

MODELAGEM EMPÍRICA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM MUDAS DE MARACUJÁ-AMARELO IRRIGADAS COM ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA

Morramed da Silva Souto¹, Romário de Sousa Almeida^{1,2}, Alessandro Torres Campos², Tadayuki Yanagi Junior², Allan Alves Fernandes³, Felipe Schwerz²

¹Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, Campina Grande, Brasil
(morramed.souto@aluno.uepb.edu.br)

²Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, Brasil

³Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Ituiutaba, Brasil

Resumo: O uso de água residuária tratada tem se destacado como alternativa sustentável na agricultura, especialmente em condições de escassez hídrica. Este estudo teve como objetivo avaliar e modelar a eficiência do uso da água em mudas de maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims) submetidas a diferentes concentrações de água residuária tratada. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com cinco níveis de concentração de água residuária tratada para irrigação das mudas de maracujá: 0, 25, 50, 75 e 100%. A eficiência do uso da água foi determinada pela razão entre a massa seca total e o volume de água evapotranspirada. Foram ajustados modelos de regressão polinomial, sendo o modelo cúbico selecionado com base na significância dos coeficientes, no critério de informação de Akaike (AIC) e no desempenho preditivo. A validação dos modelos foi realizada por meio da técnica *leave-one-out cross-validation* (LOOCV). O modelo apresentou desempenho satisfatório ($R^2 = 0,692$; NSE = 0,692), com erros relativamente baixos (RMSE = 0,4118 g L⁻¹; MAPE = 26,85%) e boa capacidade de generalização (R^2 LOOCV = 0,5876). A análise de variância indicou significância dos termos quadrático e cúbico ($p < 0,001$), evidenciando comportamento não linear da variável resposta. O ponto ótimo de eficiência do uso da água foi estimado em 2,43 g L⁻¹, correspondente a uma concentração de 68,32% de água residuária tratada. Os resultados demonstram que níveis intermediários de aplicação de efluentes podem maximizar a eficiência hídrica, possivelmente em função do equilíbrio entre aporte de nutrientes e efeitos adversos em concentrações elevadas. Portanto, o uso de água residuária tratada constitui uma estratégia promissora para a produção de mudas de maracujazeiro-amarelo, contribuindo para o uso mais eficiente e sustentável dos recursos hídricos, além de destacar a importância do uso de modelos não lineares na definição de níveis ótimos de manejo.

Palavras-chave: sustentabilidade; efluente doméstico tratado; análise de regressão; *Passiflora edulis*; manejo de irrigação.

INTRODUÇÃO

Atualmente, a agricultura é responsável por 69% das retiradas de água em âmbito mundial, sendo essa utilizada principalmente para irrigação (UNESCO, 2021), o que tem gerado preocupações para a sociedade, sobretudo quanto ao uso racional da água na atividade agrícola (LIMA JUNIOR *et al.*, 2016).

Nesse contexto de elevada demanda hídrica para irrigação das culturas, associado à escassez de água em diversas regiões, tem-se impulsionado o desenvolvimento de soluções sustentáveis para a produção agrícola (GUERRA *et al.*, 2026).

Segundo Melo *et al.* (2025), o uso de água residuária tratada tem se destacado como uma alternativa promissora para a irrigação em diversas regiões, contribuindo para a redução do consumo de água potável, além de diminuir os custos com fertilizantes, em função da presença de nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas.

Nesse sentido, a análise de regressão destaca-se como uma ferramenta fundamental para descrever a relação entre variáveis agrônômicas e níveis de insumos ou práticas de manejo. Conforme Hoffmann (2016), essa abordagem quantitativa permite avaliar a influência da variável independente sobre a variável resposta, assumindo, em muitos casos, uma relação

linear entre elas, o que possibilita a construção de modelos capazes de auxiliar na determinação de níveis ótimos de manejo.

No entanto, nem todas as relações entre variáveis são adequadamente descritas por modelos lineares, especialmente em situações em que há respostas mais complexas das culturas aos níveis de insumos (JANINE; SILVA, 2025). Diante desse cenário, destacam-se os modelos polinomiais, amplamente empregados na descrição da resposta de culturas a diferentes níveis de insumos (COELHO *et al.*, 2018). Esse tipo de modelo permite representar relações não lineares entre as variáveis, possibilitando a identificação de pontos de máxima ou mínima resposta (MEDEIROS *et al.*, 2018).

Dentre as culturas de interesse agrônomo, destaca-se o maracujazeiro-amarelo (*Passiflora edulis* Sims), de grande importância para a fruticultura brasileira, ocupando mais de 90% dos pomares nacionais (SILVA *et al.*, 2020). Sua produção é de aproximadamente 736.585 toneladas (IBGE, 2024). Nesse contexto, o uso de água residuária tratada pode representar uma alternativa viável para suprir as demandas hídricas e nutricionais da cultura.

