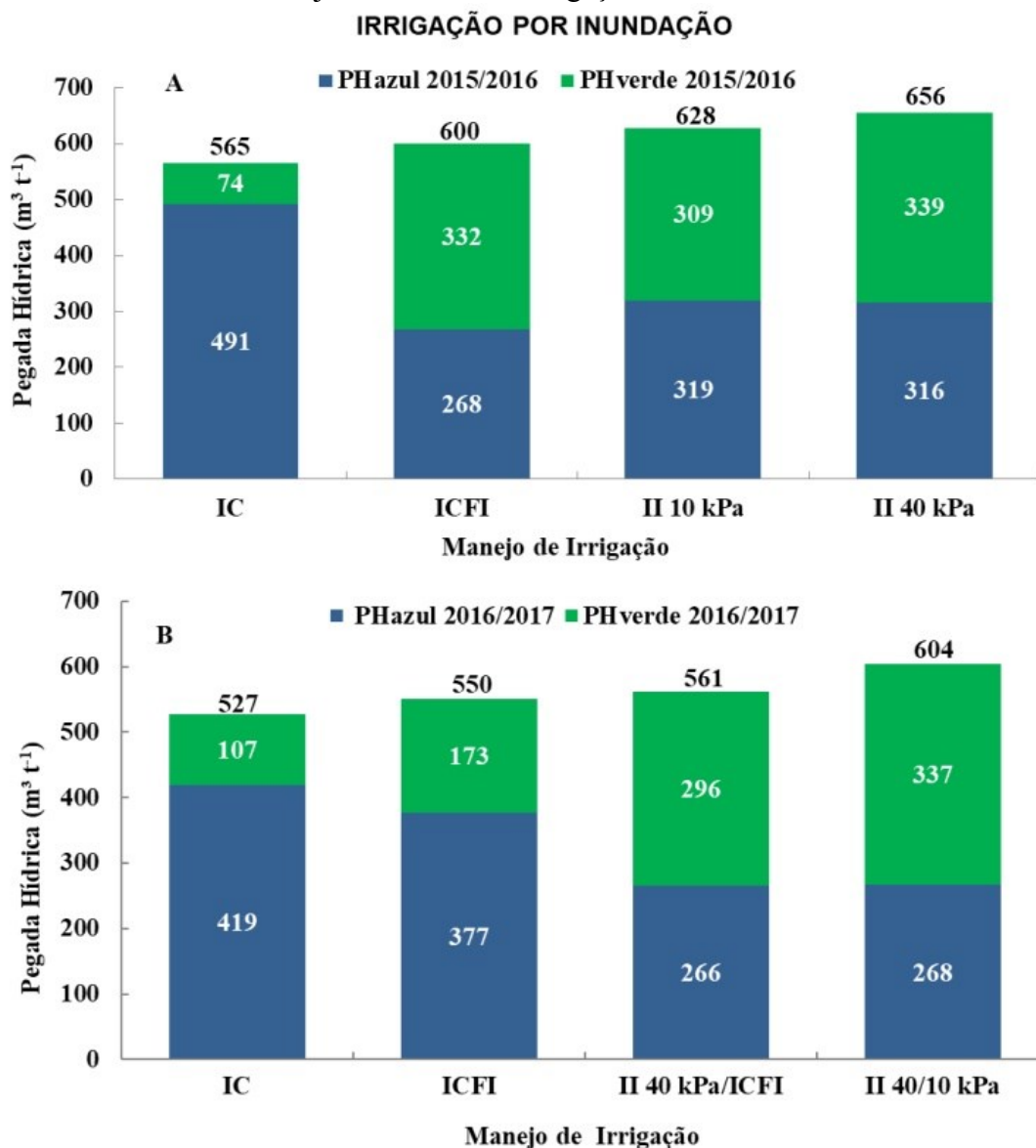
Comparando a PHS das duas safras de arroz obtidas pelo método de irrigação por aspersão (Experimento 1), verifica-se que a safra 2012/2013 apresentou maiores valores, esse resultado está relacionado à influência de fatores climáticos que elevam

a evapotranspiração da cultura. Além disso, cabe ressaltar que foram aplicados sistemas de manejo distintos em cada uma das safras.

