



## Modelagem da Pegada Hídrica na Viticultura na Serra Gaúcha\*

Modeling of the Water Footprint in the Viticulture in the Brazilian Serra Gaúcha

Paulo Roberto Martins<sup>1</sup>  
Gustavo Mendes Platt<sup>2</sup>  
Fernanda Cabral Borges<sup>3</sup>

### Resumo

Este trabalho tem como tema a pegada hídrica na agroindústria do vinho brasileiro, particularmente no estado do Rio Grande do Sul. Para tal, foi desenvolvido um código próprio em linguagem Scilab, o qual possibilitou o cálculo da evapotranspiração de uma lavoura de uvas viníferas, levando em consideração o modelo de Penman-Monteith. Esse modelo foi alimentado com dados climáticos e pluviométricos coletados nas estações climatológicas da região serrana do Rio Grande do Sul, relacionados com incidência de sol, clima, velocidade dos ventos, características do solo e características da cultura. A partir da aplicação desta modelagem, pode-se concluir que, (i) na média, em teoria, entre 1991 e 2021, o volume de chuvas na região em estudo supriu a demanda da evapotranspiração da cultura, de modo que não houve a necessidade de irrigação artificial (ao menos para compensar globalmente a evapotranspiração); (ii) o volume de água evapotranspirada por hectare por ano, na região em estudo, foi de 5.684.300 litros de água; (iii) comparando-se os resultados da pegada hídrica do vinho produzido na Serra Gaúcha, que foram de 496, 595 e 744 L por garrafa de 750 mL (para três safras distintas), com a pegada hídrica do vinho de países como África do Sul (647 L/garrafa), Portugal (515 e 763 L/garrafa, em dois casos distintos), Nova Zelândia (682 e 605 L/garrafa, para duas regiões distintas) e Itália (632 L/garrafa), verificou-se que a produção de vinho na Serra Gaúcha, entre os contextos estudados, apresenta uma tendência de valores compatível com as grandes regiões produtoras de vinho no mundo.

**Palavras-chave:** Pegada hídrica. Vitivinicultura. Modelagem matemática. Evapotranspiração.

\*Submetido em 30/01/2023 - Aceito em 04/07/2024

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Agroindustriais – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil– paulomartinsnh@gmail.com

<sup>2</sup>Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Agroindustriais – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil– gmplatt@furg.br

<sup>3</sup>Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Agroindustriais – Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil– fernanda-borges@furg.br

### Abstract

The theme of this work is the water footprint in the Brazilian wine agroindustry, particularly in the state of Rio Grande do Sul. A tailor-made code was developed in Scilab language, which allowed the calculation of evapotranspiration of a viticulture, taking into account the Penman-Monteith model. This model was fed with climatic and rainfall data collected at climatological stations in the mountainous region of Rio Grande do Sul (called Serra Gaúcha), related to the incidence of sunlight, climate, wind speed, soil characteristics, and crop characteristics. From the application of this modeling, it can be concluded that (i) on average, in theory, between 1991 and 2021, the volume of rainfall in the region under study met the demand for crop evapotranspiration, so that there was no need for artificial irrigation (at least to compensate globally for evapotranspiration); (ii) the volume of evapotranspired water per hectare per year, in the region under study, was 5,684,300 liters of water; (iii) comparing the results of the water footprint of wine produced in Serra Gaúcha, which were 496, 595 and 744 L per 750 mL bottle (for three different harvests), with the water footprint of wine from countries such as South Africa (647 L/bottle), Portugal (515 and 753 L/bottle, for two different cases), New Zealand (682 and 605 L/bottle, for two different regions) and Italy (632 L/bottle), it was found that wine production in the Serra Gaúcha, among the contexts studied, shows a tendency for values of water footprint compatible with the largest wine-producing regions in the world.

**Keywords:** Water footprint. Viticulture. Mathematical modeling. Evapotranspiration.

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho está voltado para a determinação da pegada hídrica na agroindústria do vinho brasileiro – particularmente no estado do Rio Grande do Sul –, empregando uma abordagem de modelagem matemática e computacional. Este estudo foi realizado através da captação de dados da região produtora de vinho localizada na Serra Gaúcha, tendo em vista que o Rio Grande do Sul (RS) responde por mais de 80% da produção de vinho do Brasil (FENSTERSEIFER, 2006).

O termo *pegada hídrica* foi originalmente proposto por Hoekstra e Hung (2002), traçando um paralelo entre a pegada de carbono e a pegada hídrica. Para tais autores, a introdução dos estudos sobre pegada hídrica visa estabelecer uma relação entre o consumo humano e o uso da água, bem como entre o comércio global e a gestão dos recursos hídricos. A gestão desse recurso tão importante para o planeta invariavelmente é tratada como questão local ou, quando muito, abordada sob o aspecto de determinada bacia hidrográfica. Hoekstra e Hung (2002) alertaram o mundo sobre os enormes volumes de água consumidos pela atividade humana, salientando que a maior parte desse consumo se dá na atividade agrícola, embora sejam também significativos os volumes de água utilizados na indústria e no meio doméstico. De forma objetiva, o termo pegada hídrica representa o consumo de água de diversas origens para um determinado processo.

Na indústria do vinho, o estudo da pegada hídrica é bastante recente, com destaque para a Nova Zelândia (HERATH *et al.*, 2013) e também para a Itália (BONAMENTE *et al.*, 2015). Mais recentemente, Jairman (2020) abordou a questão da pegada hídrica para o caso sul-africano. Em Portugal, Saraiva *et al.* (2020) realizaram dois estudos de caso e apuraram resultados para a pegada hídrica de 515 (caso I) e 753 (caso II) litros de água por litro de vinho produzido. No Brasil, estudos sobre a pegada hídrica na agroindústria são relativamente escassos, evidenciando a relevância do presente trabalho.

A pegada hídrica subdivide o uso de água em três porções distintas, que são: a porção verde, a porção azul e a porção cinza. A porção verde representa as águas provenientes da chuva; a porção azul refere-se às águas oriundas de rios, de lagos ou de fontes subterrâneas, destinadas à irrigação das lavouras; e, por fim, a porção cinza representa as águas utilizadas para a diluição de poluentes agregados ao processo agroindustrial, tendo como finalidade diminuir a concentração de poluentes nas águas que são devolvidas aos cursos hídricos (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

A importância do estudo sobre a pegada hídrica na agroindústria está relacionada às intensas mudanças climáticas que nosso globo vem enfrentando, as quais são responsáveis por provocar grandes períodos de seca e intenso calor, aliados ao constante aumento na demanda de alimentos. A necessidade de aumento da produtividade advém do avanço demográfico, que torna cada vez mais necessária a irrigação mecanizada, ou seja, requer um aumento exponencial da utilização da porção de água azul. O resultado dessa combinação de fatores explica porque a irrigação é atualmente a principal responsável pelo consumo de água no planeta (PRUSKI, 2018). Daí, mais uma vez, a importância do estudo da pegada hídrica, considerando-se que, a

partir dele, poderão ser criados modelos mais precisos para o uso da irrigação e para a otimização do uso da água.