Contudo, ainda são escassas as informações acerca das concentrações ideais de água residuária tratada que maximizam a eficiência no uso da água em mudas de maracujazeiro-amarelo, evidenciando a necessidade da aplicação de abordagens de modelagem estatísticas para subsidiar o manejo sustentável da irrigação.

O objetivo deste estudo foi avaliar e modelar a eficiência do uso da água em mudas de maracujá-amarelo (*P. edulis*) em função da irrigação com diferentes concentrações de água residuária doméstica tratada.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi conduzida entre agosto e outubro (correspondendo às estações de inverno e início da primavera) na Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada na cidade de Lavras, sul do estado de Minas Gerais, Brasil, com altitude média de 910 metros, latitude de 21°14'06"S e longitude de 45°00'00"W.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, com inverno seco e chuvas predominantes no verão, com precipitação total

média anual de 1383,4 mm e temperatura média anual de 20,6°C (INMET, 2022).

O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação com estrutura em arco geminada, área total de 145,3 m², largura de 8,7 m, comprimento de 16,7 m, pé-direito de 3,0 m e altura total de 4,5 m, orientada no sentido Leste-Oeste, coberta por filme de polietileno de baixa densidade, com espessura de 150 µm, contendo aditivo anti-uv. Os fechamentos transversais e longitudinais possuem tela de sombreamento preta (sombrite), capaz de bloquear 50% da radiação solar. As unidades experimentais foram dispostas sobre bancada metálica, a 1 m acima do nível do solo, com comprimento de 3 m e largura de 1 m.

Condução do experimento

O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos correspondentes a diferentes concentrações de água residuária doméstica tratada (C_{AR}) utilizada na irrigação das mudas: $C_{AR,0\%}$ (correspondente a 100% de água de abastecimento (AA); $C_{AR,25\%}$ (25% de C_{AR} + 75% de AA); $C_{AR,50\%}$ (50% de C_{AR} + 50% de AA); $C_{AR,75\%}$ (75% de C_{AR} + 25% de AA); $C_{AR,100\%}$ (100% de C_{AR}), com cinco repetições. Cada unidade experimental foi constituída por três recipientes (sacos de polietileno de 10,0 cm de largura e 22,0 cm de altura), contendo uma planta cada.

O substrato utilizado foi o Carolina Soil Classe XVI (composição: turfa, vermiculita, calcário), ele é comumente empregado na produção de mudas de maracujá amarelo e outras culturas agrícolas (RANGEL JUNIOR *et al.*, 2020).

Em relação à irrigação das mudas, a $C_{AR,0\%}$ correspondeu a 100% de AA (controle), obtida de uma torneira localizada na própria casa de vegetação, com fornecimento proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA). Essa ETA segue os padrões brasileiros para armazenamento e distribuição de água potável de acordo com a Portaria de Potabilidade MS Nº 518/2004 (BRASIL, 2005). Para o preparo das demais concentrações de C_{AR} ($C_{AR,25\%}$, $C_{AR,50\%}$, $C_{AR,75\%}$ e $C_{AR,100\%}$), foram utilizados quatro tambores de 100 L, preenchidos com AA e adicionados com C_{AR} provenientes da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada na UFLA. As C_{AR} para irrigação foram preparadas com base em Melo *et al.* (2023).

A ETE-UFLA conta com sistema combinado de reatores anaeróbios do tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) seguidos de sistema



aeróbio de pós-tratamento tipo SABF (*Submerged Biological Aerated Filter*), tendo o filtro de areia como polimento e a cloração seguida de sistema de radiação ultravioleta para desinfecção (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

A semeadura direta foi realizada em 2 de agosto de 2022, utilizando três sementes de maracujá amarelo (159 - *P. edulis* ISLA) em cada saco de polietileno. O desbaste foi realizado 15 dias após a emergência, mantendo-se a planta mais vigorosa em cada recipiente (CABRAL *et al.* 2023).

A irrigação foi realizada diariamente, às 8:00am, segundo a recomendação de Silva *et al.* (2021). Foi realizada manualmente com auxílio de uma proveta graduada para controle do volume de água aplicado às parcelas experimentais. Inicialmente, a irrigação foi realizada diariamente com água de abastecimento ($C_{AR,0\%}$) durante 30 dias, a fim de evitar que a água residuária comprometesse a germinação das sementes e a emergência das plântulas (ARAÚJO *et al.* 2016). Após esse período, a irrigação foi realizada com diferentes concentrações de água residuária doméstica tratada, conforme os tratamentos estabelecidos.

