

MODELO PARA ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE CULTURAS IRRIGADAS BASEADO NO BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL: APRESENTAÇÃO E APLICAÇÃO

MARCO ANTÔNIO JACOMAZZI¹; JOSÉ ANTONIO FRIZZONE²; ASDRUBAL JESUS FARIAS RAMIREZ³; MARIA ALEJANDRA MORENO-PIZANI⁴; FABIO TOMASELLA JOHANSSON⁵ E SERGIO NASCIMENTO DUARTE⁶

¹Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91501-970, Porto Alegre/RS, (19) 98156-4809, marcoantono@rasa.eng.br

²Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Av. Pádua Dias nº11, Bairro São Dimas, Piracicaba – SP, Brasil, CEP: 13.418-900, frizzone@usp.br

³RASA Engenharia, Edifício Racz Center, R. Alfredo Guedes nº 1949, sala 506, Higienópolis, Piracicaba- SP, cep: 13.419-080, Brasil, ajfara@gmail.com.

⁴PECEGE, R. Alexandre Herculano, nº 120, T6, Vila Monteiro, Piracicaba – SP, cep: 13.418-455, Brasil, morenom76@gmail.com.

⁵Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Av. Pádua Dias nº11, Bairro São Dimas, Piracicaba – SP, Brasil, CEP: 13.418-900, fabiojohansson@usp.br.

⁶Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Av. Pádua Dias nº11, Bairro São Dimas, Piracicaba – SP, Brasil, CEP: 13.418-900, snduarte@usp.br.

1 RESUMO

Agricultura moderna tem utilizado recursos computacionais para planejar o uso racional da água em sistemas irrigados. O constante avanço tecnológico destes recursos torna necessária a atualização dos softwares desenvolvidos para a área de irrigação, incorporando tecnologias mais recentes. O objetivo deste trabalho foi elaborar uma ferramenta computacional de fácil acesso, que permitisse ao usuário escolher critérios para as áreas irrigadas, e apresentar um exemplo de aplicação. Esse programa foi desenvolvido para auxiliar na tomada de decisão sobre o nível de manejo de irrigação suplementar a ser adotado, levando em consideração as chuvas a partir de uma série histórica de dados e a máxima produtividade esperada para a cultura. O aplicativo requer dados de parâmetros climáticos regionais, características da cultura irrigada, propriedades do solo e manejo de água adotado como entrada. Ele permite estimar a evapotranspiração de referência usando quatro métodos diferentes a partir dos dados climáticos disponíveis. Simulações realizadas para a região de Piracicaba - SP, onde o déficit hídrico não é acentuado, mostraram as diferenças no nível de depleção da água do solo adotado foram insignificantes. Entretanto, essas diferenças podem ser potencializadas para regiões mais áridas. Essa ferramenta pode ser útil para usuários de diferentes regiões climáticas no país.

Keywords: Modelagem, Manejo da Irrigação, Irrigação Suplementar.

JACOMAZZI, M.A.; FRIZZONE, J.A.; RAMIREZ, A.J.F.; PIZZANI, M.A.M.; JOHANSSON, F.T.; DUARTE, S.N.

MODEL TO ESTIMATE IRRIGATED CROP YIELD USING SEQUENTIAL WATER BALANCE: PRESENTATION AND APPLICATION

2 ABSTRACT

Modern agriculture has been using computer resources to plan the rational use of water in irrigated systems. Due to the constant advancement of these resources, it is necessary to update the software developed for the irrigation sector, incorporating newer technologies. The objective of this work was to develop a user-friendly computational tool that would allow the user to choose criteria for irrigated areas and provide an example of application. This program was developed to assist in the decision-making process regarding the level of supplementary irrigation management to be adopted, taking into consideration rainfall from a historical series of data and the maximum expected productivity for the crop. The application requires regional climatic parameter data, characteristics of the irrigated crop, soil properties, and water management adopted as input. It allows the estimation of reference evapotranspiration using four different methods based on available climatic data. Simulations conducted for the Piracicaba region in Brazil, where water deficit is not significant, showed that differences in the adopted soil water depletion level were insignificant. However, these differences may be amplified for more arid regions. This tool can be useful for users from different climatic regions in the country.

Keywords: Modeling, Irrigation Management, Supplementary Irrigation.

3 INTRODUÇÃO

O manejo da irrigação refere-se ao uso cuidadoso dos recursos hídricos disponíveis para alcançar um determinado objetivo, como obter alta produtividade das culturas por meio do uso eficiente da água, energia e outros recursos de produção. As práticas convencionais de irrigação baseiam-se em duas especificações chaves: necessidade de água da cultura e eficiência de uso de água (SILVA et al., 2020).

Para dar suporte à formulação de calendários de irrigação, por muitos anos, as pesquisas guiadas por várias ideias sobre o nível desejável de uso da água no solo tentaram relacionar a produção das culturas com a quantidade de água (CAPORUSSO; ROLIM, 2015).

Assim, foram estabelecidos dois princípios básicos para o manejo da irrigação: (i) irrigação para máxima produção por unidade de área – com esse objetivo utiliza-se a irrigação plena, isto é, satisfaz-se totalmente a necessidade de água da cultura para evitar perdas de produtividade ou qualidade do produto

(DOORENBOS; PRUITT, 1977); e (ii) irrigação para maximizar a produção por unidade de volume de água aplicada – com esse objetivo visa-se economizar água pelo aumento da eficiência de aplicação de água, pressupondo-se que a disponibilidade de água constitui limitação à produção agrícola (MARTIN et al., 2012; SILVA et al., 2020).

Os níveis de eficiência preconizados são aqueles possíveis de serem obtidos com um grau de adequação da irrigação de cerca de 90% para culturas de alto ou médio valor econômico, ou em torno de 75% para culturas de baixo valor. A irrigação convencional é desse modo definida em termos da quantidade de água aplicada requerida para evitar déficit hídrico em 75% ou 90% do tempo (períodos de retorno de 4 ou 10 anos) (GURSKI et al., 2021).

A adequação da irrigação afeta a proporção da área que deve receber água em quantidade suficiente para evitar perdas de produtividade. Quando a lâmina de irrigação é menor que a necessidade hídrica da cultura, o grau de adequação diminui e a produtividade é reduzida. No entanto, esse cenário também resulta em menor

percolação, maior eficiência na aplicação de água, redução nos custos operacionais da irrigação e diminuição da lixiviação de produtos químicos.

A irrigação para atender plenamente a demanda de água da cultura é um problema relativamente simples e claramente definido, com um objetivo único. Entretanto, uma mudança fundamental deverá ocorrer nas práticas da irrigação nos próximos anos, em decorrência das pressões econômicas sobre os agricultores, da crescente competição pelo uso da água e dos impactos ambientais da irrigação. Estes fatores deverão motivar uma mudança de paradigma da irrigação, enfocando-se mais a eficiência econômica (PERRY et al., 2009) do que a demanda de água máxima para a cultura.