Na Figura 2 estão dispostos os resultados da pegada hídrica azul

simplificada e da pegada hídrica verde do Experimento 2, irrigado por inundação sob diferentes manejos da lâmina de irrigação, sendo que a estimativa corresponde a duas safras da cultura do arroz.

Figura 2. Pegada hídrica azul simplificada, pegada hídrica verde e pegada hídrica simplificada do Experimento 2 conduzido sob irrigação por inundação e diferentes manejos de lâmina de irrigação.



Fonte: Adaptado de Parfitt et al. (2018)

IC = Inundação Contínua; ICFI = Inundação Contínua com Fornecimento Intermitente; II 10 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de água no solo de 10 kPa na fase aerada; II 40 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase aerada; II 40/ICFI = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase vegetativa, e com ICFI na fase reprodutiva; II 40/10 kPa = Inundação Intermitente com retorno da irrigação com tensão de 40 kPa na fase vegetativa e com 10 kPa na fase reprodutiva.

Na safra de 2015/2016, pode-se visualizar que a menor PH_{verde} refere-se ao manejo de irrigação contínua (Figura 2). Já a menor PH_{azul} simplificada corresponde ao manejo de irrigação contínua com fornecimento de água intermitente, que foi de $268 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Além disso, o maior valor de PH_{azul} simplificada refere-se ao manejo de irrigação contínua, que pode ser justificado pelo maior volume de água fornecido via irrigação para manutenção da lâmina de água durante as fases vegetativa e produtiva do arroz.

A comparação da PHS dos quatro sistemas de manejo utilizados possibilitou constatar que o sistema de irrigação mais satisfatório foi ICFI, pois apresentou uma PH_{verde} semelhante ao de II 10 kPa e II 40 kPa, porém sua PH_{azul} simplificada foi menor em relação aos demais (Figura 2). De modo análogo ao ocorrido para o método de irrigação por aspersão, as altas produtividades de grãos obtidas em ICFI refletem fortemente no indicador de PHS, resultando em menor volume de água necessário para produzir cada tonelada de arroz.

Na safra de 2016/2017, conforme a Figura 2, a PH_{verde} foi menor para os manejos por IC e ICFI, indicando que uma menor quantidade de água proveniente da precipitação estava disponível para as plantas neste período. Assim, a PH_{azul} simplificada foi maior para esses sistemas de manejo, sendo que o maior valor correspondeu a $419 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, valor referente ao manejo de IC.

A análise dos quatro sistemas de manejo possibilitou verificar que a PHS

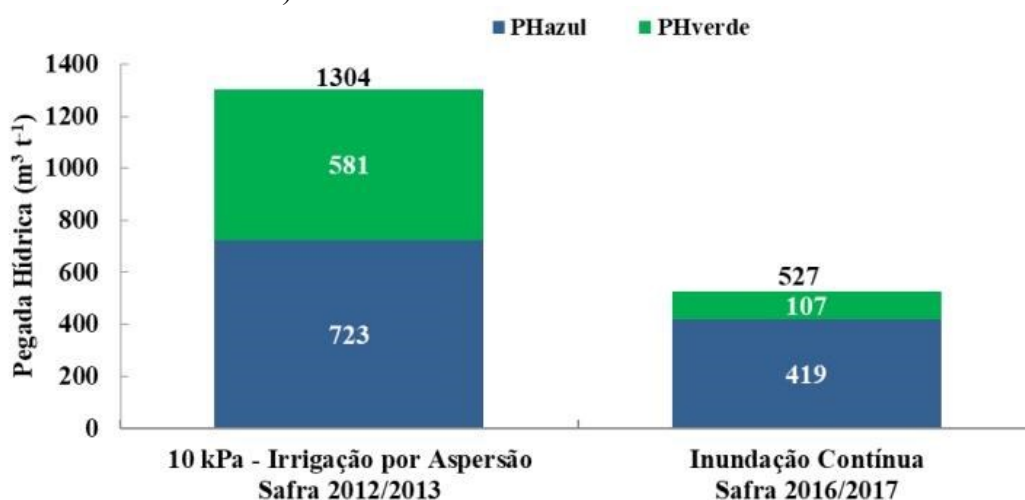
apresentou valores próximos para os manejos de irrigação por IC, ICFI e II 40 kPa/ICFI, os quais foram, respectivamente, 527, 550 e $561 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, porém o sistema II 40 kPa/ICFI foi mais eficiente. Além disso, cabe destacar que o maior valor da PHS foi obtido por meio do manejo II 40/10 kPa, porém possivelmente está associado à contribuição da PH_{verde} .