Para o estudo da pegada hídrica, o conhecimento e a análise da evapotranspiração ( $ET$ ) são fundamentais, pois, através deles, é possível apurar com maior precisão a quantidade de irrigação necessária para determinada cultura, em determinado local. De modo simplificado, define-se a  $ET$  como a perda de água do solo de um ecossistema para a atmosfera por meio da evaporação e também pela transpiração das plantas. Ou seja, os valores correspondentes à  $ET$  provêm de um balanço que leva em consideração os dados climáticos e geográficos (incidência solar, por exemplo), as características da lavoura e o solo.

Para o estabelecimento da pegada hídrica na indústria do vinho da Serra Gaúcha, foram utilizadas ferramentas de modelagem matemática, objetos de estudo e de pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho, juntamente com dados pluviométricos<sup>4</sup>, dados de incidência de vento<sup>5</sup>, e dados referentes à temperatura, à umidade e ao número de horas de incidência diária de sol<sup>6</sup>. Os modelos físicos e matemáticos foram utilizados para a construção de uma ferramenta computacional em linguagem Scilab 6<sup>7</sup>.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Esta Seção apresenta o desenvolvimento, em termos de modelos físicos, para a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e para os parâmetros de correção ( $K_c$  e  $K_s$ ) para a cultura em questão.

### 2.1 Modelagem Matemática para a Evapotranspiração de Referência ( $ET_0$ )

Conforme ressaltado na Introdução, o objetivo central deste trabalho é a determinação da pegada hídrica para vinhos produzidos na Serra Gaúcha. Neste cenário, a pegada hídrica verde ( $WF_{proc,verde}$ ) está relacionada ao consumo de água “verde”, ou seja, oriunda de precipitação (chuva ou neve):

$$WF_{proc,verde} = \text{Evapotranspiração verde} + \text{Incorporação verde.} \quad (1)$$

A parcela de incorporação refere-se à quantidade de água incorporada no produto (nas uvas e no vinho em si). Medidas de evapotranspiração podem ser complicadas de serem obtidas. Por isso, usualmente é feito um balanço material para a água, levando-se em consideração dados climáticos, características da lavoura e do solo bem como informações sobre irrigação na lavoura.

---

<sup>4</sup>Disponíveis em: <<https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386/>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

<sup>5</sup>Disponíveis em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29709/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Bento-Gon%C3%A7alves-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

<sup>6</sup>Disponíveis em: <<https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386/>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

<sup>7</sup>Disponível em: <<http://www.scilab.org>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

A pegada hídrica azul refere-se ao consumo – por evaporação, despejo em outra área, despejo no mar ou incorporação no produto – de águas superficiais (rios ou lagos) ou subterrâneas:

$$WF_{proc,azul} = \text{Evapotranspiração azul} + \text{Incorporação azul} + \text{Perdas.} \quad (2)$$

As perdas referem-se à quantidade de água que é despejada em outra área, no mar ou, ainda, em outro período de tempo. Tipicamente, a pegada hídrica azul é maior em lavouras onde há irrigação.

Finalmente, a pegada hídrica cinza representa a quantidade necessária para a diluição dos poluentes de modo a atingir as concentrações normalmente encontradas nos corpos hídricos. A pegada hídrica cinza pode ser calculada pela expressão:

$$WF_{proc,cinza} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}, \quad (3)$$

onde  $C_{max}$  é a concentração máxima admissível para um certo poluente quando despejado,  $C_{nat}$  é a concentração natural para tal substância em um corpo hídrico e  $L$  é a carga de poluente (massa por unidade de tempo).

A etapa fundamental para o cálculo da pegada hídrica é a determinação da evapotranspiração. A evapotranspiração real da cultura (evaporação pelo solo + transpiração pela lavoura) pode ser calculada por:

$$ET_a = K_s K_c ET_0, \quad (4)$$

onde  $K_c$  é um coeficiente relacionado à lavoura e  $K_s$  é um coeficiente que leva em conta situações de *stress* ambiental e falta d'água. Sem *stress* no solo, então  $K_s = 1$ . Na equação anterior,  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência dada por (modelo de Penman-Monteith-FAO 56) (ALLEN *et al.*, 2005):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T+273} u_2 (e_s^0 - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)}, \quad (5)$$

onde  $e_s^0$  é a pressão de vapor saturado média (kPa) (calculada como a média de  $e^0$  nas temperaturas mínima e máxima),  $e_a$  é a pressão de vapor ambiente média (kPa),  $R_n$  é o fluxo de radiação solar líquido,  $G$  é o fluxo de calor sensível no solo ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ),  $u_2$  é a velocidade do vento medida a 2m de altura em relação ao solo ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\Delta$  é a inclinação da curva de pressão de vapor,  $\gamma$  é a constante psicrométrica (calculada somente em função da pressão atmosférica e, portanto, somente função da altitude). Nota-se que o valor de  $ET_0$  depende somente de parâmetros geográficos e climáticos, a menos dos valores de  $C_n$  e  $C_d$ , que estão relacionados a duas culturas diferentes.

A ideia básica do uso de um modelo como o de Penman-Monteith é a padronização da evapotranspiração para uma cultura de referência. De fato, a Equação 5 pode representar uma cultura “baixa” (grama, altura de 12 cm) ou uma cultura “alta” (alfafa, altura de 50 cm), com valores distintos de  $C_n$  e  $C_d$  (ALLEN *et al.*, 2005). Para uma cultura com altura de 12 cm e para cálculos considerando como unidade de tempo o dia, a Equação 5 torna-se (ALLEN *et al.*,

2005):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s^0 - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (6)$$

com  $ET_0$  representada em mm/dia.

Passemos agora à descrição dos termos da Equação 5. Na Equação 5, o valor de  $e_s^0$  é determinado por (ALLEN *et al.*, 2005):

$$e_s^0 = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}, \quad (7)$$

com o valor da pressão de saturação dado pela expressão (do tipo Antoine) (ALLEN *et al.*, 2005):

$$e^0(T) = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right), \quad (8)$$

onde a temperatura está em °C e a pressão de vapor está em kPa.  $T_{min}$  e  $T_{max}$  referem-se, respectivamente, às temperaturas mínima e máxima para os diversos meses do ano (em °C).

A inclinação da curva de pressão de vapor pode ser calculada por (ALLEN *et al.*, 2005):

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27T_{mean}}{T_{mean} + 237,3}\right)\right]}{(T_{mean} + 237,3)^2}, \quad (9)$$

onde  $T_{mean}$  é a temperatura média.

A constante psicrométrica ( $\gamma$ ) é determinada pela expressão (ALLEN *et al.*, 2005):

$$\gamma = 0,000665P, \quad (10)$$

onde  $P$  é a pressão atmosférica local (kPa). Considera-se que a pressão atmosférica é função somente da altura da localidade, dada por:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293}\right)^{5,26}, \quad (11)$$

sendo  $z$  a altura em relação ao nível do mar.

O fluxo líquido de radiação solar (ou saldo de radiação) ( $R_n$ ) pode ser determinado por:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \quad (12)$$

onde  $R_{ns}$  e  $R_{nl}$  referem-se à radiação (líquida) de curto comprimento de onda e à radiação (líquida) de longo comprimento de onda. No caso da radiação de curto comprimento de onda, faz-se um balanço entre a radiação solar global e a radiação solar refletida (pela atmosfera, pela superfície, ou difundida). Para as radiações de longo comprimento de onda, o balanço reflete a diferença entre a radiação emitida pela superfície terrestre e a radiação recebida pela atmosfera terrestre. De modo geral, a radiação de longo comprimento de onda emitida pela terra é maior do que aquela recebida e, portanto,  $R_{nl}$  representa uma perda de energia.