As mudanças climáticas, o desenvolvimento tecnológico de atividades industriais e o crescimento populacional, crescentes demandas de recursos hídricos, têm agravado a competição pelo uso da água para irrigação. Dessa forma, torna-se urgente a implantação de ações de gestão integrada de recursos hídricos visando atender seus múltiplos usos (GURSKI et al., 2021).

O manejo tradicional da irrigação é baseado na maximização da produção por unidade de área, sem considerar explicitamente os custos e lucros. Por outro lado, a otimização da irrigação leva em conta esses fatores econômicos, buscando maximizar a lucratividade, o que é um desafio mais complexo. Identificar as estratégias ideais de irrigação requer o uso de modelos detalhados que levem em conta as relações entre água e cultura, bem como a eficiência da irrigação. Além disso, é necessário incorporar explicitamente fatores econômicos, como os custos de produção, os preços do produto e os custos de oportunidade da água, nas análises.

O setor brasileiro de irrigação ainda segue os roteiros tradicionais de natureza imediatista, comumente empregados para o dimensionamento de sistemas de irrigação, não considerando a contribuição da

precipitação no atendimento parcial das necessidades hídricas das culturas e a disponibilidade hídrica regional dos rios e córregos (PAULINO et al., 2011).

A fim de implementar programas estratégicos para o desenvolvimento agrícola local ou regional, que levem em conta a disponibilidade de recursos hídricos superficiais, é fundamental quantificar as necessidades de água das culturas durante todo o ciclo produtivo de forma probabilística.

Uma técnica eficaz para estimativa do consumo de água pelas culturas para fins de irrigação é o balanço hídrico. Essa técnica é amplamente utilizada, por possibilitar a estimativa da variação temporal do armazenamento de água no solo, com estimativas da evapotranspiração real (PHOGAT et al., 2017), déficit hídrico, excedente hídrico e da lâmina de irrigação suplementar.

O emprego de modelos probabilísticos (YU et al., 2016), visando quantificar a frequência de eventos climatológicos, como a lâmina de precipitação efetiva, eventos extremos ou evapotranspiração potencial, tem sido largamente estudado nos últimos anos. Algumas das principais vantagens da aplicação da distribuição probabilística aos parâmetros climáticos são associadas à quantificação da necessidade de irrigação suplementar das culturas comerciais, fornecimento de subsídios para o dimensionamento adequado da capacidade do sistema de irrigação e possibilidade de estimativa do risco de quebra de safra e fracasso econômico da atividade agrícola irrigada (PRADO et al., 2020).

O propósito deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e a aplicação de um modelo computacional que utiliza simulações de balanços hídricos sequenciais para quantificar o rendimento das culturas e a quebra de produtividade de forma probabilística, considerando a aplicação de água por irrigação. O modelo utiliza uma

série histórica de anos para realizar as simulações e obter estimativas precisas da necessidade de irrigação das culturas. Essas estimativas são fundamentais em cenários de restrição hídrica, permitindo a tomada de decisões criteriosas quanto ao manejo da irrigação.

O modelo computacional desenvolvido permite estimar o rendimento esperado de cultivos em áreas irrigadas, além de calcular as lâminas de água acumuladas ao longo do ciclo da cultura. Esse modelo se baseia na simulação da irrigação suplementar por meio de balanços hídricos sequenciais, em escala diária, utilizando uma série histórica de dados fornecidos pelo usuário.

Os valores de lâmina de água disponível para a cultura (LAM) são

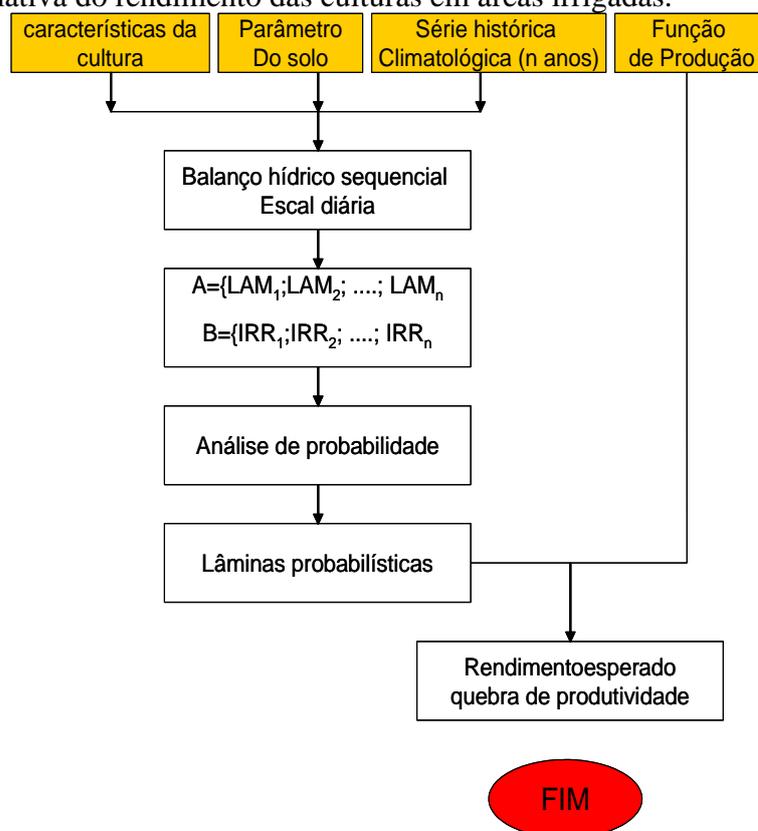
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do modelo computacional

calculados, levando em consideração a precipitação e as irrigações suplementares simuladas, ou apenas a lâmina líquida de irrigação suplementar (IRR), ambas acumuladas durante o ciclo da cultura. Em seguida, é aplicada uma análise de probabilidade sobre esses valores.

Utilizando os valores probabilísticos de LAM em funções de produção específicas, é possível estimar o rendimento médio esperado para a cultura. A figura 1 apresenta o resultado dessas estimativas.

Figura 1. Fluxograma geral do modelo computacional desenvolvido neste trabalho para estimativa do rendimento das culturas em áreas irrigadas.



Fonte: Jacomazzi(2004)

O modelo computacional foi codificado em linguagem Visual Basic, usando planilhas da plataforma do Excel.

O modelo requer os seguintes parâmetros de entrada:

- Propriedades do solo:
- Parâmetros da equação de van Genuchten: α ; θ_s ; θ_r ; n ; m ;

Características da cultura:

- Profundidade efetiva do sistema radicular;
- Duração do ciclo (em dias ou graus dias acumulados);
- Duração do ciclo para o sistema radicular atingir profundidade máxima;
- Potencial mátrico crítico da cultura;
- Época de suspender as irrigações;
- Resposta das culturas à irrigação ou função de produção em relação à água.

