

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 16/12/2023

At the author's request, the full text of this thesis / dissertation will not be available online until December 16, 2023

LUANA POSSARI MAZIERO COSTA

**PREVISÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA USANDO
INFERÊNCIA NEURO-FUZZY**

Botucatu

2021

LUANA POSSARI MAZIERO COSTA

**PREVISÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA USANDO
INFERÊNCIA NEURO-FUZZY**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2021

C837p	Costa, Luana Possari Maziero Previsão da evapotranspiração de referência usando inferência neuro-fuzzy / Luana Possari Maziero Costa. -- Botucatu, 2021 92 p. : il., tabs., mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho Coorientador: Alexandre Dal Pai 1. Evapotranspiração de referência. 2. Algoritmos difusos. 3. Modelos matemáticos. 4. Análise de séries temporais. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PREVISÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA USANDO INFERÊNCIA NEURO-FUZZY

AUTORA: LUANA POSSARI MAZIERO COSTA

ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Luís R. A. Gabriel Filho

Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO (Participação Virtual)
Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP

p/ Luís R. A. Gabriel Filho

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

p/ Luís R. A. Gabriel Filho

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZONI (Participação Virtual)
FCE / UNESP/Tupã (SP)

p/ Luís R. A. Gabriel Filho

Prof. Dr. ANTONIO ADOLFO MARTINS RAPOSO (Participação Virtual)
Campus Tupã / Instituto Federal de São Paulo

p/ Luís R. A. Gabriel Filho

Prof. Dr. ALEXSANDRO OLIVEIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Engenharia Agrícola / Universidade Federal do Ceará

Botucatu, 16 de dezembro de 2021

Dedico,

A minha família, especialmente, ao meu filho Enrico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida.

À minha família, que me amparou e aconselhou nesses anos de doutorado.

Ao Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho que me orienta academicamente a mais de oito anos e tornou-se grande incentivador da minha carreira. Agradeço por cada conselho e toda a compreensão que teve comigo durante todos esses anos.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Alexandre Dal Pai e ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Rodrigues pelas grandes contribuições para a construção desta tese.

À UNESP, por proporcionar minha formação, gratuita e de qualidade, na graduação, mestrado e doutorado, em especial à Faculdade de Ciências Agronômicas do Campus de Botucatu por proporcionar as condições necessárias para o meu aprendizado e desenvolvimento.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Irrigação e Drenagem) por me acolherem na pós-graduação e compartilharem seus conhecimentos para minha formação, mesmo quando tivemos que nos adaptar ao ensino remoto que a pandemia nos impôs.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

“Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que você sabe”.

Aldous Huxley

RESUMO

A evapotranspiração de referência é uma variável fundamental para o planejamento de sistemas de irrigação mais eficientes, uma vez que associada ao coeficiente da cultura permite estimar a necessidade hídrica da planta. Desta maneira, o objetivo do presente trabalho é estabelecer modelos de previsão de séries temporais da evapotranspiração de referência (Penman-Monteith/FAO 56) utilizando modelo neuro-fuzzy (ANFIS - *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), uma vez que este método apresenta resultados superiores quando comparados com outros métodos estocásticos na previsão de valores de uma série temporal. Para isso foi realizado a imputação de dados faltantes utilizando o método Correspondência Média Preditiva Ponderada (*midastouch*) das variáveis radiação solar global, velocidade do vento, temperatura do ar, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa do ar, umidade relativa do ar máxima e umidade relativa do ar mínima. A partir das séries históricas completas foram elaborados modelos de previsão de séries temporais que relacionam n valores de ET_o em tempos consecutivos e imediatamente anteriores ao tempo da observação a ser prevista. Os modelos neuro-fuzzy (ANFIS) elaborados utilizam o método de inferência Takagi-Sugeno, onde os dados são ordenados de acordo com a data de coleta, do mais antigo para o mais recente e os primeiros 85% dos dados sendo selecionados para treinamento e os demais 15% para validação. A partir da comparação dos modelos neuro-fuzzy elaborados, é possível verificar maior viabilidade na utilização de modelos gerais, que consideraram três anos de dados para o treinamento da rede, uma vez que apresentam erro percentual absoluto de 0,25% para Botucatu – SP e 0,26% para Tupã – SP. Portanto, a previsão da evapotranspiração de referência utilizando os modelos elaborados oferece estimativas confiáveis dos valores, que quando associados ao coeficiente da cultura, permitem gestão e planejamento de sistemas de irrigação de maneira eficiente e sustentável.