Para a radiação de curto comprimento de onda, emprega-se a expressão:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s, \quad (13)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de albedo e  $R_s$  é a radiação solar global incidente. Admite-se  $\alpha = 0,23$ . O coeficiente de albedo indica a fração da radiação global incidente que é refletida por uma superfície (para neve, por exemplo, tem-se um coeficiente de albedo de cerca de 0,80, enquanto para o asfalto o coeficiente é de aproximadamente 0,10).

A radiação de longo comprimento de onda é calculada por:

$$R_{nl} = \sigma f_{cd} (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( \frac{T_{K,max}^4 + T_{K,min}^4}{2} \right). \quad (14)$$

Na Equação 14,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $f_{cd}$  é a função de nebulosidade,  $T_{K,max}$  é a temperatura máxima e  $T_{K,min}$  é a temperatura mínima, expressas em Kelvin. A função de nebulosidade  $f_{cd}$  é calculada por:

$$f_{cd} = 1,35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35, \quad (15)$$

onde  $R_{s0}$  é a radiação solar na condição de céu limpo (sem nuvens). O cálculo de  $R_{s0}$  pode ser aproximado a partir dos dados de radiação extraterrestre ( $R_a$ ). Por exemplo, pode-se utilizar  $R_{s0} = (0,75 + 2 \times 10^{-5}z)R_a$ , sendo  $z$  a altura em relação ao nível do mar. Por sua vez, a radiação extraterrestre  $R_a$  (radiação de curto comprimento de onda na ausência de atmosfera, ou radiação solar no topo da atmosfera) pode ser calculada por:

$$R_a = \left( \frac{24 \times 60}{\pi} \right) G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\gamma) \sin(\delta) + \cos(\gamma) \cos(\delta) \sin(\omega_s)], \quad (16)$$

onde  $\gamma$  é a latitude (rad) e  $\delta$  é a declinação (rad). Na Equação 16,  $G_{sc}$  é a constante solar  $(0,0820 \frac{MJ}{m^2min})$ ,  $d_r$  é a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol, dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi}{365} J \right), \quad (17)$$

onde  $J = int(30,4M - 15)$  (dia Juliano). Aqui,  $J$  é considerado como dia no meio de cada mês,  $int$  é a função inteiro e  $M$  é o mês em questão. A declinação solar  $\delta$  é expressa por:

$$\delta = 0,409 \sin \left( \frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (18)$$

A radiação solar incidente é então calculada pela expressão:

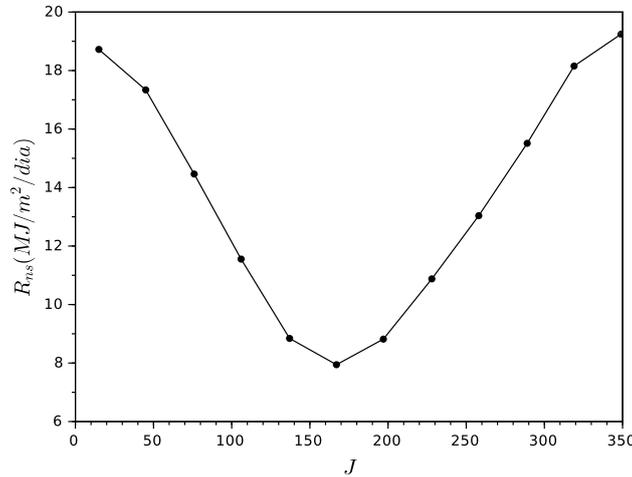
$$R_s = \left( a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a, \quad (19)$$

com  $n$  sendo o número de horas de sol por dia e  $N$  representando o número máximo de horas de sol diárias. Os valores de  $a_s$  e  $b_s$  são respectivamente, 0,25 e 0,50 (ALLEN *et al.*, 2005).

O número máximo de horas de sol por dia é determinado por  $N = \frac{24}{\pi} \omega_s$ , com o parâmetro  $\omega_s$  (ângulo da hora do pôr do sol) calculado por  $\omega_s = \arccos[-\tan(\gamma) \tan(\delta)]$ .

A radiação solar de curto comprimento de onda para uma latitude de 29°Sul é apresentada na Figura 1, onde  $J$  é o dia Juliano considerando o dia do meio de cada mês.

**Figura 1 – Fluxo de radiação solar de curto comprimento de onda  $R_{ns}$  ( $\frac{MJ}{m^2 \text{ dia}}$ )**



Fonte: Dados da pesquisa.

A pressão de vapor real ( $e_a$ ) pode ser obtida a partir de dados de umidade relativa ( $UR$ ) (ALLEN *et al.*, 2005), conforme a expressão:

$$e_a = \frac{UR_{mean}}{100} \left( \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \right). \quad (20)$$

Com finalidades ilustrativas, a Figura 2 apresenta um perfil de pressões de vapor saturado média ( $e_s^0$ ) e real ( $e_a$ ) (em kPa) ao longo do ano para a região de Bento Gonçalves (objeto de estudo dessa pesquisa). Os dados de umidade relativa e temperaturas máxima/mínima serão apresentados e discutidos na seção de resultados. Note-se que a diferença  $e_s^0 - e_a$  aparece no numerador da Equação 6, o que ilustra uma das vantagens da ferramenta desenvolvida em relação ao CROPWAT – a capacidade de identificar cálculos intermediários na avaliação da evapotranspiração de referência.

Com dados de  $e_a$  pode-se obter o perfil para o fluxo de radiação solar de longo comprimento de onda, conforme a Figura 3. O fluxo líquido de radiação solar ( $R_n$ ) em função do dia Juliano  $J$  para uma latitude de 29°Sul é apresentado na Figura 4.

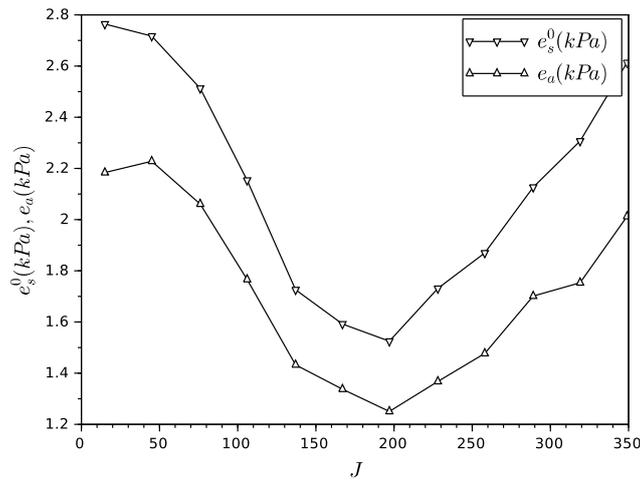
Finalmente, o último termo a ser analisado na Equação 5 é o fluxo de calor do solo ( $G$ ), que pode ser aproximado por (ALLEN *et al.*, 2005):

$$G = 0,07 (T_{mensal,i+1} - T_{mensal,i-1}), \quad (21)$$

onde  $T_{mensal,i}$  refere-se à temperatura média para um determinado mês  $i$ .