Dados climáticos:

- Dados diários de precipitação; e
- Escolha do modelo de estimativa da evapotranspiração de referência e os respectivos dados climáticos necessários.

4.2 Definição do momento de irrigação

O momento ideal para aplicação de água no solo, conhecido como momento de irrigar, é definido pela determinação de uma umidade mínima no solo (θ_{MIN}), que corresponde a uma tensão crítica da água no solo (Ψ_{CRIT}). Essa tensão crítica é estabelecida a partir da qual ocorre uma redução significativa no rendimento da cultura em análise.

A obtenção da θ_{MIN} é realizada utilizando-se um valor constante de Ψ_{CRIT} durante todo o ciclo da cultura, em um horizonte de tempo determinado, e considerando a curva de retenção de água do solo, utilizando o modelo de van Genuchten. Os parâmetros desse modelo são inseridos no início da rotina operacional e utilizados para calcular o armazenamento mínimo de

água no solo (ARMMIN). Com base nesses dados, é possível determinar o momento mais adequado para a aplicação de água no solo, a fim de garantir um rendimento máximo da cultura irrigada.

4.3 Estimativa da duração do ciclo da cultura

Existem duas abordagens propostas para estimar a duração do ciclo da cultura: a primeira é a estimativa dos graus-dia acumulados (GDA), e a segunda é a contabilização dos dias sucessivos do ciclo após a emergência (DAI). No método dos graus-dia acumulados, assume-se que o desenvolvimento da cultura é influenciado pelo clima que ocorre durante o seu ciclo. Quando os fatores de produção estão em equilíbrio e não há limitações, a performance das plantas é máxima. Nesse método, a duração dos ciclos sucessivos das culturas é determinada com base na somatória de unidades térmicas, ou graus-dia.

Já no método de contabilização dos dias sucessivos do ciclo após a emergência, a duração do ciclo é determinada a partir da observação direta do desenvolvimento da cultura, contando-se os dias sucessivos desde a emergência até a fase de maturação. Essa abordagem não considera as variações climáticas que podem influenciar no desenvolvimento da cultura. Ambas as abordagens possuem vantagens e desvantagens, devendo-se escolher a mais adequada para cada situação específica.

4.4 Variação da capacidade potencial de armazenamento de água do solo

De acordo com Pereira, Villa Nova e Sediya (1997), a equação geral para o cálculo da capacidade de água disponível no solo (CAD) para uma determinada profundidade pode ser determinada pela equação (1).

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \sum z_{EF} \quad (1)$$

Em que:

θ_{CC} – Umidade à base de volume, na capacidade de campo, m^3m^{-3} ;

θ_{PMP} – umidade à base de volume, no ponto de murcha permanente, m^3m^{-3} ; e

z_{EF} - profundidade efetiva do solo explorado, mm.

Umidade referente ao ponto de murcha permanente é definida como a umidade do solo correspondente a uma tensão da água de 1.500 kPa, sendo que o conceito em si é difícil de ser definido. A curva característica do solo é utilizada para a obtenção dessas umidades, segundo o modelo de regressão de Van Genuchten (1980).

Segundo Dourado Neto e Van Lier (1993), a profundidade do sistema radicular (z_{RAIZ}) progride linearmente a partir de um valor inicial, até atingir uma profundidade máxima, ou o crescimento radicular pode seguir um padrão sigmoidal.

A fim de contemplar ambas as metodologias supra descritas, propõe-se uma simplificação para estimativa do z_{RAIZ} baseando-se nos seguintes critérios:

- Será fornecido ao modelo valores de z_{RAIZ} com os seus respectivos índices de desenvolvimento da cultura (IDC) em forma de uma tabela;
- A partir destes valores fornecidos serão traçados segmentos de reta que interliguem os z_{RAIZ} (IDC) sequencialmente;
- O valor do z_{RAIZ} (IDC) atual será resultante da interpolação linear entre os dois valores tabelados mais próximos.

Embora o crescimento das raízes seja contínuo, não é possível medir o status da água do solo continuamente ao longo de todo o perfil explorado, pois não há equipamentos comerciais disponíveis para essa finalidade. Por isso, é comum dividir o perfil do solo em camadas e instalar equipamentos de monitoramento em profundidades de referência (z_{REF}), que representam a média da camada correspondente.

- Para garantir que as simulações da reposição de água no solo sejam consistentes com as práticas usuais de manejo de irrigação, são adotados os seguintes critérios: Manejo de irrigação à semelhança dos instrumentos de medida do “status” da água no solo, como sonda de capacitância, tensiômetro ou TDR;
- A profundidade usada para calcular a CAD acompanha o desenvolvimento da profundidade radicular (z_{RAIZ}) de forma estratificada. Assim, a profundidade total é dividida em camadas, cada uma com uma profundidade de referência (z_{REF}). A profundidade da camada só é considerada no cálculo da profundidade efetiva do solo quando o crescimento radicular atinge z_{REF} , ou seja, quando $z_{RAIZ} > z_{REF}$.

4.5 Determinação da evapotranspiração de referência (E_{To})

Para estimativa da evapotranspiração de referência (E_{To}) foram propostos quatro modelos distintos. A Tabela 1 apresenta, resumidamente, as principais variáveis climáticas exigidas para cada modelo que pode ser usado pelo programa como opção.

Tabela 1. Variáveis climáticas exigidas para cada modelo de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o).

Modelos	Temperatura	Umidade Relativa	Vento	Radiação	Evapotranspiração
Penman-Monteith	X	X	X	X	
Priestley-Taylor	X			X	
Thornthwaite	X				
Tanque Classe A		X	X		X

Fonte: Jacomazzi (2004)

Acrescenta-se que, além desses modelos de estimativa da ET_o (ČADRO et al., 2017), o programa permite, também, que o usuário insira, diretamente, o valor da ET_o no balanço hídrico sequencial, caso já disponha desses dados calculados.

