

JÉSSICA MAIARA DE SOUZA FERRARI

**ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE E DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO
RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO COM ÁGUA
TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO MODELAGEM NEURO-FUZZY**

**Botucatu
2018**

JÉSSICA MAIARA DE SOUZA FERRARI

**ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE E DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO
RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO COM ÁGUA
TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO MODELAGEM NEURO *FUZZY***

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

Orientadora: Prof^ª. Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F375a Ferrari, Jéssica Maiara de Souza, 1991-
Análise da produtividade e das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente utilizando modelagem neuro *fuzzy* / Jéssica Maiara de Souza Ferrari. - Botucatu: [s.n.], 2018
103 p.: ils. color., grafs. color., tabs.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Camila Pires Cremasco Gabriel
Inclui bibliografia
1. Rabanete - Produtividade. 2. Rabanete - Irrigação. 3. Redes neurais - Computação. 4. Evapotranspiração. I. Gabriel, Camila Pires Cremasco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE E DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DA CULTURA DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO MODELAGEM NEURO FUZZY”

AUTORA: JÉSSICA MAIARA DE SOUZA FERRARI

ORIENTADORA: CAMILA PIRES CREMASCO GABRIEL

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



Prof.^a Dr.^a CAMILA PIRES CREMASCO GABRIEL
Coordenadora do Curso de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP



Prof. Dr. DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO
Câmpus de Presidente Prudente / Faculdade de Tecnologia- FATEC



Prof. Dr. RAÚL ANDRES MARTINEZ URIBE
Coordenador do Curso de Engenharia de Biossistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP

Botucatu, 30 de julho de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Virgem Maria pela presença todo Santo dia.

Aos meus pais, Rose e Augusto, por todo amor e apoio incondicional, por estarem ao meu lado cada segundo desta caminhada.

Aos meus irmãos Luis e Léo, por todo carinho e torcida.

Aos meus sobrinhos Luís Otávio e Davizinho que nunca deixaram faltar cheirinhos e abraços carinhosos, durante toda caminhada.

As minhas cunhadas Maria e Vivian, por todo incentivo e amor.

A minha orientadora, Prof^a. Camila, por acreditar em mim, por todo apoio e carinho desde o início da orientação.

Ao Prof. Beto por todo apoio e amizade desde o início do mestrado.

Ao meu Prof. Edson Tanaka, que foi o primeiro a acreditar que este sonho seria possível.

A minha amiga Ana Estela, metade da minha alma, parceira de vida e de luta.

Ao Maurício, meu bem, por todo carinho e paciência desde de que o conheci.

Aos meus amigos que Botucatu me deu, e que sempre tornaram meu caminho mais leve, em especial Ricardo, Tati, Rafael, Junior, Regiane, Jhonatan, Pamela e Flavia, agradeço pelos cafés, sorvetes, as longas conversas, conselhos e risadas, que farão de vocês eternos no meu coração.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Não creias impossível o que apenas improvável parece.”

- William Shakespeare

RESUMO

O rabanete é um dos vegetais mais antigos, tendo origem nas regiões mediterrâneas. A irrigação da cultura geralmente é feita com água proveniente de fontes superficiais, muitas vezes com qualidade inferior ao perfil utilizado mais comumente, contendo uma alta concentração de sais dissolvidos. O presente trabalho teve como finalidade, investigar a possibilidade de elaborar modelagens neuro *fuzzy* para estimativa do desenvolvimento e produtividade do rabanete, quando submetido a irrigação com água convencional e tratada magneticamente sob diferentes lâminas de irrigação, baseados na evapotranspiração da cultura (ETc). Os dados utilizados para alimentar o sistema foram provenientes de experimento realizado em ambiente protegido, localizado no Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), Fazenda Experimental Lageado, no município de Botucatu/SP. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado 2x5, com cinco lâminas de irrigação (25%; 50%; 75%, 100% e 125% da ETc), com água em duas condições (magnetizada e convencional) e cinco repetições de plantas. Para isto, o trabalho foi dividido em 4 capítulos, em que utiliza-se o modelo híbrido para estimativa da produtividade e fatores biométricos do rabanete, utilizando dados aferidos 35 dias após transplântio. As variáveis de entrada foram: Lâmina de Irrigação e Característica da Água (convencional ou magnetizada), e as variáveis de saída selecionadas foram: Produtividade e as Análises Biométricas. Os modelos se mostraram satisfatórios, e também possibilitou visualizar resultados nos níveis intermediários, não somente nos que já foram realizados no experimento, formalizando assim uma generalização dos resultados do experimento.