Palavras-chave: série histórica, Penman-Monteith, irrigação, ANFIS, dados ausentes.

ABSTRACT

The reference evapotranspiration is a fundamental variable for the planning of more efficient irrigation systems, once associated with the crop coefficient, it allows the estimation of the plant's water requirement. Thus, the objective of the present work is to establish time series prediction models of reference evapotranspiration (Penman-Monteith/FAO 56) using the neuro-fuzzy model (ANFIS - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), since this method presents superior results when compared with other stochastic methods in predicting values of a time series. For this, missing data was imputed using the Weighted Average Predictive Correspondence (midastouch) method of the variables global solar radiation, wind speed, air temperature, maximum temperature, minimum temperature, relative air humidity, maximum relative humidity and minimum relative humidity. From the complete historical series, time series prediction models were developed that relate n values of ET_o in consecutive times and immediately prior to the time of the observation to be forecast. The neuro-fuzzy models (ANFIS) elaborated use the Takagi-Sugeno inference method, where the data are sorted according to the collection date, from the oldest to the most recent and the first 85% of the data being selected for training and the remaining 15% for validation. From the comparison of the neuro-fuzzy models elaborated, it is possible to verify greater viability in the use of general models, which considered three years of data for the training of the network, since they present an absolute percentage error of 0.25% for Botucatu - SP and 0.26% for Tupã – SP. Therefore, the reference evapotranspiration forecast using the models developed offers reliable estimates of the values, which when associated with the crop coefficient, allow the management and planning of irrigation systems in an efficient and sustainable way.

Keywords: historical series, Penman-Monteith, irrigation, ANFIS, missing data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das estações meteorológicas de coleta de dados no estado de São Paulo.....	34
Figura 2 - Quantidade de dados faltantes, por variável, para o banco de dados do município de (A) Botucatu – SP e (B) Tupã – SP.....	37
Figura 3 – Gráficos de densidade de probabilidade dos dados observados e imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) do município de Botucatu – SP.....	38
Figura 4 - Gráficos de densidade de probabilidade dos dados observados e imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) do município de Tupã – SP.....	39
Figura 5 – Gráfico de pontos para a distribuição dos dados imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) para o município de Botucatu – SP. ...	40
Figura 6 – Gráfico de pontos para a distribuição dos dados imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) para o município de Tupã – SP.	41
Figura 7 – Gráfico <i>box-plot</i> para a distribuição dos imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) para o município de Botucatu – SP. ...	42
Figura 8 - Gráfico <i>box-plot</i> para a distribuição dos imputados pelo método (A) Correspondência Média Preditiva (<i>pmm</i>) e (B) Correspondência Média Preditiva Ponderada (<i>midastouch</i>) para o município de Tupã – SP.	43
Figura 9 - Arquitetura de um modelo <i>ANFIS</i>	61
Figura 10 - Sistema neuro- <i>fuzzy</i> de previsão da evapotranspiração de referência utilizando a evapotranspiração calculada (ET_o).	64