4.6 Determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c)

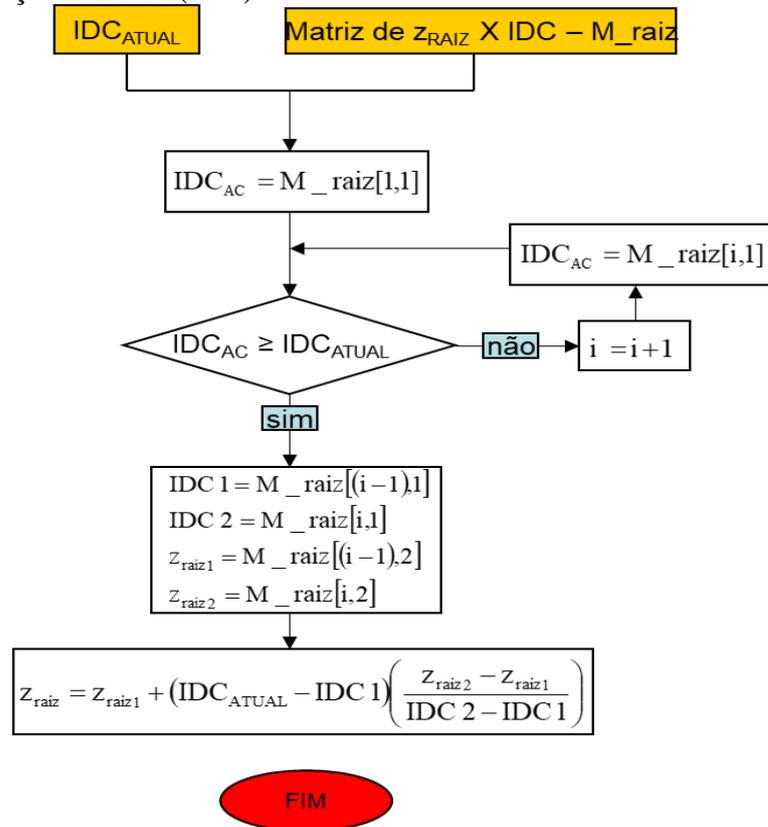
A equação (2) proposta por Doorenbos e Kassan (1979) é utilizada para estimar o consumo de água por uma cultura, sem limitação hídrica. Nessa equação, o coeficiente de cultura K_c (IDC) relaciona a evapotranspiração máxima da cultura (ET_c) com a evapotranspiração de referência (ET_o).

$$ET_c = kc(IDC)ET_o \quad (2)$$

O coeficiente de cultura (K_c) é influenciado pelo estágio de desenvolvimento da cultura, medido em dias ou graus dias. Portanto, esse coeficiente varia em função do estágio fenológico atual da cultura, que inclui eventos fisiológicos e evolução da área foliar. Os valores tabelados de K_c propostos pela FAO-24 em 1994 e revisados por Allen (1998) descrevem a evolução do K_c por meio de quatro segmentos linearizados.

Para simplificar a estimativa do K_c, uma abordagem similar à usada na estimativa do crescimento do sistema radicular é proposta, considerando tanto dias após a emergência quanto graus dia.

Figura 2. Fluxograma para determinação do coeficiente de cultura (K_c) em função do índice de duração do ciclo (IDC).



Fonte: Jacomazzi (2004)

4.7 O balanço hídrico diário sequencial

Uma abordagem para estimar o balanço hídrico em um sistema solo é baseada na análise das entradas e saídas de água em um volume específico do solo, onde o armazenamento de água é quantificado em tempo real (LOPES et al., 2017; MINACAPILLI et al., 2016). As principais entradas consideradas nesse sistema são a precipitação (CH) e a lâmina líquida de irrigação (IRR), e o excesso de água que ultrapassa a capacidade de armazenamento do solo é considerado como perda de água, seja por percolação profunda ou deflúvio superficial.

Diferentes metodologias, como as propostas por Braga (1982) e Dourado Neto e Van Lier (1993), combinam critérios e teorias existentes, como as utilizadas por Doorenbos e Pruitt (1977), Pereira, Villa Nova e Sentelhas (1997) e Camargo et al.

(1999), para considerar a evapotranspiração real da cultura (ETR) levando em conta a cultura, a demanda atmosférica medida pela evapotranspiração de referência (ET_o) e a disponibilidade de água no solo, medida pela fração de água disponível (FAD).

Esse modelo de balanço hídrico sequencial permite incorporar o manejo planejado da irrigação, definindo um armazenamento mínimo que determina o momento da irrigação e a variação gradual da capacidade de armazenamento de água no solo de forma estratificada. É importante ressaltar que esse modelo pode ser utilizado tanto com o modelo de depleção do armazenamento de água no solo proposto por Braga (1982) quanto pelo modelo proposto por Dourado Neto e Van Lier (1993).

4.8 Estimativa da lâmina de irrigação acumulada e da lâmina de água total acumulada ao longo do ciclo da cultura

Após a realização de cada balanço hídrico anual, é calculada a quantidade de água disponível para o ciclo da cultura. Assim, é construído um registro histórico de aplicação de água com todas as irrigações simuladas e as precipitações pluviárias ocorridas no mesmo período, com a exclusão do excedente, que é considerado perda. As equações (3) e (4) mostram como são realizados os cálculos para registrar essas lâminas de água.

$$IRR_{AC} = \sum_{i=\text{emergência}}^{\text{pmf}} IRR_i \quad (3)$$

$$LAM_{AC} = \sum_{i=\text{emergência}}^{\text{pmf}} (CH + IRR - EXC)_i \quad (4)$$

A partir desta matriz gerada é possível obter informações a respeito da operação do sistema de irrigação que são: a lâmina total aplicada devido somente à irrigação (IRRAC) e a lâmina total (LAMAC) à disposição da cultura (irrigação

$$Y(LAM) = k_1 LAM^{C1} + k_2 LAM^{C2} + k_3 LAM^{C3} + k_0 \quad (5)$$

Em que:

Y(LAM) - rendimento da cultura em função da LAM_{AC}, kg/ha-1;

LAM - Lâmina total de água disponível pela cultura em base probabilística, mm; e

k₀, k₁, k₂, k₃, C₁, C₂, C₃ - coeficientes de ajuste dos modelos matemáticos.

O modelo de estimativa de rendimento baseado na lâmina de água possui uma base probabilística, o que implica que a estimativa de rendimento

+ chuva – excedente), ao longo do ciclo da cultura.

4.9 Análise de probabilidade

O modelo permite ajustar distribuições teóricas de probabilidade com base em uma matriz de valores de lâminas de água, tanto totais quanto apenas de irrigação, a fim de estimar a frequência de ocorrência do evento com uma certa probabilidade.

O modelo inclui duas distribuições: a distribuição normal, que é a mais utilizada para variáveis contínuas, e a distribuição gama de dois parâmetros, definida para $x > 0$ e com os parâmetros α e $\beta > 0$.

Para avaliar a adequação dos dados à distribuição teórica escolhida, é aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov, que verifica a concordância entre a distribuição teórica conhecida (F) e a distribuição desconhecida dos dados (F°).