Palavras-chave: Otimização hídrica, *Raphanus sativus* L., redes neurais, ANFIS.

ABSTRACT

The radish is one of the oldest vegetables, originating in the Mediterranean regions. Culture irrigation is usually done with water from surface sources, often of inferior quality to the profile most commonly used, containing a high concentration of dissolved salts. The present work had the purpose of investigating the possibility of elaborating neuro *fuzzy* models to estimate radish development and productivity, when submitted to irrigation with conventional water and magnetically treated under different irrigation slides based on crop evapotranspiration (ET_c). The data used to feed the system came from an experiment carried out in a protected environment, located in the Department of Rural Engineering of UNESP, Faculty of Agronomic Sciences (FCA), Experimental Farm Lageado, in the city of Botucatu / SP. The experimental design was completely randomized 2x5, with five irrigation slides (25%, 50%, 75%, 100% and 125% of ET_c), with water in two conditions (magnetized and conventional) and five replicates of plants. For this, the work was divided in 4 chapters, using the hybrid model to estimate the productivity and biometric factors of the radish, using data verified 35 days after transplanting. The input variables were: Irrigation Blade and Water Characteristic (conventional or magnetized), and the selected output variables were: Productivity and Biometric Analysis. The models were satisfactory, and also allowed to visualize results at intermediate levels, not only those that were already performed in the experiment, formalizing a generalization of the results of the experiment.

Key words: Water optimization, *Raphanus sativus* L., neural networks, ANFIS.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - PRODUTIVIDADE DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM NEURO FUZZY	18
1.1 INTRODUÇÃO	19
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	20
1.2.1 Descrição do experimento.....	20
1.2.2 Análise de regressão quadrática	23
1.2.3 Modelagem matemática nebulosa (<i>fuzzy</i>)	23
1.2.4 Modelagem Neuro fuzzy	24
1.2.5 Etapas da confecção da modelagem.....	26
1.2.6 Índices estatísticos	29
1.2.7 <i>Softwares</i> utilizados.....	30
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
1.5 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS.....	34
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM NEURO FUZZY DA PRODUTIVIDADE DO RABANETE IRRIGADO COM ÁGUA MAGNETIZADA	38
2.1 INTRODUÇÃO	39
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	40
2.2.1 Descrição da área experimental.....	40
2.2.2 Delineamento experimental e coleta.....	41
2.2.3 Tratamento dos dados	43
2.2.4 Modelagens.....	44
2.2.5 Avaliação do desempenho do modelo	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
2.4 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS	53
CAPÍTULO 3 - ESTIMATIVA BIOMÉTRICA DA CULTURA DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM NEURO FUZZY	56
3.1 INTRODUÇÃO	57

3.2	MATERIAL E MÉTODOS	58
3.2.1	Descrição experimental.....	58
3.2.2	Elaboração das modelagens matemáticas.....	61
3.3	RESULTADOS E DISCUSÃO	66
3.4	CONCLUSÃO	74
	REFERENCIAS.....	74
	CAPÍTULO 4 - MODELAGEM NEURO FUZZY DOS FATORES BIOMÉTRICOS DO RABANETE IRRIGADO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE	77
4.1	INTRODUÇÃO.....	78
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	80
4.2.1	Material	80
4.2.2	Modelagem Neuro fuzzy (ANFIS) para obtenção dos dados biométricos do rabanete.....	81
4.2.3	Análise do desempenho do modelo.....	84
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.5	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS.....	96
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
	REFERÊNCIAS.....	101

INTRODUÇÃO GERAL

Devido à crescente preocupação mundial com os recursos hídricos, torna-se imprescindível a busca por métodos econômicos para o uso da água. A disponibilidade hídrica para a agricultura vem se tornando cada vez mais escassa (LÓPEZ-MATA et al., 2010), justifica-se, portanto, a procura por métodos que garantam uma maior eficiência do uso da água na agricultura, elevando a produtividade das culturas dependentes de irrigação. Uma das formas estratégicas de sucesso é o manejo da irrigação (JALOTA et al., 2006; PEREIRA et al., 2009).