Figura 11 – (A) Evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith/FAO 56, (B) distribuição de frequências dos valores da série temporal e (C) densidade da probabilidade de obtenção da evapotranspiração de referência diária para Botucatu – SP.....	67
Figura 12 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parcial das séries temporais das estações (A) outono, (B) inverno, (C) primavera, (D) verão e (E) geral do município de Botucatu – SP.	69
Figura 13 – Erros de treinamento do modelo ANFIS Geral de Botucatu – SP para (A) um ano e (B) três anos de dados.....	72
Figura 14 – Gráficos de contorno utilizando série temporal de três anos das estações (A) Outono, (B) Inverno, (C) Primavera, (D) Verão e (E) Geral para o município de Botucatu – SP.....	73
Figura 15 – Arquitetura do modelo ANFIS geral utilizando série temporal de três anos para o município de Botucatu – SP.....	74
Figura 16 – Funções de pertinência das variáveis de entrada $ET_{o(t-1)}$, $ET_{o(t-2)}$ e $ET_{o(t-3)}$ do modelo ANFIS de Botucatu – SP.	75
Figura 17 – Gráficos de previsão de ET_o a partir da variação da $ET_{o(t-1)}$ e $ET_{o(t-2)}$, com $ET_{o(t-3)}$ fixa para Botucatu – SP.	76
Figura 18 – (A) Evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith/FAO 56, (B) distribuição de frequências dos valores da série temporal e (C) densidade da probabilidade de obtenção da evapotranspiração de referência diária para Tupã – SP.....	77
Figura 19 – Funções de autocorrelação e autocorrelação parcial das séries temporais das estações (A) outono, (B) inverno, (C) primavera, (D) verão e (E) geral do município de Tupã – SP.	78
Figura 20 – Erros de treinamento do modelo ANFIS Geral de Tupã – SP para (A) um ano e (B) três anos de dados.....	81
Figura 21 – Gráficos de contorno utilizando série temporal de três anos das estações (A) Outono, (B) Inverno, (C) Primavera, (D) Verão e (E) Geral para o município de Tupã – SP.....	82

Figura 22 – Arquitetura do modelo ANFIS geral utilizando série temporal de três anos para o município de Tupã – SP.	83
Figura 23 – Funções de pertinência das variáveis de entrada $ET_{o(t-1)}$ e $ET_{o(t-2)}$ do modelo ANFIS de Tupã – SP.	84
Figura 24 – Gráficos de previsão de ET_o a partir da variação da $ET_{o(t-1)}$ e $ET_{o(t-2)}$, para o município de Tupã – SP.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado das medidas estatísticas NRMSE, MAPE e SMAPE calculados para os métodos <i>pmm</i> e <i>midastouch</i> dos municípios de Botucatu – SP e Tupã – SP.	45
Tabela 2 – Períodos de início e término dos subconjuntos de dados de cada estação meteorológica.	56
Tabela 3 – Definição dos parâmetros dos modelos neuro- <i>fuzzy</i> de menor erro estatístico U de Theil para o município de Botucatu – SP.	70
Tabela 4 – Erros U, RMSE e MAPE para os modelos Naive e ANFIS para o município de Botucatu – SP.	71
Tabela 5 – Definição dos parâmetros dos modelos neuro- <i>fuzzy</i> de menor erro estatístico U de Theil do município de Tupã – SP.	79
Tabela 6 – Erros U, RMSE e MAPE para os modelos Naive e ANFIS para o município de Tupã – SP.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ET_o	Evapotranspiração de Referência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MAPE	Erro Absoluto Médio Percentual
<i>midastouch</i>	Correspondência Média Preditiva Ponderada
NRMSE	Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio normalizado
<i>pmm</i>	Correspondência Média Preditiva
Rad	Radiação Solar Global
SMAPE	Erro Percentual Absoluto Médio Simétrico
T	Temperatura do Ar
Tmax	Temperatura do Ar Máxima
Tmin	Temperatura do Ar Mínima
UR	Umidade Relativa do Ar
Urmax	Umidade Relativa do ar Máxima
Urmin	Umidade Relativa do Ar Mínima
VV	Velocidade do Vento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	25
Justificativa	27
Objetivos	28
CAPÍTULO 1 - IMPUTAÇÃO MÚLTIPLA PMM E MIDASTOUCH EM SÉRIES HISTÓRICAS DE DADOS METEOROLÓGICOS	29
1.1 Introdução.....	31
1.2 Material e Métodos	33
1.3 Resultados e Discussão	36
1.4 Conclusões.....	46
CAPÍTULO 2 – MODELAGEM NEURO-FUZZY PARA A PREVISÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH	49
2.1 Introdução.....	52
2.2 Material e Métodos	54
2.2.1 Séries Temporais.....	54
2.2.2 Cálculo da Evapotranspiração de Referência.....	56
2.2.3 Método de elaboração dos sistemas neuro-fuzzy.....	60
2.2.4 Avaliação e validação dos modelos.....	64
2.3 Resultados e Discussão	66
2.3.1 Serie temporal e modelagem ANFIS para o município de Botucatu – SP	66
2.3.2 Serie temporal e modelagem ANFIS para o município de Tupã – SP	76
2.4 Conclusões.....	85
CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS	91