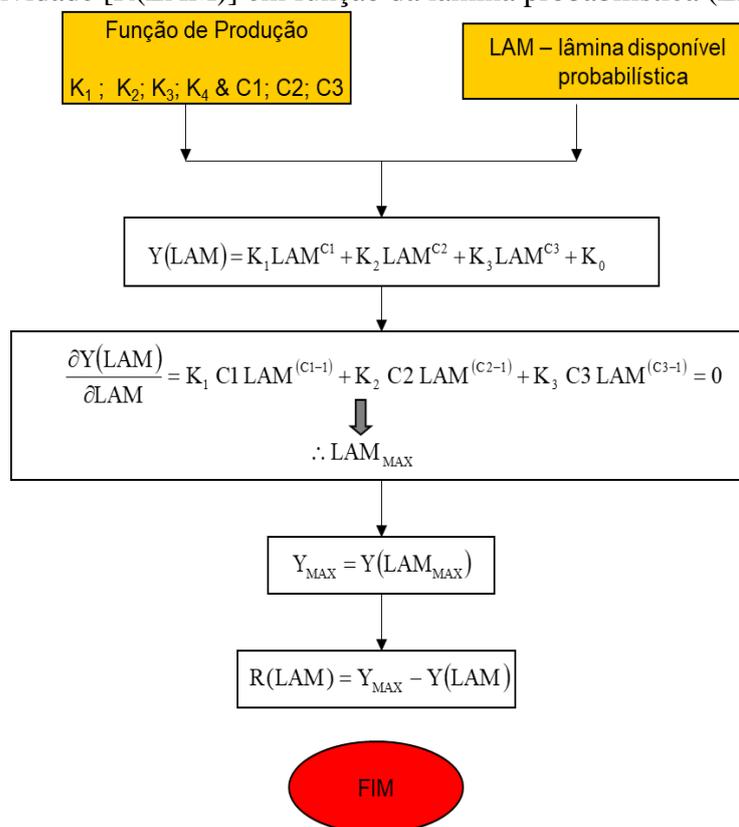
4.10 Estimativa da produtividade e da queda de rendimento dos cultivos

O modelo desenvolvido considera que a função de resposta da cultura à lâmina de água disponível é uma equação polinomial, conforme apresenta a equação (5).

também apresenta incertezas (Figura 3). O rendimento máximo (Y_{MAX}) é obtido através da raiz da derivada primeira da equação mencionada anteriormente. Por sua vez, a queda de rendimento [R(LAM)] é estimada subtraindo-se o rendimento máximo do rendimento atual, conforme apresentado na equação.

$$R(LAM) = Y_{MAX} - Y(LAM) \quad (6)$$

Figura 3. Fluxograma para a determinação do rendimento médio [Y(LAM)] e da queda de produtividade [R(LAM)] em função da lâmina probabilística (LAM).



Fonte: Jacomazzi (2004)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

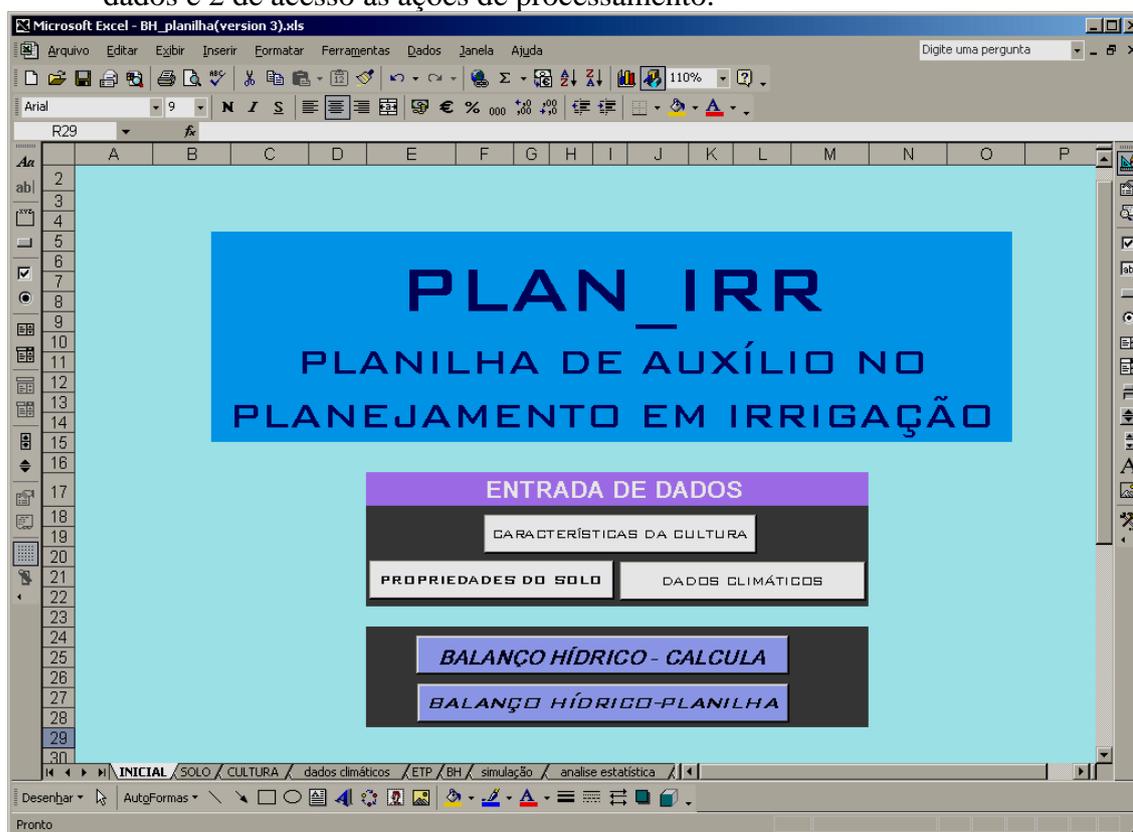
5.1 Descrição do programa

O programa é um aplicativo específico para ser utilizado no planejamento de sistemas irrigados. Esse programa visa auxiliar na tomada de decisão sobre: (i) nível de manejo de irrigação a ser adotado; (ii) previsão da ocorrência de disponibilidade de chuvas e (iii) estimativa da produtividade máxima esperada da

cultura (BORGES JUNIOR et al., 2012; PANDEY; PANKAJ; DABRAL, 2016; YU et al., 2016), para um grau de atendimento de irrigação adotado (irrigação com déficit).

A interface do programa (Figura 4) apresenta três opções para inserção de dados: características da cultura, propriedades do solo e dados climáticos. O programa também disponibiliza duas opções de ação: o cálculo do balanço hídrico e a visualização dos resultados na planilha correspondente.

Figura 4. Tela inicial do programa de planejamento da irrigação com 3 botões de entrada de dados e 2 de acesso às ações de processamento.



Fonte: Jacomazzi(2004)

5.2 Exemplo de aplicação

Para ilustrar o uso do programa e destacar sua utilidade, apresenta-se o exemplo a seguir, que visa demonstrar as potencialidades do software. Os dados climáticos utilizados nesta simulação foram obtidos no posto meteorológico do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", localizado em Piracicaba, SP. Este posto está situado a uma latitude de 22°42'30" sul e longitude de 47°38'00" oeste, com altitude de 546 metros.

Utilizou-se a cultura do milho “safrinha” irrigado para esta simulação proposta.

5.2.1 Dados utilizados e critérios considerados

5.2.1.1 Propriedades do solo

Modelo de estimativa do armazenamento do solo: van Genuchten. Os parâmetros da equação são apresentados na Tabela 2. Ressalta-se que estes parâmetros são ajustados à unidade de potencial mátrico em kPa.