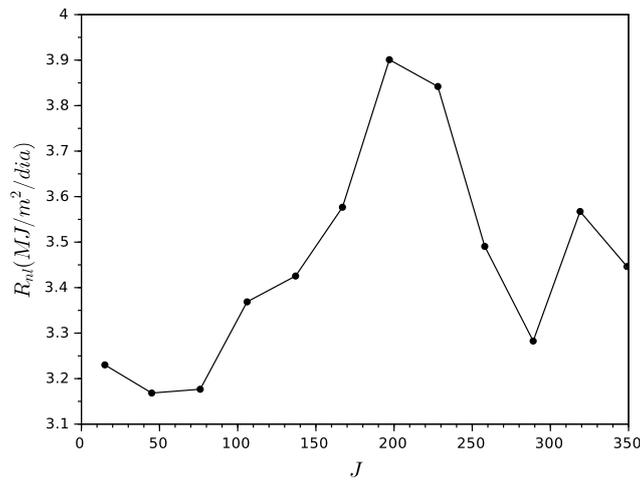
De fato, nota-se então que para a determinação de  $G$  há a necessidade de ser informada a temperatura média mensal. De modo a reduzir o número de parâmetros de entrada a um mínimo

**Figura 2 – Pressão de vapor real  $e_a$  (kPa) e pressão de vapor saturado média  $e_s^0$  (kPa)**



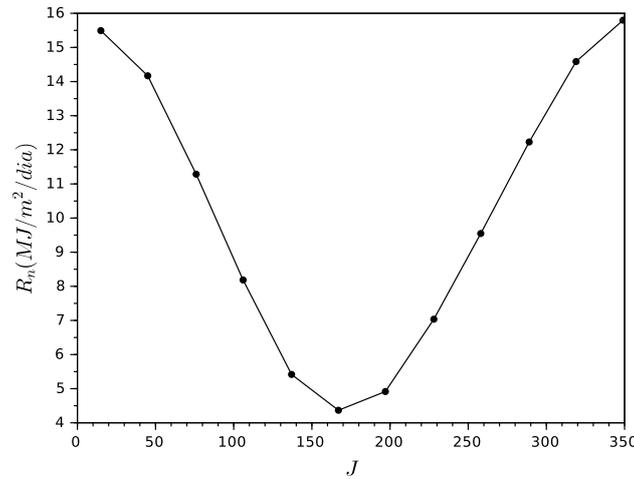
Fonte: Dados da pesquisa.

**Figura 3 – Fluxo de radiação solar de longo comprimento de onda  $R_{nl}$  ( $\frac{MJ}{m^2 \text{ dia}}$ )**



Fonte: Dados da pesquisa.

possível, fez-se uma comparação entre o fluxo de calor obtido com a temperatura média para um determinado mês ( $G$ ) e aquele calculado a partir de uma média aritmética simples entre a temperatura máxima e a mínima para o mesmo mês ( $G_{aprox}$ ). A Figura 5 apresenta os valores para  $G$  e  $G_{aprox}$ . Nota-se uma excelente concordância entre valores e, ademais, a magnitude de tais valores é pequena se comparada aos valores de  $R_n$  na Equação 6 e apresentados na Figura 4. De fato, em muitos casos é razoável admitir  $G \approx 0$ . Portanto, os valores de  $G$  serão calculados da forma aproximada, isto é,  $G = G_{aprox}$ .

**Figura 4 – Fluxo líquido de radiação solar  $R_n$  ( $\frac{MJ}{m^2\text{dia}}$ )**

Fonte: Dados da pesquisa.

## 2.2 Determinação dos valores de $K_s$ e $K_c$

Com o valor de  $ET_0$  determinado, pode-se calcular a evapotranspiração real da cultura a partir dos fatores de correção  $K_s$  e  $K_c$ , conforme descrito na Equação 4.

Define-se a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) (ALLEN *et al.*, 2005) por:

$$ET_c = K_c ET_0, \quad (22)$$

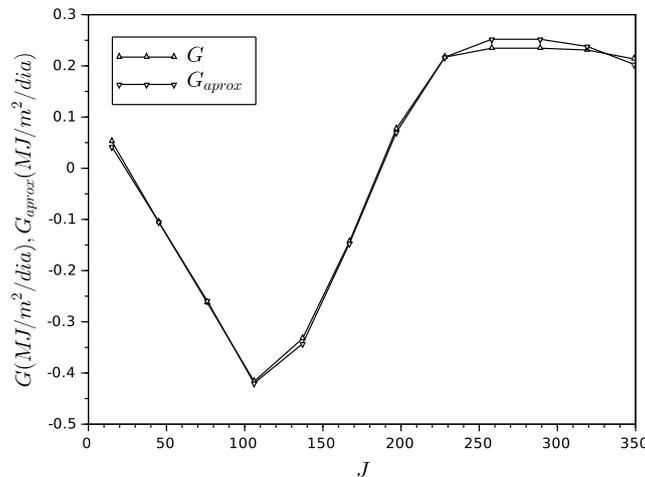
onde  $K_c$  é um coeficiente característico da cultura. De acordo com Allen *et al.* (2005), são necessários 3 valores de  $K_c$  distintos para caracterizar uma cultura –  $K_{c,ini}$ ,  $K_{c,mid}$  e  $K_{c,end}$  – referindo-se, respectivamente, ao estágio inicial, intermediário e final da lavoura. Para uvas viníferas, os valores recomendados são  $K_{c,ini} = 0,30$ ,  $K_{c,mid} = 0,70$  e  $K_{c,end} = 0,45$ .

Finalmente, pode-se expressar a relação entre  $ET_a$  e  $ET_c$  através de uma expressão do tipo (ALLEN *et al.*, 2005; SAED *et al.*, 2019):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right), \quad (23)$$

onde  $Y_a$  e  $Y_m$  referem-se, respectivamente, às produtividades real e máxima da lavoura. Nesse caso, considera-se que a redução na produtividade é consequência somente da redução na evapotranspiração (*stress* hídrico). O valor de  $K_y$  representa um fator de resposta característico de cada lavoura. Para o caso de uvas,  $K_y = 0,85$  (ALLEN *et al.*, 2005). No presente trabalho, não será considerado *stress* hídrico da lavoura, de modo que será assumido que  $K_s = 1$ , ou de outro modo,  $ET_a = ET_c$ .

**Figura 5 – Comparação entre o fluxo de calor  $G$  ( $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{dia}}$ ) e o valor aproximado  $G_{\text{aprox}}$  ( $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{dia}}$ )**



Fonte: Dados da pesquisa.

### 2.3 Determinação das pegadas hídricas verde e azul

A partir dos valores calculados da evapotranspiração de referência e da evapotranspiração da cultura, é possível então determinar a porção da pegada hídrica correspondente à evapotranspiração. Para tanto, os valores mensais da evapotranspiração da cultura devem ser somados ao longo de um ano, obtendo-se o valor da evapotranspiração anual (em L/ha). Caso a demanda de água da lavoura seja integralmente atendida, as pegadas hídricas verde e azul podem ser calculadas, respectivamente, por (HOEKSTRA *et al.*, 2011):

$$WF_{proc,verde} = \frac{ET_{c,verde}}{Y}, \quad (24)$$

e

$$WF_{proc,azul} = \frac{ET_{c,azul}}{Y}, \quad (25)$$

onde  $Y$  refere-se à produtividade da lavoura por hectare (em ton/ha). Nesse caso, serão obtidas as pegadas hídricas em litros por tonelada. Cálculos adicionais permitem a determinação da pegada hídrica por cada garrafa de vinho (750 mL).