INTRODUÇÃO GERAL

Diante da crescente preocupação com a escassez de recursos hídricos para as atividades agrícolas em algumas regiões do planeta, é fundamental que se conheça a evapotranspiração das culturas para o eficiente manejo de sistemas de irrigação, sendo que este parâmetro agrometeorológico é estimado a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c) (CARVALHO et al., 2011; JIANG et al., 2016; TEJERO et al., 2018).

A evapotranspiração é o resultado da evaporação das superfícies e da transpiração das plantas, de acordo com Allen et al. (1998), constituindo um dos componentes principais do balanço hídrico, dependendo do saldo da radiação e do déficit de pressão de vapor para a perda de água para a atmosfera (CARDOSO; JUSTINO, 2014; ADNAN; ULLAH; AHMED, 2020). Assim, o monitoramento de tais variáveis admite planejar programas de irrigação com maior eficiência, permitindo estimativas mais precisas de produção agrícola (STAN et al., 2016).

Estudos feitos por Klar et al. (2006) e Rossato et al. (2017) mostram que as condições climáticas e a umidade do solo influenciam diretamente a produção e a produtividade de culturas. Prando et al. (2015) evidenciam que o manejo correto da irrigação deve permitir o uso sustentável da água a fim de obter a maior produção possível por unidade de água utilizada. Já Tejero et al. (2018) afirmam que o manejo adequado de irrigação além de permitir a economia de água pode induzir a regulação da fisiologia da planta.

Além disso, Toureiro et al. (2017) afirmam que a necessidade de água da cultura é revelada por meio da evapotranspiração da mesma, podendo ser prevista a quantidade de água de irrigação a ser alocada para o planejamento de projetos de irrigação e de safra. Silva et al. (2015) ressaltam que além da estimativa da necessidade hídrica, a (ET_o) permite o dimensionamento dos sistemas de irrigação (bombeamento, adução e distribuição de água). Desta maneira, a previsão de valores de evapotranspiração de referência devem ser feitos a partir de boa e imparcial estimativa de séries temporais de evapotranspiração de referência, conforme afirmam Tomas-Burguera et al. (2017).

O método de Penman-Monteith, adotado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) - Penman-Monteith/FAO 56, requer dados de temperatura média do

ar, velocidade do vento, umidade relativa média do ar, fluxo de calor no solo e saldo de radiação global (dado pela diferença entre o saldo de radiação de ondas curtas e o saldo de radiação de ondas longas) frequentemente disponíveis, com exceção da radiação de ondas longas, na maioria das estações meteorológicas do planeta, uma vez que tais dados são obtidos por meio de sensores que coletam informações em intervalos de tempos variados, disponibilizando grande volume de dados, conforme afirmam Baba, Vaz e Costa (2014).