Tabela 2. Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten

N	M	α	θ_r	θ_s
1,3701	0,27012	0,5077	0,2172	0,46

Fonte: Jacomazzi (2004)

- | | |
|--|---|
| <p>5 Potencial mátrico na capacidade de campo: 8 kPa;</p> <p>6 Potencial mátrico no ponto de murcha permanente: 1.500 kPa; e</p> <p>7 Momentos de irrigação: tensões de 40; 75; 100 e 200 kPa.</p> | <p>A Tabela 3 apresenta as umidades volumétricas calculadas para os potenciais mátricos na capacidade de campo (Ψ_{CC}) no ponto de murcha permanente (Ψ_{PMP}), e nos momentos de irrigação acima descritos.</p> |
|--|---|

Tabela 3. Parâmetros do manejo da irrigação adotados: unidade volumétricas estimadas segundo o potencial matricial.

Ψ_m (kPa)	θ (m^3m^{-3})
8	0,356
1500	0,238
40	0,296
75	0,28
100	0,274
200	0,261

Fonte: Jacomazzi (2004)

Na Tabela 4 são apresentados os valores estimados do armazenamento unitário de água, em $mm\ mm^{-1}$, para a capacidade total de água disponível (f_{CAD}) e para os momentos de irrigação adotados (f_{IRR}).

Tabela 4. Parâmetros do manejo da irrigação adotados e os respectivos armazenamentos unitários de água estimados

Denominação	Intervalo de potencial mátrico em kPa	Armazenamento unitário de água em $mm\ mm^{-1}$
fCAD	8-1500	0,12
F_IRR(40kPa)	8-40	0,060
F_IRR (75kPa)	8-75	0,076
F_IRR(100kPa)	8-100	0,082
F_IRR(200kPa)	9-200	0,095

Fonte: Jacomazzi (2004)

Modelo de estimativa da depleção da água do solo adotado: Dourado Neto e Van Lier (1993); Extração de água pelo sistema radicular: crescimento até 40 cm. Lâmina de irrigação de plantio: 20 mm.

5.2.1.2 Características da cultura

- Cultura: Milho “safrinha”;
- Possível data de emergência: 10 de março;
- Modelo de estimativa da duração do ciclo: Dias após emergência (DAI);
- Ciclo da cultura: 140 dias; e
- Evolução do Kc na Tabela 5:

Tabela 5. Valores do coeficiente Kc para a cultura de milho (HEINEMANN; SOUSA; FRIZZONE, 2001) segundo os respectivos dias após o início da emergência (DAI)

DAI	Kc
0	0,3
10	0,45
30	0,85
50	1,2
70	1,4
90	1,3
110	1,15
130	1

Fonte: Jacomazzi (2004)

Função de produção apresentada na Tabela 6:

Tabela 6. Coeficientes de ajuste do modelo da função de produção adotada

K1	K2	K3	K0	C1	C2	C3
-20,69	1151,9	-	-8481,94	1	0,5	-

Fonte: Jacomazzi (2004)

5.2.1.3 Dados climáticos

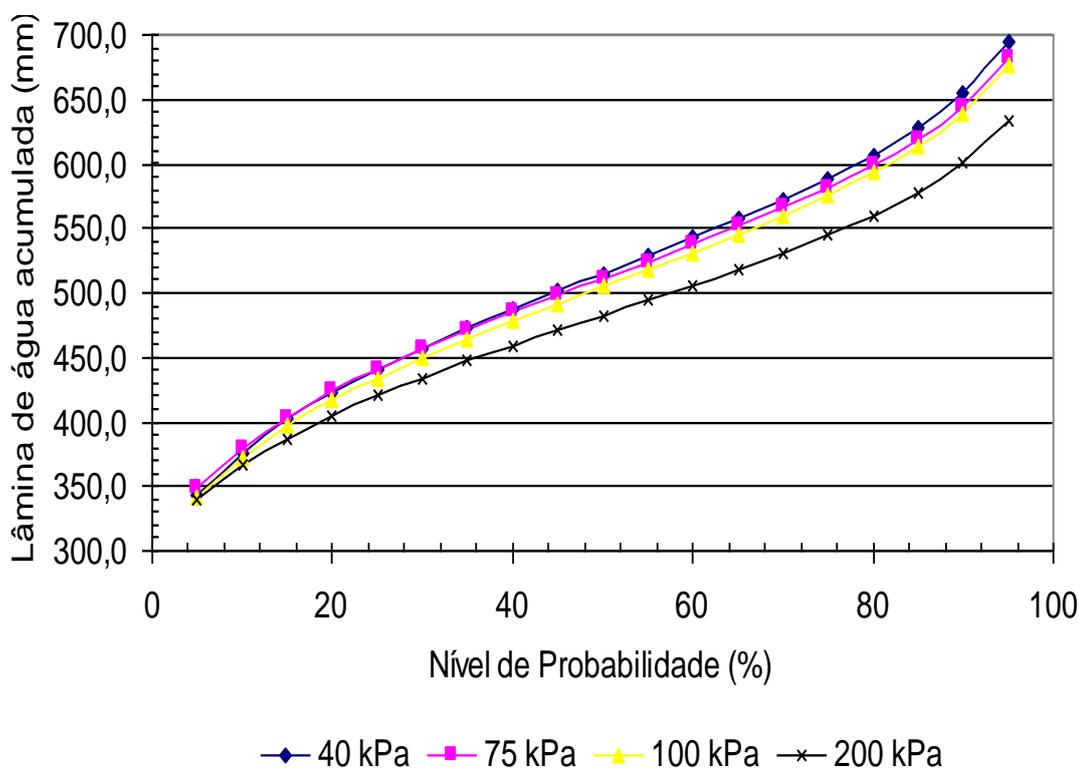
- Região: Piracicaba-SP;
- Série histórica dos dados: 45 anos;
- Modelo de estimativa da evapotranspiração potencial: 1° Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998; LONGOBARDI; VILLANI, 2013).
- Parâmetros da função de vento: $a = 1$ e $b = 0,526$;
- Altitude local: 540m;
- Período considerado para estimativa: Média mensal (CAPORUSSO; ROLIM, 2015).

Na Tabela 4 são apresentados os valores estimados do armazenamento unitário de água, em mm mm⁻¹, para a capacidade total de água disponível (f_CAD) e para os momentos de irrigação adotados (f_IRR).

5.2.2 Resultados do exemplo de aplicação

A Figura 5 mostra as lâminas totais esperadas (chuva e irrigação), em formato probabilístico, para os diferentes momentos de irrigação, pré-definidos para a simulação. A distribuição de probabilidade normal foi considerada a mais adequada para os dados simulados, de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Figura 5. Lâminas de água acumuladas esperadas (chuva e irrigação), em base probabilística, para diferentes momentos de se realizar a irrigação.