### 2.4 Desenvolvimento da ferramenta computacional

A determinação da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith, conforme descrita nas subseções anteriores, pode ser feita com o auxílio de um *software* específico, como o CROPWAT 8.0<sup>8</sup>, desenvolvido pela FAO. Por outro lado, o CROPWAT (até onde se sabe) está descontinuado (embora ainda disponível para *download*), sem atualizações. Além

<sup>8</sup>Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

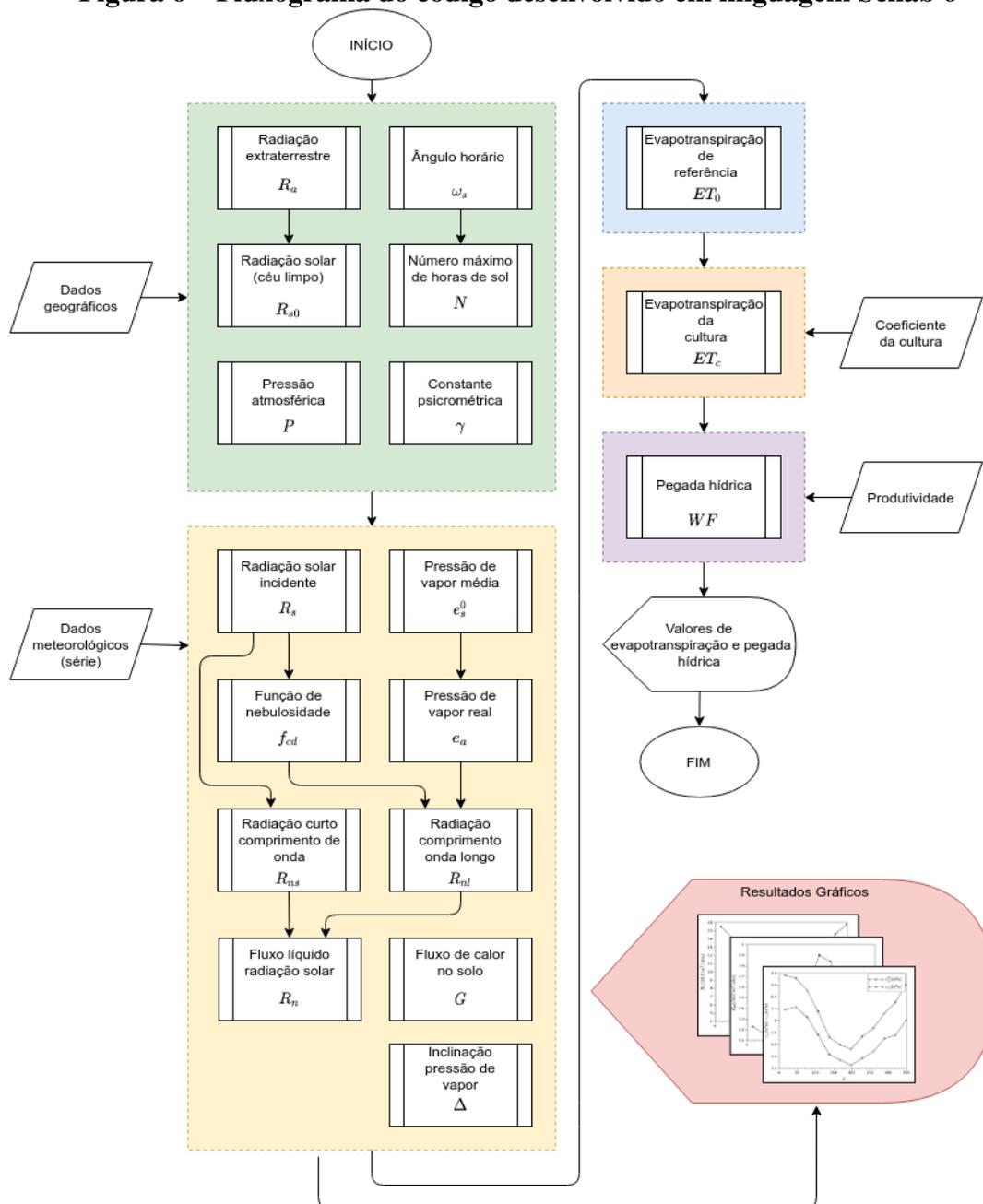
disso, o preenchimento das informações no CROPWAT – na forma de planilhas – dificulta o estudo de diferentes cenários. Assim, o modelo de Penman-Monteith foi implementado em linguagem Scilab 6, de modo a permitir flexibilidade e automatização na geração dos resultados. O desenvolvimento de tal ferramenta é um dos objetivos específicos deste trabalho, tendo em conta a maior flexibilidade de uso comparativamente ao CROPWAT. Além disso, o desenvolvimento da ferramenta em Scilab permite que se observem os efeitos de parâmetros específicos nas respostas do modelo, o que é útil do ponto de vista de análise de sensibilidade, tendo em conta as não-linearidades do modelo de Penman-Monteith (PLATT *et al.*, 2024). Ademais, deve-se ter em conta que o código do CROPWAT 8.0 não é aberto, até onde é do conhecimento dos autores.

A Figura 6 apresenta o fluxograma para o código desenvolvido em linguagem Scilab 6. Os dados de entrada correspondem aos dados geográficos do local (latitude, longitude e altitude), os dados meteorológicos (temperaturas, umidades relativas, velocidades do vento e número de horas de sol por dia), os valores de coeficiente de cultura (em função da época do ano) e a produtividade por hectare. Tais informações são inseridas na forma vetorial no código em Scilab. Os dados geográficos são utilizados para a avaliação de diversas funções do código, representadas no retângulo em verde (radiação extraterrestre, radiação solar na condição de céu limpo, pressão atmosférica, ângulo horário, número máximo de horas de sol por dia e constante psicrométrica). Os valores numéricos calculados por tais funções são então fornecidos como argumentos de entrada de outro conjunto de funções (retângulo em amarelo), que também dependem dos dados meteorológicos. Ao final da execução de tais funções, todos os valores numéricos necessários para o cálculo da evapotranspiração de referência estão disponíveis. Com a evapotranspiração de referência calculada, uma outra função recebe a informação (um vetor) com os coeficientes de cultura, de modo a obter a evapotranspiração da cultura. Finalmente, uma última função calcula a pegada hídrica, a partir da evapotranspiração da cultura e da informação de produtividade por hectare. As informações pertinentes são então apresentadas como saídas, além de existir a possibilidade de produzir resultados em forma gráfica (para os diversos meses do ano).

A validação do código foi efetuada por Martins (2023) comparando-se os valores das grandezas empregadas no cálculo da evapotranspiração de referência para a cidade de Bangkok (Tailândia) com o código desenvolvido e com os valores reportados por Allen *et al.* (2005). Os resultados foram absolutamente aderentes, com desvios na segunda casa decimal para  $R_a$ ,  $R_{ns}$ ,  $R_{nl}$ ,  $R_n$  e  $ET_0$ . Como limitações do código, deve-se destacar que a metodologia engloba somente a porção referente à evapotranspiração da pegada hídrica, além das premissas existentes no modelo de Penman-Monteith<sup>9</sup>.