Ao ser aplicado um manejo adequado, é possível pontuar a eficiência hídrica e posteriormente tomada de decisão, a fim de atingir teores produtivos ótimos (KARATAS et al., 2009). De acordo com Sandri et al. (2007), informações relacionadas a eficiência e produtividade da água são de extrema importância para análises econômicas e produtivas das culturas, o qual auxilia também na economia da água.

Dentre os recursos naturais, a água é o fator de maior presença nas células vegetais, ocupando entre 80 a 95% do peso, a depender da espécie (KERBAUY, 2013). Fonceca (2009), ressalta que a água está envolvida diretamente ou indiretamente em quase todos os processos fisiológicos das plantas, atuando como: constituinte; solvente; nas estruturas moleculares; reagente; turgescência e como regulador de temperatura dos tecidos da planta.

Muitos estudos vêm sendo feitos, a fim de otimizar o uso da água. Entre eles o uso da água tratada magneticamente nas culturas irrigadas. No entanto, trata-se de um estudo recente, o qual vem mostrando aumento da produtividade das culturas submetidas a esta condição. A estrutura da água tratada magneticamente a deixa mais fina e mais leve, devido a absorção de metais, portanto, ela é capaz de fluir mais facilmente dentro das células vegetais (COSTA, 2012).

Vários estudos vêm sendo feitos para avaliações de produção e desenvolvimentos das culturas irrigadas com água magnetizada. Mohamed & Ebead (2013), avaliaram a produtividade do feijão fava com irrigação convencional e com água magnetizada, e observaram que a irrigação com água magnetizada pode influenciar a dessorção de P e K, adsorvidos do solo pelo complexo coloidal, resultando em maior desenvolvimento e produtividade da planta. Mahmood & Usman (2014) notaram que a irrigação com água magnetizada beneficiou o desenvolvimento

de plântulas de milho. Putti (2014), verificou que a irrigação com água tratada magneticamente beneficiou o desenvolvimento da alface, com uma quantidade de matéria verde igual ou superior, em relação a irrigação convencional e ainda podendo reduzir dias do ciclo da cultura, bem como diminuir também a quantidade de água utilizada.

A cultura do rabanete é dependente de irrigação e geralmente, é feita com água proveniente de fontes superficiais, muitas vezes com uma qualidade inferior, comparadas ao perfil utilizado mais comumente, contendo uma alta concentração de sais dissolvidos (OLIVEIRA et al., 2012). Realidade esta que interfere na produção da cultura.

A cultura apresenta-se sensível a variações de umidade e temperatura no solo durante seu desenvolvimento, comprometendo diretamente na produção e qualidades das suas raízes (COSTA et al. 2006). O rabanete exige altos teores hídricos disponíveis no solo, em torno de 100%, ao decorrer de todo estágio produtivo (PEREIRA et al, 1999). O mesmo autor acrescenta que a falta de água durante o ciclo de desenvolvimento resulta em modificações fisiológicas, morfológicas e bioquímicas da planta. Segundo Filgueira (2003), o excesso de água no solo, causa rachaduras nas raízes do rabanete.

No cenário agrícola, necessita-se buscar e investigar causas e efeitos dos fenômenos agrônômicos. De acordo com Putti (2015), geralmente utilizam-se técnicas estatísticas para explicar melhores resultados, já para estimativas de valores intermediárias fazem o uso de modelos de regressão. O meio científico, matemáticas computacionais, que disponibilizam ajustes mais refinados, uma delas vem ganhando destaque, a lógica nebulosa (*fuzzy*), introduzida por Zadeh (1965).

A lógica *fuzzy*, trata-se de uma ciência baseada no desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, o qual permite uma menor complexidade dos projetos, tornando-a solução de informações de difícil explicação (BENINI & MENEGUETTE JUNIOR, 2009). A lógica *fuzzy* atribui grau de aproximação do valor real, o que a difere da lógica booleana que afere resultados extremos (MALAMAN, 2014). A modelagem *fuzzy*, permite análises de situações complexas, pois considera os fatores exógenos, que interferem diretamente no resultado do modelo, o que a torna diferente dos modelos matemáticos convencionais (PUTTI, 2015).

A modelagem matemática, utilizando o sistema *Mamdani* (fuzzy), vem ganhando espaço em várias áreas da ciência (BARROS & BASSANEZI, 2010). Para explicar fenômenos agronômicos, em específico na agricultura irrigada, vem sendo utilizado esta técnica por alguns pesquisadores Lima et al. (2010); Putti (2015); Giusti & Marsili-Libelli (2015), Viais Neto (2016).