Fonte: Jacomazzi(2004)

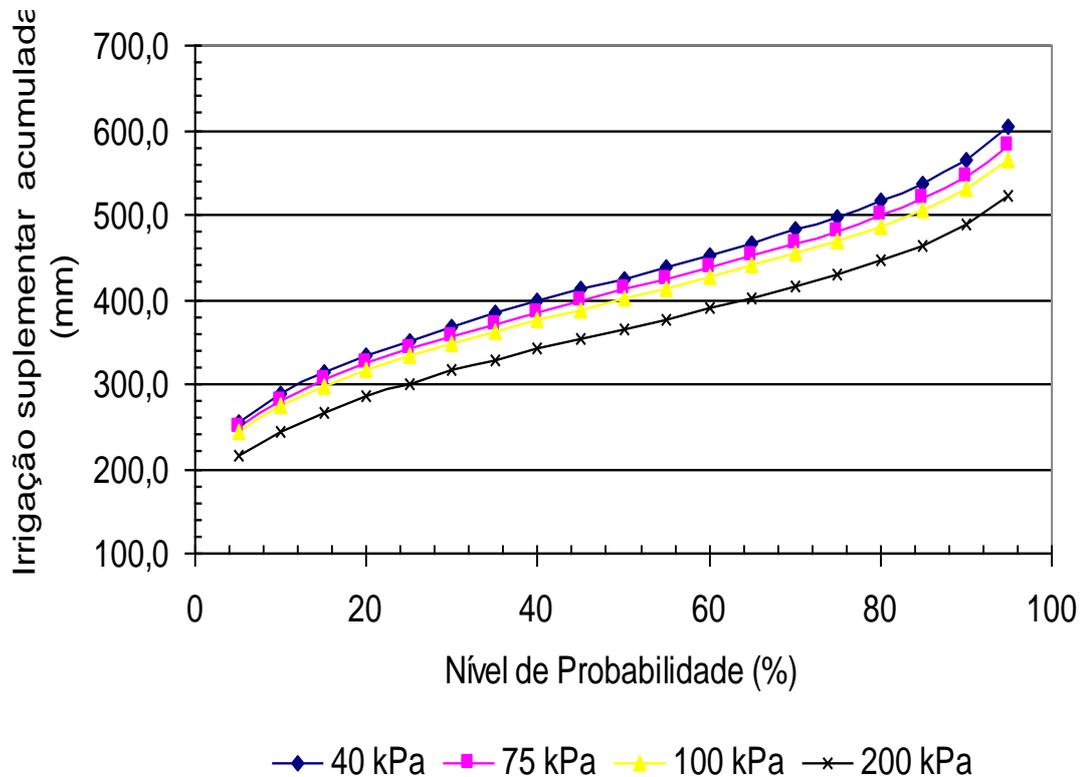
Observa-se pelos dados de lâmina simulados que a diferença das lâminas acumuladas entre a alternativa mais frequentemente irrigada (40 kPa) e a menos frequentemente irrigada (200 kPa) é de apenas 6,0 mm para o nível de probabilidade de 5% (pouco irrigado). No entanto, essa diferença aumenta consideravelmente para 61 mm no nível de probabilidade de 95%.

Apesar de um ligeiro aumento de lâmina aplicada para os momentos de irrigação mais frequentes, essa variação é insignificante quando comparada à

quantidade total de água (chuva e irrigação), que variou de 350 a 700 mm para o tratamento com irrigação mais frequente, como também foi observado por Prado et al. (2020) ao aumentar o grau de atendimento.

Com base nos dados de irrigação suplementar simulados e apresentados na Figura 6, verifica-se que a diferença das lâminas acumuladas entre a alternativa mais irrigada (40 kPa) e a menos irrigada (200 kPa) é de 38,3 mm para o nível de probabilidade de 5%, e de 82 mm para o nível de probabilidade de 95%.

Figura 6. Lâminas de irrigação suplementar acumuladas, em base probabilística, para diferentes tensões no momento da irrigação.



Fonte: Jacomazzi(2004)

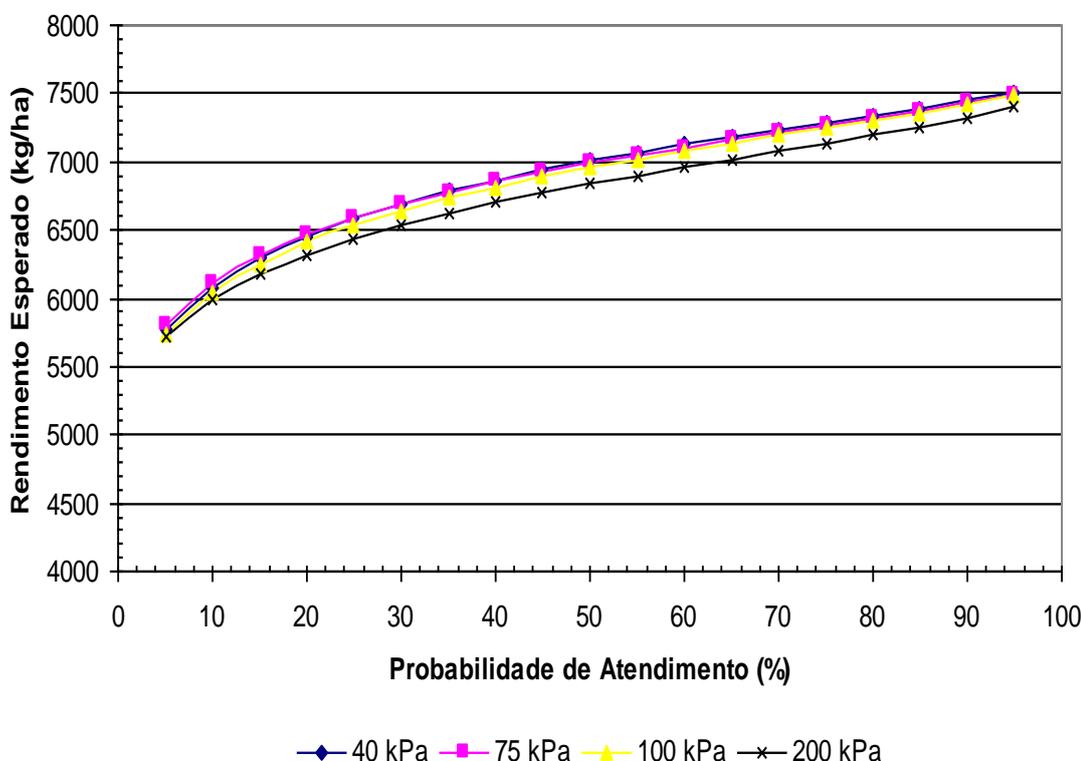
A partir dos dados apresentados anteriormente, é possível observar que o aumento no nível de probabilidade de atendimento resulta em um aumento da lâmina de irrigação suplementar aplicada (SILVA et al., 2020), e resulta em uma diferença maior nas lâminas de irrigação aplicadas para diferentes tensões de irrigação.