Porém, Ventura et al. (2016) afirmam que problemas ocorridos nos instrumentos de coleta como desligamentos, manutenções, avarias, limitações físicas ou fenômenos climáticos ou mesmo na transmissão dos dados causam falhas nas séries de dados. Tais falhas também dificultam a aplicação de métodos, como é o caso do método padrão para o cálculo da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, sendo necessário a estimativa dos valores faltantes de algumas variáveis para que seja possível sua utilização.

Diante de tal necessidade, é comum a utilização de modelos matemáticos que representem o objeto ou fenômeno a ser estudado para que seja possível a estimativa ou mesmo a previsão de valores, fato também ressaltado por Macarthur, Stumpf e Oreffo (2018), já que a modelagem matemática clássica permite a otimização de processos e explicação de sistemas e fenômenos por meio de equações ou sistemas de equações.

Contudo, quanto maior a complexidade do fenômeno estudado mais interrelações de sistemas isolados são necessárias para sua representação, já que o aumento do número de variáveis dependentes e independentes envolvidas tornam as equações e sistemas de equações mais complexos, o que reduz a precisão oferecida para descrever o comportamento estudado (ZADEH, 1971; BASSANEZI, 2002; LABABIDI; BAKER, 2006).

Além disso, é comum a redução do volume de dados numéricos disponíveis à medida que a complexidade do fenômeno aumenta, além da existência de informações ambíguas e imprecisas acerca do fenômeno estudado. Neste caso, o raciocínio *fuzzy* permite descrever o comportamento de sistemas, admitindo o mapeamento das observações de entrada e saída (ZADEH, 1988; LABABIDI; BAKER, 2006). Aydin e Kayisli (2016) reforçam que o sistema de inferência neuro-*fuzzy* adaptável (ANFIS - *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) é eficiente para

estimar parâmetros, principalmente, de modelos matemáticos complexos e multivariados.

O estudo feito por Goyal et al. (2014), mostrou que os modelos de aprendizado superam os métodos empíricos tradicionais na modelagem de problemas, o que foi reforçado por Naghdi, Ghajar e Tsioras (2016), que obtiveram como resultado uma precisão relativamente mais alta no modelo ANFIS em comparação com o modelo de regressão linear múltipla. Neste contexto, o desenvolvimento de sistemas *fuzzy* tem se tornado uma alternativa bastante efetiva diante dos métodos estocásticos, quando empregados à avaliação de fenômenos agrários, biológicos e administrativos (GABRIEL FILHO et al., 2012).

Portanto, dada a complexidade envolvida na previsão de valores de uma série temporal, os sistemas de previsão de valores da evapotranspiração de referência podem ser estabelecidos de forma mais eficiente por meio de modelos que utilizam as redes neurais ao invés da utilização de métodos estatísticos. Essa metodologia aprimorada é denominada sistemas neuro-*fuzzy* ou ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). Ressalta-se que a metodologia ANFIS utiliza o método de inferência de Takagi-Sugeno, enquanto que sistemas *fuzzy* convencionais (os que não fazem uso das redes neurais) fazem uso do método de inferência de Mandani.

Justificativa

Considerando: (1) a evapotranspiração de referência, uma medida fundamental para o cálculo da necessidade hídrica das plantas, (2) o manejo correto da irrigação, para que se tenha aumento de produtividade sem desperdício de recursos hídricos; e (3) os modelos neuro-*fuzzy*, que são capazes de descrever fenômenos complexos, destaca-se a importância de estudos visando melhorar o planejamento de sistemas de irrigação por meio da estimativa de séries temporais da evapotranspiração de referência utilizando dados meteorológicos disponíveis.

Para isso é necessário que os produtores rurais e pesquisadores tenham ferramentas que o auxiliem na tomada de decisão para planejamento dos recursos empregados na produção agrícola, para que garantam eficiência em produtividade sem desperdícios de recursos físicos (como a água) e financeiros.