<sup>9</sup>O código está disponível, mediante solicitação, no link <[https://www.researchgate.net/publication/381547663\\_evapotranspiracao\\_final](https://www.researchgate.net/publication/381547663_evapotranspiracao_final)>.

Figura 6 – Fluxograma do código desenvolvido em linguagem Scilab 6



Fonte: Dados da pesquisa.

### 3 RESULTADOS

A ferramenta computacional desenvolvida foi aplicada na região de Bento Gonçalves, na Serra Gaúcha. Por questões de disponibilidade de dados, deve-se ter em conta que (i) não serão apresentados cálculos para a pegada hídrica cinza e (ii) a análise está limitada à lavoura, de modo que não serão consideradas as pegadas hídricas da “adega” (ou seja, das etapas industriais de produção de vinho).

A Tabela 1 apresenta as informações da normal climática registrada no período de 1991 a 2021, obtidas em <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386/>> (acesso em: 04 jul. 2024). Apenas os dados de vento foram obtidos de <https://pt.weatherspark.com/y/29709/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Bento-Gon%

C3%A7alves-Brasil-durante-o-ano> (acesso em: 04 jul. 2024). Na Tabela 1,  $UR$  representa a umidade relativa e  $u$  é a velocidade do vento. As informações apresentadas na Tabela 1 correspondem aos dados fundamentais para a determinação da evapotranspiração de referência  $ET_0$ . Tais valores são os mesmos que devem ser inseridos como informação mínima no CROPWAT, por exemplo.

**Tabela 1 – Dados para cálculo de  $ET_0$  em Bento Gonçalves (altitude de 649 m e latitude 29 °S)**

	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	UR (%)	$u$ ( $\frac{\text{km}}{\text{dia}}$ )	Horas de sol ( $\frac{\text{h}}{\text{dia}}$ )
Janeiro	17,7	26,7	79	124,8	8,6
Fevereiro	17,6	26,3	82	120,0	8,2
Março	16,5	24,9	82	120,0	7,3
Abril	14,0	22,4	82	127,2	6,7
Mai	10,8	18,7	83	129,6	5,9
Junho	9,3	17,6	84	139,2	5,9
Julho	8,2	17,2	82	144,0	6,5
Agosto	9,6	19,5	79	146,4	6,9
Setembro	11,0	20,6	79	146,4	6,8
Outubro	13,3	22,5	80	141,6	7,2
Novembro	14,3	24,0	76	136,8	8,4
Dezembro	16,4	26,0	77	129,6	8,9

Fonte: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386/> (temperaturas, umidade relativa e horas de sol por dia) e <https://pt.weatherspark.com/y/29709/Clima-caracter%20C3%ADstico-em-Bento-Gon%20C3%A7alves-Brasil-durante-o-ano> (dados de vento).

Na Tabela 2, na primeira coluna, identificam-se os valores para a evapotranspiração de referência para a cidade de Bento Gonçalves, região da Serra Gaúcha. O cálculo desses valores foi baseado nas informações obtidas na Tabela 1. Esses valores informam a quantidade água evaporada do solo somada à água consumida através da transpiração da planta, em milímetros por dia.

Segundo Allen *et al.* (2005), ao longo do ano, as culturas sofrem variações em seu desenvolvimento. No caso do cultivo da uva, na Serra Gaúcha, caracterizada por apenas uma safra anual, as variações no desenvolvimento da cultura vão desde a dormência, passando pela poda, brotação, floração, maturação e, finalmente, a colheita (MANDELLI *et al.*, 2003). Devido às variações observadas no desenvolvimento da cultura ao longo do ano/safra, Allen *et al.* (2005) alerta sobre a necessidade de aplicar no cálculo da evapotranspiração um coeficiente  $K_c$  para as distintas fases do desenvolvimento da planta. Esses coeficientes variam entre  $K_c = 0,30$ , para a fase inicial do ciclo anual de desenvolvimento da cultura, compreendida pelas fases de dormência e poda,  $K_c = 0,70$ , para a fase intermediária do desenvolvimento anual da cultura, compreendida pelas fases de brotação e floração e, por fim,  $K_c = 0,45$ , para a fase anual final da cultura, compreendida pelas fases de maturação e colheita. Esses diferentes coeficientes estão relacionados com a quantidade maior ou menor de água consumida pela evaporação do solo e pela transpiração da planta, de acordo com as fases de desenvolvimento e crescimento da cultura, e estão também relacionados com a maior ou menor penetração dos raios de sol no

solo, devido ao maior ou menor sombreamento causado pelo folhamento da planta de acordo com o seu estágio de crescimento.

Mandelli *et al.* (2003) estabelecem para a serra Gaúcha os períodos de abril a julho como períodos de dormência e poda das videiras, período este a que, para a construção da Tabela 2, foi atribuído o coeficiente  $K_c$  inicial 0,30. Nesse mesmo artigo, Mandelli *et al.* (2003) definem o período de agosto a novembro como período de brotação e floração, período para o qual, para a construção da Tabela 2, foi atribuído o coeficiente  $K_c$  médio 0,70 e, por fim, os mesmos autores definem o período de dezembro a março como período de maturação e colheita, período para o qual, para a construção da Tabela 2, foi atribuído o coeficiente  $K_c$  final 0,45. As cores na segunda coluna da Tabela 2 referem-se às diferentes etapas da cultura ao longo do ano, enquanto as cores na terceira coluna representam os diferentes valores de  $K_c$  empregados no cálculo de  $ET_c$ . A quarta coluna é obtida multiplicando-se os valores da primeira coluna pelo número de dias do mês (terceira coluna).

Portanto, na Tabela 2, é possível visualizar, na última coluna, os valores mensais da evapotranspiração, corrigidos através dos coeficientes  $K_c$  inicial, médio e final, tendo como base os valores de  $ET_0$ , calculados a partir dos dados da normal climatológica da região da Serra Gaúcha, Tabela 1. A soma de tais valores para todos os meses do ano (em L/ha) é então utilizada na determinação da pegada hídrica.

**Tabela 2 – Evapotranspiração ajustada pelos coeficientes  $K_c$ , em milímetros por mês**

$ET_0$ (mm/dia)	Mês/fase da cultura	dias/mês e $K_c$	$ET_c$ (mm/mês)	$ET_c$ (L//ha/mês)
2,54	abril	30	22,86	228.600
1,68	maio	31	15,62	156.200
1,35	junho	30	12,15	121.500
1,44	julho	31	13,39	133.900
2,04	agosto	31	44,27	442.700
2,65	setembro	30	55,65	556.500
3,39	outubro	31	73,56	735.600
4,18	novembro	30	87,78	877.800
4,64	dezembro	31	64,73	647.300
4,63	janeiro	31	64,59	645.900
4,22	fevereiro	28	53,17	531.700
3,42	março	31	47,71	477.100

dormência	poda	brotação	floração	maturação	colheita
inicial=0,30		médio=0,70		final=0,45	

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 3, foram compiladas as informações referentes aos dados da normal pluviométrica do período entre 1991 e 2021, apurados na região em estudo, segundo informações oficiais obtidas através do portal <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386/> (acesso em: 04 jul. 2024). Os dados pluviométricos disponibilizados pelo portal supracitado informam a quantidade de milímetros de chuva mensal por metro

quadrado. Na Tabela 3, esses valores foram multiplicados por 10.000, para obter o volume corresponde em litros por hectare por mês, a fim de, mais adiante, relacionar esses valores com a produtividade de uvas em toneladas por hectare e, conseqüentemente, com a quantidade de garrafas de vinho produzida por tonelada de uvas.