Em geral, a lâmina de irrigação variou de 250 a 600 mm por ciclo, do ano mais úmido para o ano mais seco, respectivamente. No entanto, devido ao clima tropical úmido da região em estudo, que possui uma boa distribuição das chuvas

ao longo do período de cultivo simulado, a utilização de irrigação suplementar não apresenta diferenças significativas na lâmina de água aplicada entre os diferentes níveis de manejo. Isso ocorre porque a distribuição das chuvas é suficiente para suprir as eventuais deficiências hídricas, mesmo no final do ciclo, quando o déficit hídrico tende a ser mais acentuado na região (CAPORUSSO; ROLIM, 2015; GURSKI et al., 2021).

Com base nas lâminas probabilísticas simuladas e na função de produção adotada, a Figura 7 foi elaborada.

Figura 7. Rendimento esperado para o milho “safrinha” em função das lâminas probabilísticas, para diferentes momentos de se aplicar a irrigação.



Fonte: Jacomazzi (2004)

Com base nos dados simulados de rendimento, é possível observar que, para o nível de probabilidade de 5%, a diferença entre a irrigação mais frequente (40 kPa) e a menos frequente (200 kPa) é de 55,5 kg ha⁻¹. Já para o nível de probabilidade de 95%, a diferença dos rendimentos médios esperados entre essas simulações é de 102 kg ha⁻¹. Esses resultados são coerentes, uma vez que não há diferença significativa na lâmina acumulada entre as simulações com diferentes frequências, que proporcionam diferentes níveis de déficit hídrico, o que leva a não haver diferença significativa nos rendimentos esperados.

Quanto aos diferentes anos de simulação, a produtividade esperada variou entre cerca de 5.750 kg ha⁻¹ a 7.500 kg ha⁻¹, dependendo das diferentes probabilidades de atendimento hídrico, evidenciando a importância da prática da irrigação na cultura do milho "safrinha" em Piracicaba,

independentemente da frequência de aplicação adotada, conforme descrito por Prado et al. (2020).

6 CONCLUSÃO

A simulação realizada para a região de Piracicaba, com plantio de milho irrigado no final do verão, não apresentou diferenças significativas entre as produtividades esperadas para a cultura de acordo com os diferentes níveis de manejo adotados. No entanto, é possível observar diferenças entre as simulações com pouca ou plena irrigação.

Em regiões onde o déficit hídrico não é acentuado, ou seja, onde a irrigação é apenas suplementar, a precisão na determinação da fração de água disponível que será utilizada como indicativo para o momento da irrigação é menos importante

do que a capacidade do sistema de irrigação em atender a demanda da cultura.

A variação das probabilidades de atendimento da evapotranspiração da cultura via irrigação, que depende da capacidade do sistema dimensionado, resultou em lâminas de irrigação que variaram de 250 a 600 mm para um ciclo de outono na região.

A opção do aplicativo em permitir a utilização de várias metodologias para o cálculo da evapotranspiração de referência torna-o adequado para diferentes realidades brasileiras, levando em conta tanto as condições climáticas quanto a disponibilidade das informações necessárias para o programa.

7 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, n. 56).
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.
- BRAGA, H. **Caracterização da seca agrônômica através de um novo modelo de balanço hídrico, na região de Laguna, litoral Sul de Santa Catarina**. 1982. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.
- ČADRO, S.; UZUNOVIĆ, M.; ŽUROVEC, J. Validation and calibration of various reference evapotranspiration alternative methods under the climate conditions of Bosnia and Herzegovina. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 5, n. 4, p. 309-324, 2017.
- CAMARGO, A. P.; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e super úmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.
- CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 1-9, 2015.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, n. 24).
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, n. 33).
- DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. de J. Estimativa do Armazenamento de água no solo para realização de balanço hídrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 17, n.1, p.9-15, 1993.
- GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M.; XAVIER, A. C.; ROSA, S. L. K. Probable precipitation and reference evapotranspiration in state of Paraná, southeast Brazil. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 367-380, 2021.
- HEINEMANN, A. B.; SOUSA, S. A. V.; FRIZZONE, J. A. Determinação da lâmina ótima de água para a cultura do milho doce na região de Sete Lagoas, MG. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 147-151, 2001.

JACOMAZZI, M. A. **Programa para estimativa do rendimento das culturas pela simulação da irrigação por balanço hídrico sequencial**. 2004. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. DOI: 10.11606/D.11.2004.tde-05012005-162947. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/1/1/11143/tde-05012005-162947/pt-br.php>. Acesso em: 19 jun. 2023.

LONGOBARDI, A.; VILLANI, P. The use of micrometeorological data to identify significant variables in evapotranspiration modeling. **Procedia Environmental Sciences**, Temerin, v. 19, p. 267-274, 2013.

LOPES, I.; GUIMARÃES, M. J. M.; MELO, J. M. M.; RAMOS, C. M. C. Balanço hídrico em função de regimes pluviométricos na região de Petrolina – PE. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 443-457, 2017.

MARTIN, J. D.; CARLESSO, R.; AIRES, N. P.; GATTO, J. C.; DUBOU, V.; FRIES, H. M.; SCHEIBLER, R. B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 192-205, 2012.

MINACAPILLI, M.; CAMMALLERI, C.; CIRAOLO, G.; RALLO, G.; PROVENZANO, G. Using scintillometry to assess reference evapotranspiration methods and their impact on the water balance of olive groves. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 170, p. 49-60, 2016.

PANDEY, P. K.; DABRAL, P. P.; PANDEY, V. Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 4, n. 1, p. 52-63, 2016.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; ROMÁN, R. M. S.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o Censo Agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, 2011.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. O parâmetro de Priestley – Taylor para estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 83-87, 1997.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R. G.; BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, Wageningen, v. 96, n. 11, p. 1517-1524, 2009.

PHOGAT, V.; SKEWES, M. A.; MCCARTHY, M. G.; COX, M.; SIMUNEK, J.; PETRIE, P. Evaluation of crop coefficients water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. **Agricultural Water Management**, Wageningen, v. 180, part. A, p. 22-34, 2017.

PRADO, G.; TINOS, A. C.; MAHL, D.; SCHIAVON, R. A. Produtividade do milho irrigado na região do arenito Caiuá no noroeste do Paraná. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 465-480, 2020.

SILVA, C. J.; FRIZZONE, J. A.; SILVA, C. A.; PONTES, N. C., SILVA, L. P. M.; BASILIO, E. E. Desenvolvimento do tomateiro industrial em resposta a diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 432-448, 2020.

YU, X.; LAMAČOVÁ, A.; DUFFY, C.; KRÁM, P.; HRUŠKA, J. Hydrological model uncertainty due to spatial evapotranspiration estimation methods. **Computer & Geosciences**, Quebec, v. 90, part. B, p. 90-101, 2016.