Recentemente foi associado ao sistema nebuloso (lógica *fuzzy*), as redes neurais artificiais (RNA's), cujos processos computacionais são muito semelhantes ao sistema nervoso dos seres humanos, por meio desses neurônios artificiais atribui-se a capacidade de aprendizado com posterior fornecimento de informações (SILVA et al., 2010). A interação destes dois sistemas, resulta no sistema neuro *fuzzy* (sistema híbrido), que visa eficiência na predição, estimativa de parâmetros e capacidade de generalização (SILVA et al., 2014).

Diversas pesquisas, utilizam a metodologia *ANFIS*, tais como Petković et al. (2013), aplicando o sistema neuro *fuzzy* para estimar o valor do coeficiente de potência máximo em turbinas eólicas, Kharb et al. (2014), buscando o ponto em que a potência de sistemas fotovoltaicos é máxima utilizando o sistema *ANFIS*, e Gracioso et al. (2013) pesquisando o grau de tuberculose em animais

Na área agronômica, ainda existem poucos trabalhos utilizando o sistema de inferência *ANFIS*, tais como Naderloo et al. (2012) utilizando do método para determinação do rendimento do trigo irrigado, SILVA et al. (2014) estimando a produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada, Benini (2007) determinando densidade de solos.

Frente ao exposto, o presente trabalho teve por objetivo, investigar a possibilidade de utilizar o sistema híbrido para elaboração de modelos de inferência adaptativo neuro *fuzzy*, para estimar a produtividade e os fatores biométricos do rabanete, submetidos a cinco diferentes lâminas de irrigação, e em duas condições de água (convencional e magnetizada), atribuindo, portanto, valores intermediários através da modelagem *ANFIS*. Para atender os objetivos mencionados, a dissertação foi dividida em 4 capítulos.

CAPÍTULO 1

PRODUTIVIDADE DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM NEURO FUZZY

RESUMO: A cultura do rabanete é considerada uma hortícola muito antiga e tem sua produtividade e qualidade diretamente ligada a disponibilidade hídrica no solo. Desta forma, é importante que se busque métodos que possam explicar a aplicabilidade hídrica e produção do rabanete acompanhada de menor erro possível. Diante disto, o objetivo deste trabalho, foi avaliar a produtividade do rabanete submetido a diferentes lâminas de irrigação utilizando a modelagem neuro *fuzzy*, comparando-a com o modelo nebuloso *fuzzy* e de regressão quadrática. Os dados de entrada dos modelos foram provenientes de um experimento feito nas dependências da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp-Botucatu/SP, em ambiente protegido, onde a cultura foi submetida a 5 lâminas de irrigação com base na evapotranspiração de cultura (ETc). A coleta dos dados foi feita 35 após o transplântio e seguidamente pesadas com balança de precisão, utilizou-se o *software* MATLAB para elaboração das modelagens. A maior produção da cultura foi encontrada em torno de 100% de lâmina de irrigação, foi possível estimar a produção utilizando a modelagem Neuro-fuzzy a mesma apresentou resultados satisfatórios em relação as outras (*fuzzy* e regressão quadrática), obtendo-se ainda menores índices estatísticos.

Palavras-chave: Água, hortícola, sistema híbrido.

ABSTRACT: Radish cultivation is considered a very old horticultural crop and its productivity and quality are directly linked to water availability in the soil. Therefore, it is important to search for methods that may explain the water applicability and production of the radish accompanied by the smallest possible error. Therefore, the objective of this work was to evaluate the productivity of the radish submitted to different irrigation slides using the Neuro *fuzzy* modeling, comparing it with the *fuzzy* and quadratic regression model. The input data of the models came from an experiment conducted at the Unesp-Botucatu School of Agronomic Sciences, in a protected environment, where the crop was submitted to irrigation slides based on crop evapotranspiration (ETc). The data collection was done after transplanting and then weighed with a precision scale, with this, the 3 mathematical models were done, using MATLAB *software*. The highest production of the crop was found around 100% irrigation depth, it was possible to estimate the production using the Neuro *fuzzy* model,

which presented satisfactory results in relation to the others (*fuzzy* and quadratic regression), obtaining even lower indexes statistics.

Key words: Water, horticultural, hybrid system.