**Tabela 3 – Normal pluviométrica em mm/mês e L/ha/mês na Serra Gaúcha no período de 1991 a 2021**

Mês	mm chuva/mês	L/ha/mês
Janeiro	217	2.170.000
Fevereiro	193	1.930.000
Março	164	1.640.000
Abril	154	1.540.000
Mai	145	1.450.000
Junho	147	1.470.000
Julho	175	1.750.000
Agosto	141	1.410.000
Setembro	179	1.790.000
Outubro	223	2.230.000
Novembro	173	1.730.000
Dezembro	193	1.930.000
TOTAL ANUAL		21.040.000

Fonte: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/bento-goncalves-1386>>. Acesso em: 04 jul. 2024.

Percebe-se que a demanda por água para evapotranspiração da lavoura foi totalmente suprida pelo volume de chuvas verificado na região, não tendo havido, assim, necessidade de irrigação. A partir disso, pode-se afirmar que, especificamente, na lavoura, a pegada hídrica foi 100% verde, uma vez que a pegada hídrica azul é caracterizada, predominantemente, pela irrigação, processo desnecessário nesse caso, tendo em vista a grande precipitação verificada na região no período em questão.

Sobre a produtividade de uvas por hectare na região de Bento Gonçalves–RS, foram encontradas também informações na literatura, que trazem valores de produtividade que variam entre 8.000, 10.000 e 12.000 kg/ha (LAZZAROTTO; PROTAS, 2020). Portanto, serão analisados três casos distintos (representados por Casos A, B e C) para a determinação da pegada hídrica, correspondendo às três produtividades por hectare para a região sob estudo.

### 3.1 Caso A: Produtividade mínima (8.000 kg/ha)

Com a informação de produtividade mínima descrita por Lazzarotto e Protas (2020), o número de garrafas de vinho (750 mL) que podem ser produzidas por hectare será:

$$\frac{8.000 \text{ kg de uva}}{\text{ha}} \times \frac{0,7 \text{ L de vinho}}{\text{kg de uva}} \times \frac{1 \text{ garrafa de vinho}}{0,75 \text{ L de vinho}} = 7.467 \frac{\text{garrafas de vinho}}{\text{ha}} \quad (26)$$

Portanto, empregando-se a Equação 24, a pegada hídrica verde no Caso 1 será:

$$WF_{proc,verde} = \frac{5.554.800 \text{ L/ha}}{7.467 \text{ garrafas/ha}} = 743,9 \frac{\text{L de água}}{\text{garrafa de vinho}} \quad (27)$$

### 3.2 Caso B: Produtividade média (10.000 kg/ha)

Para o caso de uma produtividade média (10.000 kg/ha) (LAZZAROTTO; PROTAS, 2020), o número de garrafas de vinho por hectare será:

$$\frac{10.000 \text{ kg de uva}}{\text{ha}} \times \frac{0,7 \text{ L de vinho}}{\text{kg de uva}} \times \frac{1 \text{ garrafa de vinho}}{0,75 \text{ L de vinho}} = 9.333 \frac{\text{garrafas de vinho}}{\text{ha}} \quad (28)$$

Deste modo, a pegada hídrica verde será:

$$WF_{proc,verde} = \frac{5.554.800 \text{ L/ha}}{9.333 \text{ garrafas/ha}} = 595,2 \frac{\text{L de água}}{\text{garrafa de vinho}} \quad (29)$$

### 3.3 Caso C: Produtividade máxima (12.000 kg/ha)

Finalmente, para o caso da produtividade máxima (12.000 kg/ha) (LAZZAROTTO; PROTAS, 2020), tem-se o seguinte número de garrafas por hectare:

$$\frac{12.000 \text{ kg de uva}}{\text{ha}} \times \frac{0,7 \text{ L de vinho}}{\text{kg de uva}} \times \frac{1 \text{ garrafa de vinho}}{0,75 \text{ L de vinho}} = 11.200 \frac{\text{garrafas de vinho}}{\text{ha}} \quad (30)$$

Para a produtividade máxima, tem-se a seguinte pegada hídrica verde:

$$WF_{proc,verde} = \frac{5.554.800 \text{ L/ha}}{11.200 \text{ garrafas/ha}} = 496,0 \frac{\text{L de água}}{\text{garrafa de vinho}} \quad (31)$$

### 3.4 Comparação com pegadas hídricas de outras localidades

A Tabela 4 apresenta um comparativo entre as pegadas hídricas para a produção de vinho em diferentes países/localidades, bem como os resultados obtidos pela presente pesquisa. Neste estudo da pegada hídrica do vinho na Serra Gaúcha, apresentamos três valores que correspondem à produtividade mínima, média e máxima de uvas por hectare, o que resultou em valores para a pegada hídrica do vinho da Serra Gaúcha de 743,9, 595,2 e 496,0 litros de água por garrafa de vinho, respectivamente (conforme os casos A, B e C descritos anteriormente). Verifica-se que a pegada hídrica para a Serra Gaúcha apresenta o menor valor se considerada a maior produtividade (Caso C). Para o caso de produtividade média, a pegada hídrica na Serra Gaúcha ainda está em valores abaixo dos maiores produtores de vinho do mundo.

Alguns pontos devem ser considerados na análise da Tabela 4. Inicialmente, não há uma uniformidade de metodologias entre os diversos trabalhos. Por exemplo, Saraiva *et al.* (2020)

apresentam uma separação entre a chamada “pegada hídrica da vinha” e a “pegada hídrica da adega”. Tal separação é, de certa forma, a diferença entre a pegada hídrica de uma cultura e a pegada hídrica de um produto, conforme discutido por Hoekstra *et al.* (2011). Mais ainda, Saraiva *et al.* (2020) apresentam dois estudos de caso (Caso I e Caso II) na região do Alentejo, mas sem precisar detalhes dos casos, o que impede uma comparação direta entre os valores. Ademais, o trabalho de Saraiva *et al.* (2020) considera a pegada hídrica cinza, não avaliada no presente trabalho. Em relação ao trabalho de Herath *et al.* (2013), os valores apresentados referem-se à pegada hídrica da fase de viticultura (ou “pegada hídrica da vinha”). Por outro lado, o trabalho de Bonamente *et al.* (2015) inclui a fase de cultura e a fase de produção do vinho. Portanto, embora a Tabela 4 possa indicar tendências para as pegadas hídricas em diversos países/regiões, há, naturalmente, aspectos de metodologia de cálculo que podem influenciar os valores numéricos finais obtidos.