Os manejos aplicados nas safras de 2015/2016 e 2016/2017 foram em sua maioria distintos, com exceção dos manejos de IC e ICFI. Os resultados demonstraram que uma menor pegada hídrica azul simplificada foi requerida pelo sistema ICFI, a qual corresponde a $268 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na safra de 2015/2016 e $376 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na safra de 2016/2017.

A realização do comparativo dos demais sistemas entre safras não foi possível, porém entre os outros métodos de manejo analisados, o II 40/ICFI foi o que apresentou uma menor PH_{azul} simplificada que correspondeu a $268 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$.

Na Figura 3 foi realizada a comparação da PH_{azul} simplificada e da PH_{verde} entre o Experimento 1 (aspersão) e Experimento 2 (inundação contínua), considerando apenas o manejo de irrigação que apresentou a maior produtividade de grãos. O maior valor de produtividade, em relação ao sistema de irrigação por aspersão do tipo de lateral móvel, foi obtido por meio do manejo de irrigação com base na tensão de água no solo de 10 kPa na safra de 2012/2013, e no método de irrigação por inundação, a maior produtividade foi obtida com a aplicação do manejo irrigação contínua (IC) em ambas as safras.

Figura 3. Pegada hídrica azul simplificada, pegada hídrica verde e pegada hídrica simplificada do Experimento 1 (safra de 2012/2013) e a do Experimento 2 (safra de 2016/2017).



Fonte: Adaptado de Pinto (2015) e Parfitt et al. (2018)

A PH_{verde} foi maior no sistema de irrigação por aspersão (Figura 3), uma vez que neste sistema o solo não está saturado e o aproveitamento da água da chuva é maior. A PH_{azul} simplificada também foi maior para o sistema de irrigação por aspersão, o que ocorre sobretudo pela diminuição da produtividade do arroz quando irrigado por aspersão (Tabela 2). De acordo com Pinto et al. (2020) a produtividade do arroz irrigado por aspersão corresponde a 87% da produtividade do arroz irrigado por inundação.

A PHS estimada para o sistema de irrigação por aspersão no manejo de 10 kPa foi de $1304 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, sendo maior do que a obtida para o sistema de IC de $527 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. O valor da PHS do sistema de irrigação contínua também foi inferior ao encontrado por alguns autores para o cultivo de arroz, em relação ao resultado da pegada hídrica verde mais a pegada hídrica azul. Marano e Filippi (2015) obtiveram como somatório total $914 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ em experimento com a cultura do arroz conduzido na Argentina. A estimativa de Chapagain e Hoekstra (2011) foi de $854 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ em experimento conduzido na China. Zhuo, Mekonnen e Hoekstra (2016) foram os que apresentaram um resultado mais aproximado ao deste estudo,

de $639 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ para os experimentos realizados na região chinesa.

É importante ressaltar que as condições avaliadas no presente estudo são experimentais, não refletindo fielmente aquelas obtidas em lavouras comerciais, que pode ser constatado pelas elevadas produtividades de grãos. Nessas condições, a PHS obtida no Experimento 2 (inundação contínua) foi particularmente beneficiada, pois se trata de um sistema consolidado e ajustado para altas produtividades, enquanto o sistema de produção de arroz na condição de irrigação por aspersão no sul do Brasil ainda está em plena evolução.

Maiores valores de PHS no sistema de irrigação por aspersão estão fortemente associados ao fato do arroz ter apresentado menores produtividades. Contudo, não foi possível identificar o que proporcionou a menor produtividade da cultura do arroz quando irrigado por meio deste sistema, pois essa está relacionada tanto com o manejo da irrigação quanto com fatores como: melhoramento genético das variedades de arroz para o método de irrigação por aspersão, controle de pragas e plantas daninhas, manejo da fertilidade do solo, condições climáticas, entre outros, os quais têm sido avaliados por diferentes

pesquisadores. No entanto, ainda não foram definidas as condições ideais de manejo, as quais sejam capazes de garantir a elevada produtividade do arroz por meio da irrigação por aspersão, visto que o uso desse sistema nessa cultura ainda é incipiente.