1.1 INTRODUÇÃO

A cultura do rabanete (*Raphanus sativus* L.) é uma das plantas mais antigas do mundo. A cultura é caracterizada por ter uma alta sensibilidade a oscilações de disposição hídrica no solo (ALVES et al., 2017). Ao ser cultivada com falta ou excesso de água no solo, pode ser afetada por distúrbios fisiológicos, tendo como consequências a perda de qualidade dos tubérculos e queda na produtividade (FILGUEIRA, 2008; AZEVEDO, 2008).

Para maior sucesso na produção e qualidade das culturas, é de suma importância o controle da disponibilidade hídrica durante os estádios vegetativos. O manejo da irrigação é um dos métodos mais eficientes na maximização da produção agrícola e maior eficiência do uso da água, além de garantir economia e beneficiar os recursos hídricos. O manejo da irrigação torna possível o ajuste momentâneo do suprimento de água da cultura, tornando-o indispensável (VILAS BOAS et. al., 2011).

A necessidade hídrica da cultura do rabanete, igualmente para todas as culturas dependentes de irrigação, não se trata de um trabalho tão simples, pois envolve vários fatores, como condições climáticas do meio de cultivo, estágio produtivo da cultura e balanço hídrico do solo (CARVALHO & OLIVEIRA, 2012). Uma das formas de manejar a irrigação, é baseada na evapotranspiração de cultura (ET_c), que consiste na consideração da evapotranspiração de referencia (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c).

Baseado nesta importância, de quantificar e pontuar o suprimento hídrico nas culturas, a fim de alcançar melhores resultados em relação ao uso e eficiência da água para fins econômicos, de qualidade e produção, algumas técnicas são utilizadas para avaliar estes fatores de causa e efeito. Geralmente, usa-se a regressão polinomial múltipla para explicar os fatores agronômicos avaliados através de experimentos, no entanto, esta técnica estatística, vem introduzida de erros (NELSEN, 2002).

Com intuito de buscar métodos matemáticos que consigam explicar fenômenos agronômicos de causa e efeito, com o mínimo de erros de estimativas possíveis, muitos pesquisadores vêm introduzindo a lógica nebulosa (*fuzzy*), proposta por Zadeh (1965). Na ciência irrigada, o qual vem trazendo resultados satisfatórios, Giusti e

Marsili-Libelli (2015), utilizaram a lógica nebulosa para estudos de irrigação e conservação de água no solo, Putti (2015), utilizou a lógica *fuzzy* para estimativas fatores biométricos do alface irrigado com água magnetizada, Viais Neto (2016), utilizou a técnica para avaliar o desenvolvimento do tomateiro submetidos a diferentes tensões de água no solo e níveis salinidade distintos.

Associado a este sistema *fuzzy*, foi introduzido as redes neurais artificiais, que se trata de um sistema computacional, semelhante ao sistema nervoso do ser humano, atribuído pela capacidade de aprendizado e manutenção do conhecimento (SILVA et al., 2010). A junção destes dois modelos resulta no sistema Neuro *fuzzy* (ANFIS), criado por Takagi-Sugeno (Jang & Sun, 1995), são atribuídos pela capacidade de explicar fenômenos complexos com comportamentos não lineares. Silva et al. (2010), utilizou este sistema para estimativa da produção do trigo em diferentes doses de nitrogênio e encontrou resultados satisfatórios.

Com isto, objetivou-se neste trabalho averiguar a possibilidade da elaboração de um modelo híbrido neuro *fuzzy*, para estimar a produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação, baseados em dados experimentais provenientes de cultivo em ambiente protegido, e compara-lo com a modelagem *fuzzy* e a aproximação pela regressão polinomial quadrática.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