Para quantificação diária do volume de água a ser aplicado em cada saco de polietileno com a muda de maracujá amarelo na casa de vegetação, foi realizado o ensaio de capacidade de campo (C_c). Quatro sacos de polietileno preenchidos com o substrato Carolina Soil Classe Interna XVI foram saturados até o cessamento da drenagem pela ação da gravidade. Posteriormente, determinou-se a diferença entre os pesos dos substratos úmido e seco para calcular a quantidade de água a ser aplicada antes da semeadura. Em seguida, os sacos foram pesados para se obter a massa em condições de capacidade de campo e a massa após 24h. A diferença entre os dois valores correspondeu à perda por evapotranspiração, assim, a quantidade de água a ser reposta em cada saco durante o período experimental foi determinada (Cruz *et al.*, 2008).

Observou-se que a quantidade de água aplicada em função da evapotranspiração no substrato utilizado foi de 25,8 mL aos 60 dias após a semeadura (DAS). O volume total de água aplicado no substrato foi de 116.096,25 mL.

Durante o período experimental, o controle de plantas daninhas foi realizado por meio de arranquio manual. Não houve necessidade de controle fitossanitário de pragas e doenças.

Avaliação da eficiência do uso da água

As avaliações das mudas de maracujá-amarelo ocorreram aos 60 dias após a semeadura (DAS), período em que as mudas atingem os tamanhos apropriados para plantio a campo (CRUZ *et al.*, 2008).

As plantas foram retiradas dos sacos de polietileno e, posteriormente, lavadas as raízes em água corrente para retirada do excesso de substrato. Após isso, o material foi acondicionado em sacos de papel kraft identificados e conduzidos para secagem em estufa a $60 \pm 5^\circ\text{C}$ até a obtenção do peso constante para determinação da massa seca total (MST), que foi realizado com o auxílio da balança digital com precisão de 0,0001 g.

A eficiência de uso da água (EUA) foi obtida pelo quociente entre o incremento de biomassa seca da planta (produtividade primária) e o total de água de evapotranspiração, adaptado de Hatfield *et al.* (2001) (Equação 1).

$$EUA = \frac{MST}{AEV} \quad (1)$$

Onde EUA é a eficiência do uso da água (g L^{-1}), MST é a massa seca total (g) e AEV é a água de evapotranspiração (L).

Modelagem empírica

Quando os dados são obtidos com base em delineamentos experimentais fundamentados em princípios estatísticos, torna-se necessária sua análise por meio de métodos adequados (SILVA, 2003). No caso de tratamentos quantitativos, como C_{AR} , a regressão polinomial permite descrever o comportamento da variável resposta em função da variável independente. Assim, se faz necessário o uso do modelo com melhor ajuste (DUTRA *et al.*, 2025).

Dessa forma, foram ajustados modelos polinomiais de diferentes graus, sendo a seleção baseada na significância estatística dos coeficientes ($p < 0,05$), no critério de informação de Akaike (AIC) e no desempenho preditivo do modelo. Com base nisso, o modelo cúbico foi selecionado para descrever a eficiência do uso da água em função da concentração de água residuária tratada. O modelo geral foi representado por:

$$EUA = a + b(C_{AR}) + c(C_{AR})^2 + d(C_{AR})^3 \quad (2)$$

Em que EUA representa a variável resposta uso eficiente da água e C_{AR} a variável independente concentração de água residuária tratada, sendo a , b , c e d os coeficientes estimados do modelo (TEIXEIRA, 2025).

A determinação do ponto ótimo foi realizada por meio da derivação da equação ajustada:

$$\frac{d(EUA)}{dC_{AR}} = b + 2c(C_{AR}) + 3d(C_{AR})^2 \quad (3)$$

Os pontos críticos foram obtidos igualando-se a derivada a zero, sendo selecionado aquele correspondente ao valor máximo da variável resposta, sendo este considerado o ponto ótimo de eficiência do uso da água para irrigação das mudas de maracujá-amarelo.

Avaliação de desempenho do modelo

No âmbito da análise estatística, a validação de modelos constitui uma etapa fundamental para assegurar a qualidade das inferências realizadas. Após estimar o modelo estatístico, é necessário avaliar tanto a qualidade do ajuste quanto sua capacidade de predição (COSTA, 2025).

A qualidade do ajuste dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2), que expressa a proporção da variabilidade da variável resposta explicada pelo modelo (FÁVERO *et al.*, 2009; FÁVERO; FÁVERO, 2016) (Equação 4).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}} \right]^2 \quad (4)$$

Em que $\hat{y}_i$ é o valor predito pelo modelo, y_i é o valor observado, n é o número de observações, $\bar{y}$ representa a média dos valores observados e $\bar{\hat{y}}$ representa a média dos valores previstos.