**Tabela 4 – Resultados publicados da Pegada Hídrica para diversos países/regiões**

<b>País/Região</b>	<b>Pegada Hídrica</b>	<b>Referência</b>
Africa do Sul	647,0 L/garrafa	Jairman (2020)
Itália	632,2 L/garrafa	Bonamente <i>et al.</i> (2015)
Portugal (Alentejo/Caso I)	514,5 L/garrafa	Saraiva <i>et al.</i> (2020)
Portugal (Alentejo/Caso II)	762,7 L/garrafa	Saraiva <i>et al.</i> (2020)
Nova Zelândia (Marlborough)	681,6 L/garrafa	Herath <i>et al.</i> (2013)
Nova Zelândia (Gisborne)	604,7 L/garrafa	Herath <i>et al.</i> (2013)
Brasil (Bento Gonçalves/Serra Gaúcha)	496,0 L/garrafa	Este trabalho
Brasil (Bento Gonçalves/Serra Gaúcha)	595,2 L/garrafa	Este trabalho
Brasil (Bento Gonçalves/Serra Gaúcha)	743,9 L/garrafa	Este trabalho

**Fonte:** Dados da pesquisa, Jairman (2020), Bonamente *et al.* (2015), Saraiva *et al.* (2020), Herath *et al.* (2013).

#### 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como tema a determinação da pegada hídrica na indústria do vinho brasileiro – particularmente no estado do Rio Grande do Sul – empregando uma abordagem de modelagem matemática e computacional. Para tanto, estabeleceu-se como objetivo geral identificar a pegada hídrica na indústria do vinho gaúcha, com os seguintes objetivos específicos: (i) coletar dados geográficos, pluviométricos, climáticos e de irrigação da vitivinicultura na Serra Gaúcha; (ii) construir um arcabouço computacional capaz de avaliar a evapotranspiração – de forma automatizada – para diferentes cenários; (iii) determinar o parâmetro de evapotranspiração para a vitivinicultura na Serra Gaúcha, através de modelos matemáticos; (iv) empregar os cálculos de evapotranspiração, entre outros, para calcular as pegadas hídricas na vitivinicultura da Serra Gaúcha; (v) aplicar a modelagem desenvolvida a diferentes cenários, de modo a determinar os consumos de água verde e azul nas situações em estudo; (vi) estabelecer comparações entre as pegadas hídricas dos vinhos da Serra Gaúcha e as de outros países produtores que já tenham tais parâmetros estabelecidos.

Desenvolvida a pesquisa conforme previsto nos procedimentos metodológicos do trabalho, pode-se concluir que, (i) na média do período entre 1991 e 2021, a partir das condições climáticas (temperatura, umidade, velocidade do tempo e horas de sol) foi possível definir os valores de evapotranspiração na região em estudo; já com base nos dados pluviométricos coletados, foi possível verificar que o volume de chuvas na região em estudo supriu a demanda da evapotranspiração da cultura, de modo que não houve a necessidade de irrigação artificial; (ii) o código próprio em linguagem Scilab possibilitou o cálculo da evapotranspiração de forma automatizada, levando em consideração o modelo de Penman-Monteith; (iii) o volume de água evapotranspirada por hectare por ano, na região em estudo, foi de 5.554.800 litros de água; (iv) aplicando-se o modelo desenvolvido a três situações de produtividade diferentes, quais sejam, 8, 10 e 12 toneladas de uva por hectare, encontraram-se as pegadas hídricas de 743,9, 595,2 e 496,0 litros de água por garrafa, respectivamente; (v) comparando-se os resultados da pegada hídrica do vinho produzido na Serra Gaúcha com a pegada hídrica do vinho de países como África do Sul (647,0 L/garrafa), Portugal (514,5 e 762,7 L/garrafa), Nova Zelândia (681,6 L/garrafa e 604,7 L/garrafa) e Itália (632,2 L/garrafa) verifica-se que a pegada hídrica para a região de Bento Gonçalves está em um excelente nível quando se considera a produtividade máxima por hectare.

Como limitações da pesquisa, tem-se o fato de que esse se trata de um tema de estudo recente, com poucas publicações científicas disponíveis. Ademais, valores de  $K_c$  (por exemplo) devem ser determinados especificamente para a região em questão, considerando a existência ou não de cobertura do solo, por exemplo. Foram admitidos valores típicos de  $K_c$  extensamente empregados na literatura, mas, para a determinação acurada da pegada hídrica, tais estudos devem ser aprofundados.

Como pesquisas futuras, indica-se a investigação da pegada hídrica do vinho em outras regiões do país, tendo em vista as particulares climáticas de cada região, incluindo pesquisas de campo. Sugere-se também a expansão do tema desta pesquisa para outras culturas.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. *et al.* **The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation**. [S.l.: s.n.], 2005.
- BONAMENTE, E. *et al.* The water footprint of the wine industry: Implementation of an assessment methodology and application to a case study. **Sustainability**, v. 7, n. 9, p. 12190–12208, 2015. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/7/9/12190>>.
- FENSTERSEIFER, J. E. The emerging brazilian wine industry: Challenges and prospects for the serra gaúcha wine cluster. In: **3rd International Wine Business Research Conference**. Montpellier - França: [s.n.], 2006.
- HERATH, I. *et al.* Water footprinting of agricultural products: a hydrological assessment for the water footprint of New Zealand's wines. **Journal of Cleaner Production**, n. 41, p. 232–243, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652612005562>>.
- HOEKSTRA, A.; HUNG, P. **Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water. Research Report Series No.11**. [s.n.], 2002. Disponível em: <<https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report11.pdf>>.
- HOEKSTRA, A. Y. *et al.* **The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard**. Londres, Reino Unido: Earthscan, 2011.
- JAIRMAN, C. Water footprint as an indicator of sustainable table and wine grape production. **Relatório Técnico**, 2020.
- LAZZAROTTO, J. J.; PROTAS, J. F. S. Custos e demanda de capital para a produção, em espaladeira, de uvas viníferas para processamento em Bento Gonçalves (RS). **Observatórios Agropensa**, p. 1–10, 2020. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215390/1/FOLHETO-CIMUV-CUSTOS-2020-Publica-597-versao-2020-08-12.pdf>>.
- MANDELLI, F. *et al.* Fenologia da videira na serra gaúcha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1-2, p. 129–144, 2003. Disponível em: <<http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/512>>.
- MARTINS, P. R. **Modelagem da pegada hídrica na viticultura para produção de vinho na serra gaúcha**. 2023. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Processos Agroindustriais) — Universidade Federal do Rio Grande, Santo Antônio da Patrulha, Brasil, 2023. Disponível em: <<https://argo.furg.br/?BDTD13706>>.
- PLATT, G. M. *et al.* The modelling of the evapotranspiration portion of the water footprint: A global sensitivity analysis in the Brazilian Serra Gaúcha. **Earth**, v. 5, n. 2, p. 133–148, 2024. ISSN 2673-4834. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4834/5/2/7>>.
- PRUSKI, F. F. Sustentabilidade hídrica no oeste da bahia. **AIBA Rural: A Revista do Agro-negócio da Bahia**, v. IV, n. 09, p. 10–11, 2018.
- SAED, B. *et al.* A water footprint based hydro-economic model for minimizing the blue water to green water ratio in the Zarrinehrud river-basin in Iran. **AgriEngineering**, v. 1, p. 58–74, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2624-7402/1/1/5>>.
- SARAIVA, A. *et al.* A pegada hídrica na fileira vitivinícola portuguesa. **Agrotec**, n. 35, p. 68–70, 2020.