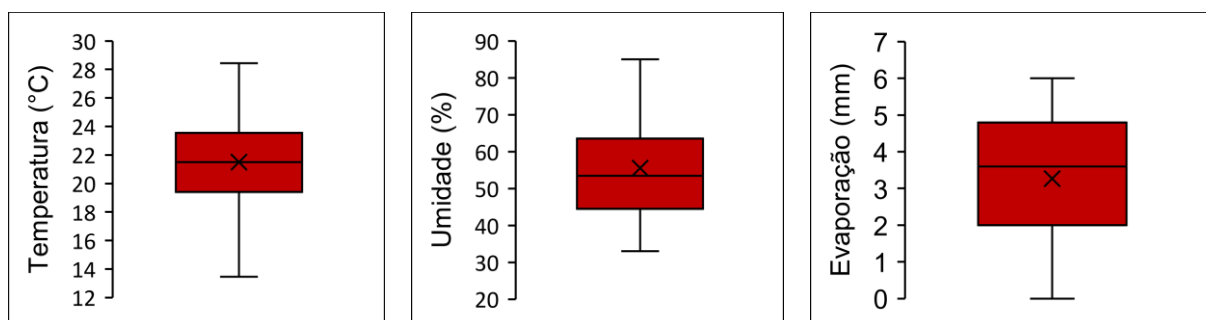
1.2.1 Descrição do experimento

Os dados utilizados para elaboração das modelagens matemáticas, foram provenientes de experimento conduzido por Cremasco et al. (2015), em casa de vegetação situada na área experimental da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP), localizada na cidade de Botucatu/SP a 22°53' S, 48°26' W e altitude de 786 m, entre os meses de setembro e novembro de 2013.

Segundo classificação de Köppen, o clima da região de Botucatu é Cwa, clima tropical de altitude, com intensa chuva no verão, tonando-o quente e úmido, a temperatura média no mês mais quente é de 24°C (CPA, 2018). Escobedo et al. (2011), caracteriza a cidade com clima mesotérmico (temperaturas elevadas), verão quente e umido com precipitação e inverno seco.

Os dados meteorológicos deste experimento, foram monitorados utilizando estação portátil automática, instalada no interior da casa de vegetação, conforme detalhada na Figura 1.

Figura 1. Box plot da temperatura (°C), umidade (%) evaporação (mm), no decorrer do ciclo no interior da casa de vegetação.



O solo da região é caracterizado como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, possuindo estrutura média/argilosa, conforme classificação de Carvalho et al (2000). O solo utilizado para o experimento passou por análises químicas de macro e micronutrientes, os quais seguem detalhados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Análise química do solo: Macronutrientes.

Análise química: Macronutrientes									
V	CTC	SB	Mg	Ca	K	H+Al	PH	M.O.	P(resina)
%	mmolc dm ⁻³						CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³
85	114	67	25	68	4,8	17	5,9	24	191

Fonte: Cremasco et al. (2015).

Tabela 2. Análise química do solo: Micronutrientes

Análise química: Micronutrientes				
Zinco	Cobre	Manganês	Boro	Ferro
mmolc dm ⁻³				
8	4,8	10,10	0,51	20

Fonte: Cremasco et al. (2015).

A avaliação da cultura do rabanete, foi feita utilizando a variedade maçarias nº19. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, os fatores foram as lâminas de irrigação (25%, 50%, 75%, 100% e 125% da Evapotranspiração de Cultura-ETc), com 5 repetições de plantas, a avaliação foi feita 35 dias após o transplante (DAT).

A semeadura da cultura foi a introduzindo diretamente no solo, o espaçamento foi de 25 cm entre linhas e 5 cm entre plantas. As parcelas foram definidas em quatro

linhas de plantio, com 3 metros de comprimento e 1,20 m de largura, totalizando 3,6 m² de cultivo. O desbaste da cultura foi feito 14 dias após semeadura.

O sistema de irrigação empregado foi localizado (gotejamento), através de linhas secundárias provenientes de linha principal que é ligada a bomba, as linhas gotejadoras foram espaçadas a 0,30m sob pressão da bomba de 10 mca com vazão média de 1,47 Lh⁻¹.

A determinação da lâmina de irrigação a ser aplicada, respeitando as lâminas predefinidas, foi por meio de um tanque classe A e um termo-higrômetro, instalados no interior da casa de vegetação, submetidos a medições de evaporação diária, sistematicamente às 8:00h. Seguindo metodologia de Snyder (1992), para obtenção da taxa de evaporação (Kp), dada por:

$$Kp = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 * V + 0,0045 * UR \quad (1)$$

onde:

Kp : coeficiente de tanque;

B: bordadura da área de vegetação em torno do tanque (m);

V: velocidade do vento a 2 m de altura (km dia⁻¹);

UR: média da umidade relativa (%).

O coeficiente de cultura (Kc), foi obtido através do boletim FAO 56 (Allen et al., 1998), em que estipula três coeficientes distintos conforme fase fenológica das culturas, a determinação para a cultura do rabanete: no início do ciclo 0,60, na fase de desenvolvimento vegetativo acelerado 1,15 e no estágio final do ciclo 0,70 a 0,90, neste caso utilizou-se 0,8.