Adicionalmente, utilizou-se o Critério de Informação de Akaike (AIC), que considera simultaneamente a qualidade do ajuste e a complexidade do modelo. Tal critério se baseia em penalizar os modelos com maior número de parâmetros, preferindo os modelos mais simples (AKAIKE, 2003) (Equação 5).

$$AIC = -2 \ln(L) + 2k \quad (5)$$

Onde L é a função de máxima verossimilhança do modelo e k o número de parâmetros do modelo.

Para avaliar a capacidade preditiva, foram utilizadas métricas baseadas nos erros entre valores observados e estimados (COSTA, 2025). São elas: o Desvio Absoluto Médio (MAD), o Erro de Viés Médio (MBE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) e o

coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Equações 6 a 11, respectivamente).

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Onde $\hat{y}_i$ é o valor predito pelo modelo, y_i é o valor observado, n é o número de observações e $\bar{y}$ é a média dos valores observados.

Validação do modelo

A validação dos modelos foi realizada por meio da técnica *leave-one-out cross-validation* (LOOCV), na qual o modelo é ajustado repetidamente, removendo-se uma observação por vez e utilizando-a como dado de teste. Assim, todas as amostras são utilizadas na avaliação do modelo, permitindo obter uma estimativa mais robusta e confiável do seu desempenho (SARAIVA, 2026) (Equação 12).

$$e_i^{LOOCV} = y_i - \hat{y}_{(-i)} \quad (11)$$

Onde, e_i^{LOOCV} é o erro de previsão, y_i é o valor observado e $\hat{y}_{(-i)}$ é o valor predito sem a i -ésima observação.

Com base nesses erros, foram recalculadas todas as métricas de desempenho, permitindo uma avaliação robusta da capacidade preditiva do modelo.

Análise Estatística

A significância estatística da regressão foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA), utilizando o teste F (FÁVERO *et al.*, 2009). Essa abordagem permite verificar se a variável independente exerce efeito significativo sobre a variável resposta, com base na comparação entre a variabilidade explicada pelo modelo e a variabilidade residual.

A significância dos coeficientes do modelo foi avaliada por meio dos valores de p , nos quais valores

menores indicam maior evidência estatística do efeito da variável explicativa sobre a variável resposta (RAJPUT *et al.*, 2026). Nesse contexto, a significância global do modelo de regressão foi testada considerando as seguintes hipóteses:

$$H_0: b = c = d = 0$$

$$H_1: \exists(b, c \text{ ou } d) \neq 0$$

Onde a hipótese nula assume que nenhum dos termos explicativos contribui significativamente para o modelo. A rejeição dessa hipótese indica que pelo menos uma das variáveis preditoras exerce efeito significativo sobre a variável resposta (FÁVERO; FÁVERO, 2016).

A estatística F foi calculada conforme:

$$F = \frac{\frac{R^2}{(k-1)}}{\frac{(1-R^2)}{(n-k)}} \quad (12)$$

Onde k representa o número de parâmetros do modelo (incluindo o intercepto), n o tamanho da amostra e R^2 o coeficiente de determinação.

Para garantir a validade das inferências estatísticas, foram avaliados os principais pressupostos do modelo, incluindo normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos, além da identificação de observações influentes. A normalidade dos resíduos foi verificada por meio do gráfico quantil-quantil (Q-Q plot), no qual a aderência dos pontos à reta de referência indica conformidade com a distribuição normal (LEOTTI *et al.*, 2012; AFONSO; NUNES, 2019).

A decisão quanto à significância do modelo foi baseada no valor de p associado à estatística F, considerando o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). A hipótese nula foi rejeitada quando $p < \alpha$, indicando que pelo menos um dos coeficientes do modelo difere significativamente de zero e que a variável explicativa exerce efeito significativo sobre a variável resposta.

Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o pacote de *software* R versão 4.4.1 (R CORE TEAM, 2024) com o RStudio IDE.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajuste do modelo e desempenho de treinamento

Para descrever a relação entre a concentração de água residuária tratada e a eficiência do uso da água, foi

ajustado um modelo de regressão polinomial de terceiro grau (Equação 14):

$$EUA = 1,3242 - 0,0393(C_{AR}) + 0,00186(C_{AR})^2 - 0,0000153(C_{AR})^3 \quad (13)$$

Onde EUA representa a eficiência do uso da água e C_{AR} a concentração de água residuária tratada.

A curva ajustada (Figura 1) evidencia uma relação não linear entre a concentração de água residuária e a eficiência do uso da água, indicando que incrementos na concentração não resultam em respostas proporcionais da variável resposta.