Atualmente, é corriqueiro tomar decisões frente às recomendações de aplicação de lâminas de irrigação já pré-fixadas em experimentos agrônômicos, uma vez que

análises estatísticas convencionais fazem acertadamente as devidas comparações nos níveis pré-estabelecidos. Todavia, é de grande importância que produtores e/ou pesquisadores tenham acesso a uma informação geral, que possa, posteriormente, ser utilizada de maneira personalizada para a melhoria do planejamento de safra. Portanto, a importância do presente trabalho é caracterizada pelo alargamento do poder de decisão e avanço na gestão produtiva de produtores, oferecendo maior eficiência nos tratos culturais, através de uma metodologia que possibilita a obtenção de resultados superiores a outros comumente utilizados.

Objetivos

O objetivo deste trabalho é estabelecer modelos de previsão de séries temporais da evapotranspiração de referência (Penman-Monteith/FAO 56) utilizando modelo neuro-*fuzzy* (ANFIS).

Especificamente, objetiva-se elaborar e avaliar o desempenho de um modelo que utilize observações anteriores para a estimação de um valor posterior, utilizando técnicas de inteligência artificial para relacionar valores passados da evapotranspiração de referência (ET_0) com valores futuros.

Para alcançar o objetivo proposto, a tese foi dividida em dois capítulos, intitulados: (1) “Imputação múltipla *pmm* e *midastouch* em séries históricas de dados meteorológicos” e (2) “Modelagem neuro-*fuzzy* para a previsão da evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verifica-se que o modelo neuro-*fuzzy* (ANFIS) geral, com rede treinada com série temporal de três anos, mostra-se eficiente na função de prever o valor de ET_o com base em seus valores anteriores, tendo erro de ajustes (MAPE) de 0,25% para Botucatu – SP e 0,26% para Tupã – SP. Apesar da qualidade de previsão ser semelhante aos dois municípios, seus erros quadráticos evidenciam a ocorrência de maior variabilidade nos valores da série temporal de Tupã – SP, fato ocasionado pelas características climáticas do município.

Vale ressaltar, que o procedimento de imputação para a reconstrução da série temporal de dados meteorológicos foi eficiente e fundamental para a qualidade do modelo ANFIS obtido, já que possibilitou a reconstrução do banco de dados considerando a variabilidade e incerteza do valor perdido, o que permitiu aumentar a qualidade do treinamento da rede ANFIS, já que as séries temporais estavam completas.

Desta maneira, a utilização dos modelos matemáticos para a previsão do valor de ET_o apresentam-se como uma ferramenta confiável para serem incorporadas por produtores e pesquisadores para a gestão e dimensionamento de sistemas de irrigação, já que apresentam baixo desvio do valor real. Assim, ao associar valor de ET_o , ao coeficiente de cultura (K_c), é possível ganhos de produtividade com baixo custo, já que se pode suprir a demanda hídrica da cultura evitando desperdícios de recursos naturais. Desta forma, há produção de alimentos de maneira sustentável, sendo esta uma questão essencial para todo o mundo, principalmente, para regiões dependentes da irrigação para a produção de alimentos.