O tempo de irrigação que permite suprir a necessidade hídrica de acordo com cada tratamento descrito anteriormente, foi feita através da equação 2, que considera a evaporação do Tanque classe A (MAROUELLI et al., 2006).

$$Ti = 6.000 * \frac{Kc * Kp * ECA * Sl * Sg * TR}{Ei * Vg} \quad (2)$$

Onde:

Ti: tempo de irrigação;

Kc: coeficiente de cultura;

Kp: coeficiente de tanque;

Eca: evaporação do tanque "Classe A" (mm dia⁻¹);

Sl: espaçamento entre laterais (m);

Sg: espaçamento entre gotejadores (m);

Ei: eficiência de irrigação (%);

Vg: vazão de gotejadores ($L\ h^{-1}$).

A coleta dos dados de produtividade dos tratamentos foi feita no ato da colheita (35 Dias Após Transplante-DAT). A massa fresca (g) dos tratamentos, foram obtidas utilizando uma balança de precisão de $0,0001g^{-1}$.

1.2.2 Análise de regressão quadrática

Uma das modelagens utilizadas para estimativa da produção do rabanete, foi a modelagem matemática de regressão polinomial múltipla ou quadrática, que consiste na explicação de cada variável relacionada ao modelo, em que descrevem a associação entre as variáveis analisadas (RIBEIRO & FREITAS, 2012). Geralmente, esta técnica é utilizada para avaliar e explicar dados relacionados a ciências agrárias, sendo estes dados provenientes de experimentos que podem ter sido feitos em campo ou em laboratório.

Desta forma, elaborou-se um modelo de estiva, utilizando os dados conhecidos, sendo as variáveis independentes pertencentes ao eixo 'x', e estimar as variáveis dependentes 'y' (ZAVALA, 2007), o qual a formula geral pode ser dada por:

$$y = \beta_0 + ax_1 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 \quad (3)$$

Onde:

β_0 : Coeficiente linear;

x_1 : Tratamento (tipo de água);

x_2 : Lâminas de irrigação (mm).

Através da análise de regressão quadrática, foi determinada a produtividade do rabanete (variáveis dependentes), em função da lâmina de irrigação aplicada, sendo esta considerada as variáveis independentes.

1.2.3 Modelagem matemática nebulosa (*fuzzy*)

Foi utilizada também a modelagem matemática nebulosa ou lógica *fuzzy*, para explicar a produtividade do rabanete, submetidos a diferentes lâminas de irrigação (25,50,75,100 e 125% * ETc), cultivados em ambiente protegido, medidos 35 DAT.

Para elaboração do sistema baseado em regras *fuzzy*, determinou-se um processador de entrada (fuzzyficador), um conjunto de base de regras linguísticas, um método de interferência e defuzzyficador (processador de saída), gerando, portanto, um valor real de saída.

As variáveis de entrada deste sistema foi as 5 diferentes lâminas de irrigação, para tanto, foram definidos 3 conjuntos de regras *fuzzy*, sendo estes: baixo, médio e alto. As variáveis selecionadas para a saída, foi a produtividade do rabanete medida 35 DAT. O procedimento para os delimitadores *fuzzy* deste trabalho, são semelhantes ao procedimento adotado por Gabriel Filho (2015), Putti (2015), Viais Neto (2016).

1.2.4 Modelagem Neuro *fuzzy*

O terceiro método utilizado para estimativa da produtividade do rabanete sob diferentes taxas de reposição hídrica, foi o método *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), em que se utiliza duas técnicas na atualização de parâmetros (GHOUSH et al., 2008): o *backpropagation* (gradiente descendente) e o híbrido. O treinamento de aprendizagem do híbrido ANFIS utilizou neste estudo, a combinação de duas técnicas, propostas por Ghoush et al. (2008), sendo elas: aprendizagem dos parâmetros dos antecedentes, utilizando-se o gradiente descendente da rede neural *backpropagation* para refinar o erro; aprendizagem dos parâmetros consequentes, que definem os coeficientes de cada equação de saída, fazendo o uso do método dos mínimos quadrados para identificá-los.

Esta modelagem é utilizada para previsões e aproximações de funções, atuando como sistema de interferência do modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno (JANG & SUN, 1995) de ordem constante (zero) ou ordem linear (um) (TANSCHKEIT; GOMIDE; TEIXEIRA, 2007). Modelagem caracterizada por obter uma única saída, sendo esta a intenção do presente trabalho, a estimativa da produtividade do rabanete em posições intermediárias, as quais não foram mensuradas.