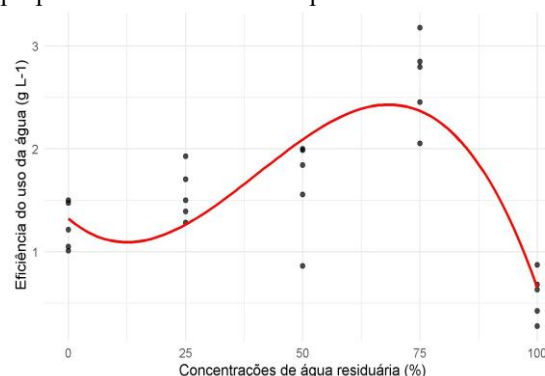


Figura 1. Curva ajustada do modelo de regressão polinomial cúbico descrevendo a relação entre a concentração de água residuária tratada (C_{AR}) e a eficiência do uso da água (EUA) em mudas de maracujazeiro-amarelo.

Esse comportamento é característico de sistemas biológicos, nos quais múltiplos fatores como a disponibilidade de nutrientes e efeitos osmóticos influenciam simultaneamente o desenvolvimento das plantas (FILHO, 2025).

A tabela 1 apresenta o desempenho de treinamento do modelo polinomial cúbico.

Tabela 1. Métricas de desempenho do modelo cúbico na fase de treinamento para estimativa da eficiência do uso da água (EUA) em função da concentração de água residuária tratada (C_{AR}).

R^2	AIC	MAD	MBE	RMSE	MAPE	NSE
0,692	36,586	50,308	2	0,411	826,853	80,692

R^2 : coeficiente de determinação; AIC: critério de informação de Akaike; MAD: desvio absoluto médio; MBE: erro médio; RMSE: raiz do erro quadrático médio; MAPE: erro percentual absoluto médio; NSE: coeficiente de Nash-Sutcliffe.

O modelo cúbico apresentou $R^2 = 0,692$, indicando que 69,2% da variabilidade da eficiência do uso da água é explicada pela concentração de água

residuária tratada. Esse resultado evidencia um ajuste satisfatório, sugerindo que o modelo é capaz de capturar uma parcela relevante da variabilidade do sistema.

A concordância entre valores observados e preditos (Figura 2) reforça a adequação do modelo, uma vez que os pontos se distribuem próximos à linha 1:1, indicando boa capacidade preditiva. Pequenas dispersões ao redor da reta refletem a variabilidade residual inerente aos dados experimentais, sem comprometer o desempenho do modelo.

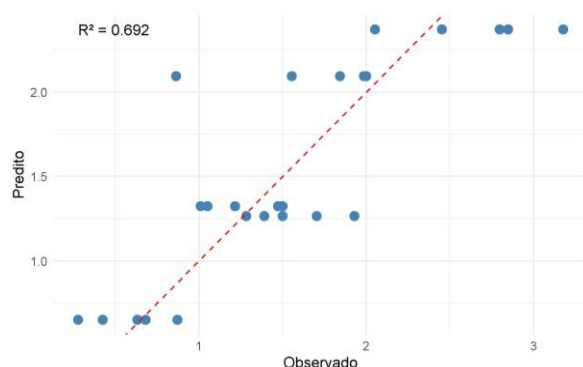


Figura 2. Relação entre valores observados e preditos da eficiência do uso da água (EUA) obtidos pelo modelo cúbico.

Pequenas dispersões em torno da reta indicam a presença de erros residuais, porém sem comprometer significativamente o desempenho do modelo.

Resultados semelhantes foram observados para o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe ($NSE = 0,692$), expressando a capacidade do modelo em reproduzir os padrões observados.

Além disso, foi considerada a análise do erro associado às estimativas, uma vez que um bom modelo não deve apenas explicar a variabilidade dos dados, mas também apresentar baixos níveis de erro. Nesse cenário, o uso das métricas MAD, MAPE, MBE e RMSE se torna importante para quantificar os erros do modelo.

Os resultados das métricas indicaram bom desempenho. O desvio absoluto médio ($MAD = 0,3082 \text{ g L}^{-1}$) e a raiz do erro quadrático médio ($RMSE = 0,4118 \text{ g L}^{-1}$) demonstram que os erros de predição são relativamente baixos. O erro percentual absoluto médio ($MAPE = 26,85\%$) indica erro relativo moderado, enquanto o erro médio ($MBE \approx 0$) evidencia ausência de viés sistemático.

De acordo com Moriasi *et al.* (2007) e Hayati *et al.* (2021), esses resultados indicam que o modelo apresenta desempenho adequado, sendo capaz de

representar satisfatoriamente a relação entre a concentração de água residuária tratada e a eficiência do uso da água na produção de mudas de maracujá-amarelo.

Validação do modelo e capacidade preditiva

Para avaliar a capacidade de generalização do modelo, foi aplicada a validação cruzada do tipo *leave-one-out* (LOOCV). Os resultados de validação (Tabela 2) indicam que o modelo mantém desempenho preditivo consistente.