Já em relação à irrigação contínua, a produtividade do arroz é maior devido à disponibilidade hídrica e também porque são dominados os fatores que afetam a produtividade de grãos ao adotar-se esse sistema. Os sistemas de produção intensificados, com elevada adoção tecnológica e bem ajustados para irrigar pelo sistema de inundação, apesar de necessitarem de maior volume de água, tendem a produzir mais grãos por unidade de área e favorecer a obtenção de menores valores de pegada hídrica. Assim, destaca-se a importância da realização de pesquisas com o objetivo de proporcionar também o ajuste do sistema de produção de arroz irrigado por aspersão para obtenção de maiores produtividades e menores valores de pegada hídrica.

Este estudo avaliou a pegada hídrica do arroz irrigado no sul do Brasil através de uma simplificação da metodologia de estimativa da pegada hídrica tradicional. Cabe destacar que os valores da pegada hídrica do arroz variam bastante com base na região avaliada, no manejo e no método de irrigação da cultura. Xinchun et al. (2018) realizou um levantamento bibliográfico das pegadas hídricas verde e azul estimadas por diversos pesquisadores, sendo cada uma obtida para uma determinada localidade, correspondendo a um total de quatorze regiões, onde a soma

das frações azul e verde variou aproximadamente de 771 a 2005 m³ t⁻¹. Desta forma, verifica-se que não há um valor específico que represente a pegada hídrica da cultura do arroz mundialmente, o que retrata a importância de estudos para compreensão do comportamento da pegada hídrica no Rio Grande Sul e no Brasil.

6 CONCLUSÕES

A tensão de água no solo mantida mais próxima à condição de saturação do solo, a 20 kPa na safra 2011/2012 e a 10 kPa na safra 2012/2013 resultaram em menor pegada hídrica simplificada do arroz irrigado para o método de irrigação por aspersão.

O manejo da lâmina irrigada por inundação contínua apresentou uma menor pegada hídrica simplificada entre os métodos de irrigação por inundação.

O método de irrigação por inundação contínua apresentou uma menor pegada hídrica simplificada em comparação ao método de irrigação por aspersão (no limite de tensão de 10 kPa).

A produtividade de grãos exerceu forte influência sobre os valores de pegada hídrica simplificada do arroz irrigado.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Embrapa Clima Temperado pelo apoio técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização dos trabalhos prévios que serviram de base para este estudo.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. S. R.; SILVA, M. T.; CAMPOS J. H. B. C.; HOLANDA, R. M.; DANTAS NETO, J.; SOUZA, E. P.; MATSUNAGA, W. K.; SANTOS, K. S.; SILVA, V. P. R. Pegada hídrica de plantas hortícolas cultivadas no semiárido brasileiro. **Revista IberoAmericana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 10, n. 4, p. 45-56, 2019.

ARUNRAT, N.; PUMIJUMNONG, N.; SEREENONCHAI, S.; CHAREONWONG, U.; WANG, C. Assessment of climate change impact on rice yield and water footprint of large-scale and individual farming in Thailand. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 726, n. 15, p. 137864, 2020.

BLENINGER, T.; KOTSUKA, L. K. Conceitos de água virtual e pegada hídrica: estudo de caso da soja e óleo de soja no Brasil. **Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 36, n. 1, p. 15-24, 2015.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 70, n. 4, p. 749-758, 2011.

CONAB. **Evolução dos custos de produção e rentabilidade do arroz irrigado gaúcho nos anos-safra 2006/07 a 2016/17**. Brasília, DF: Conab, 2016. v. 1.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

CUNHA, N. G.; COSTA, F. A. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. (Circular Técnica, 152).

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul - 2019**. Porto Alegre: SEPLAG, 2019.