Considerando, ainda, tornar os modelos elaborados uma ferramenta de fácil utilização, é possível o desenvolvimento de um aplicativo para celulares, em linguagem interativa e amigável, que automatize a busca pelo resultado, permitindo a transferência do conhecimento para o campo. Além desse avanço, é recomendável ainda a realização de outros estudos que verifiquem a qualidade das previsões para outras localidades, testando ou associando outras metodologias que permitam reduzir o erro ainda existente.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, S.; ULLAH, K.; AHMED, R. Variability in meteorological parameters and their impact on evapotranspiration in a humid zone of Pakistan. **Meteorological Applications**, v. 27, n. 1, 2020.
- ALLEN, R. et al. **Crop evapotranspiration** – Guidelines for computing crop water requerimentos. Rome: FAO, 1998.
- AYDIN, M. C.; KAYISLI, K. Prediction of Discharge Capacity over Two-Cycle Labyrinth Side Weir Using ANFIS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 5, 2016.
- BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. DA. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 515–526, 2014.
- BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 3 ed. São Paulo: Contexto, 2002.
- CARDOSO, G. M.; JUSTINO, F. Simulação dos componentes da evapotranspiração sob condições climáticas atuais e de cenários climáticos futuros de aquecimento global com o uso de modelos de clima-vegetação. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 85–95, 2014.
- CARVALHO, L. G. et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UMA ABORDAGEM ATUAL DE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456–465, 2011.
- GABRIEL FILHO, L. R. A. et al. Aplicação da lógica fuzzy para avaliação da eficiência e racionalidade de usinas sucroalcooleiras. In: BEDREGAL, B. et al. (eds.). **Recentes Avanços em Sistemas Fuzzy**. 1 ed. São Carlos: SBMAC - Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2012, p. 405–423.
- GOYAL, M. K. et al. Modeling of daily pan evaporation in sub tropical climates using ANN, LS-SVR, Fuzzy Logic, and ANFIS. **Expert Systems With Applications**, v. 41, n. 11, p. 5267–5276, 2014.
- JIANG, Y. et al. Optimizing regional irrigation water use by integrating a two-level optimization model and an agro-hydrological model. **Agricultural Water Management**, v. 178, p. 76–88, 2016.
- KLAR, A. E. et al. DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA NO INTERIOR DE UMA ESTUFA PLÁSTICA NO PERÍODO DO INVERNO. **IRRIGA**, v. 11, n. 2, p. 257–265, 2006.
- LABABIDI, H. M. S.; BAKER, C. G. J. Fuzzy Modeling. In: SABLANI, S. et al. (eds.). **Handbook of Food and Bioprocess Modeling Techniques**. Boca Rator: CRC Press, 2006, p. 451–498.
- MACARTHUR, B. D.; STUMPF, P. S.; OREFFO, R. O. C. From mathematical modeling and machine learning to clinical reality. In: LANZA, R. et al. (eds.). **Principles of Tissue Engineering**. 5 ed. Cambridge: Academic Press, 2018, p. 37–51.
- NAGHDI, R.; GHAJAR, I.; TSORAS, P. A. Time prediction models of grapple skidder HSM 904 using multiple linear regressions (MLR) and adaptive neuro-fuzzy inference

system (ANFIS). **Operational Research**, v. 16, n. 3, p. 501–512, 2016.

PRANDO, E. D. P. et al. SISTEMA WEB DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO – SISMI. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 121–136, 2015.

ROSSATO, L. et al. Impact of Soil Moisture on Crop Yields over Brazilian Semiarid. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, 2017.

SILVA, A. O. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PETROLINA, PE. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 1, p. 30-38, 2015.

STAN, F. I. et al. Study on the Evaporation and Evapotranspiration Measured on the Caldarusani Lake (Romania). **Procedia Environmental Sciences**, v. 32, p. 281–289, 2016.

TEJERO, I. F. G. et al. Sustainable Deficit-Irrigation Management in Almonds (*Prunus dulcis* L.): Different Strategies to Assess the Crop Water Status. In: TEJERO, I. F. G.; ZUAZO, V. H. D. (eds.). **Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment**. Cambridge: Academic Press, 2018, p. 271–298.

TOMAS-BURGUERA, M. et al. Accuracy of reference evapotranspiration (ET_o) estimates under data scarcity scenarios in the Iberian Peninsula. **Agricultural Water Management**, v. 182, n. 1, p. 103–116, 2017.

TOUREIRO, C. et al. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 211–220, 2017.

VENTURA, T. M. et al. ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS EM DADOS METEOROLÓGICOS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, n. 1, p. 168–177, 2016.

ZADEH, L. A. Quantitative fuzzy semantics. **Information Sciences**, v. 3, p. 159–176, 1971.

ZADEH, L. A. Fuzzy Logic. **Computer**, v. 21, n. 4, p. 83–93, 1988.