Tabela 2. Métricas de desempenho do modelo cúbico obtidas por validação cruzada *leave-one-out* (LOOCV) para predição da eficiência do uso da água (EUA).

R^2	MAD	MBE	RMSE	MAPE	NSE
0,5876	0,3625	0,0048	0,4765	31,9291	0,5876

R^2 : coeficiente de determinação; MAD: desvio absoluto médio; MBE: erro médio; RMSE: raiz do erro quadrático médio; MAPE: erro percentual absoluto médio; NSE: coeficiente de Nash-Sutcliffe.

O coeficiente de determinação reduziu para $R^2 = 0,5876$, indicando que 58,76% da variabilidade da eficiência do uso da água em dados independentes é explicada pelo modelo. Embora inferior ao obtido na fase de treinamento, essa redução é esperada e reflete uma estimativa mais realista da capacidade preditiva.

De forma semelhante, o coeficiente NSE (0,5876) confirma que o modelo mantém desempenho satisfatório. A redução moderada entre treino e validação indica ausência de sobreajuste severo, evidenciando boa capacidade de generalização, característica fundamental em modelos preditivos.

As métricas de erro apresentaram aumento esperado na fase de validação. O RMSE ($0,4765 \text{ g L}^{-1}$) e o MAD ($0,3625 \text{ g L}^{-1}$) permaneceram em níveis aceitáveis, enquanto o MAPE (31,93%) indica erro percentual moderado. O MBE (0,0048) permaneceu próximo de zero, confirmando ausência de viés sistemático.

Segundo Couto *et al.* (2025), o aumento da diferença entre os erros de treinamento e validação é um indicativo de *overfitting*, evidenciando que o modelo proposto no presente trabalho apresenta bom desempenho de treinamento, mas menor capacidade de generalização. O aumento moderado dos erros indica robustez do modelo, sem evidências de *overfitting* severo.

Análise de variância (ANOVA)

A significância estatística do modelo foi avaliada por meio da análise de variância (ANOVA). Previamente, o pressuposto de normalidade dos resíduos foi verificado por meio do gráfico quantil-quantil (Q-Q plot) (Figura 3), no qual se observou boa aderência dos dados à distribuição normal, evidenciada pela proximidade dos pontos à reta de referência.

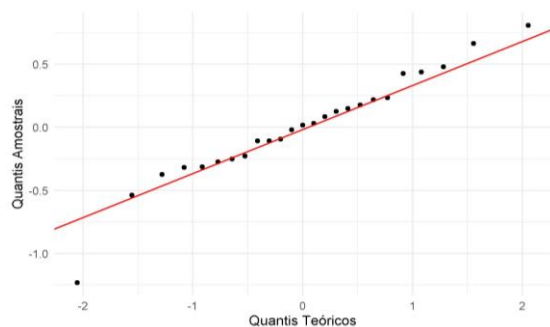


Figura 3. Quantil-quantil (Q-Q plot) dos resíduos do modelo cúbico, utilizado para avaliação do pressuposto de normalidade.

Os resultados dos coeficientes da regressão (Tabela 3) indicaram que o termo linear não foi estatisticamente significativo ($p = 0,7085$), enquanto os termos quadrático e cúbico apresentaram alta significância ($p < 0,001$).

Tabela 3. Avaliação da significância dos coeficientes do modelo de regressão cúbico ajustado à eficiência do uso da água (EUA) em função da concentração de água residuária tratada (C_{AR}).

Parâmetro	F	p valor
<i>b</i>	0,1437	0,7085
<i>c</i>	26,4900	<0.001
<i>d</i>	20,5557	<0.001

Esses resultados evidenciam que a variável resposta apresenta comportamento não linear em relação à concentração de água residuária, reforçando a inadequação de modelos lineares para a descrição do fenômeno (FÁVERO; FÁVERO, 2016). Tais valores de F sustentam a robustez desses termos na decomposição da variância e na explicação do fenômeno observado.

A significância dos termos de maior ordem reforça que a resposta das plantas de maracujazeiro à irrigação com concentrações de água residuária tratada ocorre de forma complexa, o que justifica a adoção do modelo polinomial cúbico.

Análise do ponto ótimo

Com base no modelo cúbico ajustado, foi determinado o ponto ótimo correspondente à máxima eficiência do uso da água, por meio da derivação da equação de regressão (Figura 4).