EMPINOTTI, V. L.; TADEU, N. D.; MARTINS, R. S. L. Análise crítica da Pegada Hídrica Cinza na produção de celulose. **Revista Ambiente & Água**, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 166-177, 2013.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANISATION. **FAOSTAT Database**. Rome: FAO, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 19 out. 2020.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. Washington, DC: Earthscan, 2011.

HONGYING, L.; LIJIE, Q.; HONGSHI, H. Characteristics of the water footprint of rice production under different rainfall years in Jilin Province, China. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 98, n. 8, p. 3001-3013, 2017.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DE ARROZ. **Boletim de Resultados da Lavoura: Safra 2018/19 - Arroz irrigado e soja em rotação**. Porto Alegre: DATER, 2019.

LAMASTRA, L.; SUCIU, N. A.; NOVELLI, E.; TREVISAN, M. A new approach to assessing the water footprint of wine: an Italian case study. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 490, n. 15, p. 748-756, 2014.

MARANO, R. P.; FILIPPI, R. A. Water footprint in paddy rice systems. Its determination in the provinces of Santa Fe and Entre Ríos, Argentina. **Ecological Indicators**, n. 56, p. 229-236, 2015.

MUTHAYYA, S.; SUGIMOTO, J. D.; MONTGOMERY, S.; MABERLY, G. F. An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. **Annals of the New York Academy of Sciences**, New York, v. 1324, n. 1, p. 7-14, 2014.

ORTIZ-RODRIGUEZ, O. O.; NARANJO, C. A.; GARCÍA-CACERES, R. G.; VILLAMIZAR-GALLARDO, R. A. Water footprint assessment of the Colombian cocoa production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 9, p. 823-828, 2015.

PARFITT, J. M. B.; SILVA, J. T.; BUENO, M. V.; TIMM, P. A.; CAMPOS, A. D. S.; AIRES, T.; TIMM, L. C. **Quantificação da demanda hídrica na cultura do arroz em função do manejo da irrigação por inundação**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2018. (Circular Técnica, 313)

PINTO, M. A. B. **Irrigação por aspersão em arroz em função da tensão de água no solo**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; SCIVITTARO, W. B. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1584-1593, 2016.

PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; CONCENÇO, G.; STUMPF, L.; NÖRENBERG, B. G. Sprinkler irrigation in lowland rice: Crop yield and its components as a function of water availability in different phenological phases. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 248, p.107714, 2020.

SILVA, V. P. R.; ALEIXO, D. O.; DANTAS NETO, J.; MARACAJÁ, K. F. B.; ARAÚJO, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 100-105, 2013.

SILVA, V. P. R.; ALBUQUERQUE, M. F.; ARAÚJO, L. E.; CAMPOS, J. H. B. C.; GARCÊZ, S. L. A.; ALMEIDA, R. S. R. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 521-526, 2015.

SHERESTA, S.; CHAPAGAIN, M.; BABEL, M. S. Quantifying the impact of climate change on crop yield and water footprint of rice in the Nam Oon Irrigation Project, Thailand. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 599-600, n. 1, p. 689-699, 2017.

STEINMETZ, S.; INFELD, J. A.; ASSIS, F. N.; WREGE, M. S.; FERREIRA, J. S. A. **Uso do método de graus-dia para estimar a data de diferenciação da panícula de grupos de cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. (Documentos, 126).

VILLA, S. C. C.; MARCHEZAN, E.; MASSONI, P. F. S.; SANTOS, F. M.; AVILA, L. A.; MACHADO, S. L. O.; TELO, G. M. Controle de arroz vermelho em dois genótipos de arroz (*Oryza sativa*) tolerantes a herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 549-555, 2006.

XINCHUN, C.; MENG YANG, W.; RUI, S.; LA, Z.; DAN, C.; GUANGCHENG, S.; XIANGPING, G.; WEIGUANG, W.; SHUHAI, T. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: a case study of irrigated paddy rice in East China. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 610-611, p. 84-93, 2018.

ZHUO, L.; MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The effect of inter-annual variability of consumption, production, trade and climate on crop-related green and blue water footprints and inter-regional virtual water trade: a study for China (1978–2008). **Water Research**, New York, v. 94, p. 73-85, 2016.