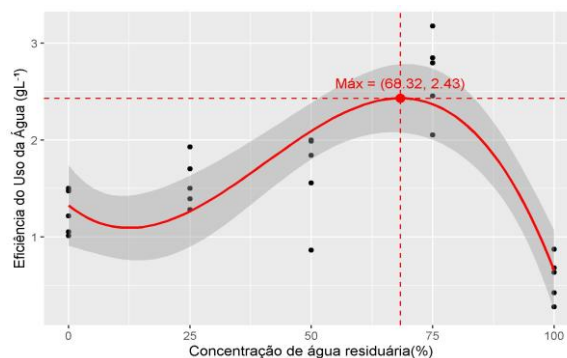


Figura 4. Determinação do ponto ótimo de eficiência do uso da água (EUA) em função da concentração de água residuária tratada (C_{AR}), obtido a partir do modelo de regressão cúbico.

O valor máximo da eficiência ($2,43 \text{ g L}^{-1}$) foi obtido para uma concentração de água residuária de 68,32%. Esse resultado indica que essa concentração pode ser utilizada para maximizar a eficiência do uso da água nas condições experimentais avaliadas de produção das mudas de maracujá-amarelo.

A existência de um ponto ótimo confirma a natureza não linear da relação, caracterizada por aumento inicial da eficiência seguido de decréscimo após determinado limiar. Esse comportamento sugere que concentrações moderadas de água residuária podem favorecer o desenvolvimento das plantas de maracujazeiro, possivelmente devido ao aporte de nutrientes, enquanto concentrações elevadas podem provocar efeitos negativos, associados a fatores como salinidade ou toxicidade.

Esse comportamento reforça a importância do uso de modelos não lineares na descrição do fenômeno, uma vez que permitem identificar limites ótimos de manejo que não seriam capturados por modelos lineares.

De forma geral, os resultados demonstram que o modelo cúbico foi adequado para descrever a relação entre a concentração de água residuária tratada e a eficiência do uso da água, apresentando bom desempenho tanto em termos de ajuste quanto de capacidade preditiva.

A identificação de uma concentração ótima possui implicações práticas relevantes, contribuindo para o manejo mais eficiente e sustentável da irrigação. Além disso, o uso de água residuária tratada em



níveis adequados se apresenta como uma alternativa viável para reduzir a demanda por água potável, mantendo o desempenho produtivo das plantas da cultura do maracujá-amarelo.

CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que a eficiência do uso da água em mudas de maracujazeiro-amarelo apresenta comportamento não linear em função das concentrações de água residuária tratada, sendo adequadamente descrita por um modelo de regressão polinomial de terceiro grau. O modelo ajustado apresentou desempenho satisfatório, conforme indicado pelos coeficientes de ajuste e métricas de validação, demonstrando adequada capacidade preditiva e robustez.

A partir do modelo, foi possível identificar um ponto ótimo de eficiência do uso da água, no qual o valor máximo de 2,43 g L⁻¹ foi obtido para uma concentração de 68,32% de água residuária tratada. Esse resultado indica que níveis intermediários de aplicação de efluentes favorecem a eficiência hídrica, possivelmente em função do equilíbrio entre aporte de nutrientes e efeitos adversos em concentrações elevadas.

Os resultados obtidos reforçam o potencial do uso de água residuária tratada como estratégia sustentável para a produção de mudas de maracujazeiro-amarelo, contribuindo para a racionalização do uso de recursos hídricos. Além disso, evidenciam a importância do emprego de modelos não lineares na definição de níveis ótimos de manejo, fornecendo suporte técnico-científico para práticas mais eficientes e sustentáveis na irrigação agrícola.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, Anabela; NUNES, Carla. Probabilidades e estatística: aplicações e soluções em SPSS. Versão revista e aumentada. 2019.
- AKAIKE, Hirotugu. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control, v. 19, n. 6, p. 716–723, 2003.

- ARAÚJO, E. F. et al. Crescimento e balanço nutricional de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* com aplicação de substratos orgânicos e água residuária. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 36, n. 86, p. 169–177, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.86.1135>.

- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS n.º 518/2004. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2005.

- CABRAL, R. G. et al. Efeitos de diferentes substratos no desenvolvimento de mudas de maracujá. Agri-Environmental Sciences, v. 9, n. 2, p. 1–5, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36725/agries.v9i2.8625>.

- COELHO, Anderson Prates et al. Clorofilômetro portátil como forma de manejo da irrigação e adubação nitrogenada em aveia-branca. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 2, p. 2542, 2018.

- COSTA, Ana Márcia Barreto Mota da. Análise e previsão de preço do leite com aplicação de modelo de regressão para tendência e comportamento sazonal. 2025.

- COSTA FILHO, Marcondes Ferreira. Propriedades físico-químicas do solo irrigado com efluente de esgoto doméstico tratado em unidade de produção familiar. 2025.

- COUTO, Isabella Soares et al. Identificação de gestos faciais com visão computacional: proposta aplicada ao neuromarketing. Revista Delos, v. 18, n. 71, p. e6561, 2025.

- CRUZ, M. C. M. D. et al. Utilização de água residuária de suinocultura na produção de mudas de maracujazeiro-azedo cv. redondo amarelo. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 30, n. 4, p. 1107–1112, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-29452008000400043>.

- DE MELO, Armando Rodrigues et al. Efeito da água residuária e adubação fosfatada em pigmentos fotossintéticos e macronutrientes de *Moringa oleifera* Lam. Revista Árvore, 2025.

- DE MOURA GUERRA, Antonia Mirian Nogueira et al. Produção sustentável de mudas de meloeiro com uso de efluente da piscicultura. Revista Acadêmica Online, v. 12, n. 62, p. e1890, 2026.

- DE SOUZA MEDEIROS, Aldair et al. Crescimento e alocação de fitomassa do quiabeiro submetido a doses de nitrogênio e irrigação com água residuária. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 12, n. 3, p. 2621–2631, 2018.



- DE SOUZA SILVA, Graciete et al. Physicochemical quality, bioactive compounds and in vitro antioxidant activity of a new variety of passion fruit cv. BRS Sertão Forte (*Passiflora cincinnata* Mast.). *Scientia Horticulturae*, v. 272, p. 109595, 2020.
- DUTRA, Josiele Garcia; DA SILVA, Pollyane Vieira; PEIL, Roberta Marins Nogueira. Modelagem do crescimento vegetativo e reprodutivo do morangueiro via regressão polinomial ortogonal. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 10, n. 4, 2025.
- FÁVERO, Luiz Paulo Lopes et al. Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões. 2009.
- FÁVERO, Luiz Paulo; FÁVERO, Patricia. Análise de dados: modelos de regressão com Excel®, Stata® e SPSS®. Elsevier Brasil, 2016.
- GRAIE. Critères & indicateurs d'auto-évaluation des modèles. 2018. Disponível em: <http://www.graie.org>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. *Agronomy Journal*, v. 93, p. 271–280, 2001.
- HOFFMANN, R. Análise de regressão: uma introdução à econometria. 5. ed. Piracicaba: O Autor, 2016.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção de maracujá 2022 – Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatológicas do Brasil 1991–2020. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- JANINE, Samantha Navarro; SILVA, Marcelo Andrade da. Delineamentos ótimos para modelos polinomiais fracionários. 2025.
- LEOTTI, Vanessa Bielefeldt; COSTER, Rodrigo; RIBOLDI, João. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de testes não paramétricos por simulação. *Revista HCPA*, v. 32, n. 2, p. 227–234, 2012.
- LIMA JUNIOR, J. C. et al. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará. *Revista Ciência Agrônômica*, v. 47, n. 3, p. 447–454, 2016.
- MELO, A. R. D. et al. Alterações químicas do solo após irrigação com efluentes e adubação fosfatada cultivado com Moringa oleifera Lam. *Ciência Florestal*, v. 33, p. e70786, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509870786>.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.
- NUR HAYATI, F. et al. Peramalan data ekspor non migas Provinsi Kalimantan Timur menggunakan univariate time series. 2021. Disponível em: www.unipasby.ac.id. Acesso em: 30 mar. 2026.
- OLIVEIRA, J. F. et al. Principal component analysis as a criterion for monitoring variable organic load of swine wastewater. *Journal of Environmental Management*, v. 262, p. 110386, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110386>.
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- RAJPUT, Dheeraj Singh; CHOUDHARY, Bharat; BOOLCHANDANI, Dharmendar. Design and optimization of a Quad-Tail-Cell dynamic MCML. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, v. 126, n. 1, p. 20, 2026.
- RANGEL JUNIOR, I. M. et al. Uso de diferentes substratos na produção de mudas orgânicas de maracujazeiro amarelo. *Cadernos de Agroecologia*, v. 13, n. 1, 2018.
- SARAIVA, Murilo Neco. Avaliação do potencial de modelos de aprendizagem de máquina na predição do índice de refração não linear em materiais vítreos. 2026. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- SILVA, João Gilberto Corrêa da. Estatística experimental: análise estatística de experimentos. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2003.
- TEIXEIRA, Matheus Moreira. Introdução à teoria dos modelos polinomiais fracionários. 2022.
- UNESCO. Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: o valor da água. Disponível em: <https://d15k2d11r6t6rl.cloudfront.net>. Acesso em: 15 dez. 2022.
- WANDERA, Victor et al. Análise comparativa de técnicas de validação cruzada: LOOCV, validação cruzada K-folds e validação cruzada K-folds repetida em modelos de aprendizado de máquina. *American Journal of Theoretical and Applied Statistics*, v. 13, n. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajtas.20241305.13>.