Os sistemas de inferência *fuzzy* definido para esta modelagem *Takagi-Sugeno* (JANG, 1993). No caso da modelagem desta pesquisa, foi fixado um índice (Mg/c) e as regras foram definidas da seguinte forma:

“Se x é ‘A’ então $z = f(x, y)$ ”

Onde:

x e y : variáveis *fuzzy*;

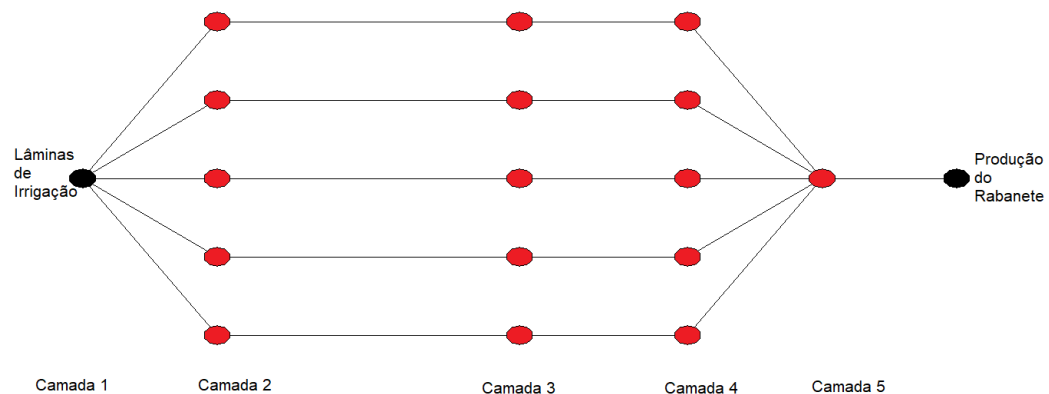
A: conjuntos *fuzzy*;

f : combinação linear das variáveis de entradas.

O sistema de controle *fuzzy* em consideração, contém cinco variáveis de entradas (x), quais foram fracionadas em cinco conjuntos *fuzzy*, correspondentes aos valores de reposição hídrica para cada tratamento, seguindo-se 25%, 50%, 75%, 100% e 125% e consequentemente uma variável de saída (y), sendo ela a produtividade do rabanete (g).

A arquitetura do sistema de interferência ANFIS, para estimativa da produtividade do rabanete em função das diferentes lâminas de irrigação, é composta por 5 camadas (JANG, 1993), conforme Figura 2.

Figura 2. Arquitetura ANFIS com cinco regras para estimativa da produção de rabanete.



Fonte: Autora.

Cada uma destas 5 camadas possui uma finalidade específica dentro do sistema (JANG, 1993), os nós das camadas um e quatro são adaptativos, ou seja, seus valores são fracionados em valores antecedentes e consequentes da regra. Segue abaixo a descrição de cada camada:

Camada 1: é calculado para cada entrada (x), o grau de pertinência das lâminas de irrigação:

$$O_i^j = \mu_i^j(x_i) \quad (4)$$

Onde: $i = 1,2,3,4,5$, significa a função de pertinência gaussiana, durante o treino do modelo e x a entrada do sistema.

Camada 2: o conjunto de nós desta camada não são ajustáveis, e trabalham separadamente, onde cada um deles calcula o grau consequente da regra. Nesta camada os neurônios utilizam o produto T-norma, sendo execução feita através da multiplicação de todos os sinais de entrada e enviados para a saída. Sabendo-se que este modelo possui apenas uma entrada, o produto não foi executado

$$O_j^2 = w_j = \prod_{i=1}^2 \mu_i^j = \mu_1^j x \mu_2^j = \min(\mu_1^j; \mu_2^j), j = 1,2 \quad (5)$$

Camada 3: os nós pertencentes a esta camada não são adaptativos, portanto, cada um deles considera a razão entre o valor de disparo da regra e soma dos valores de todas as regras, a saída desta camada trata-se do preparo para defuzzyficação.

$$O_j^3 = \bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^2 w_i} = \frac{w_j}{w_1 + w_2}; j = 1,2 \quad (6)$$

Camada 4: os nós desta camada, são ajustáveis, sendo que a saída de cada neurônio é calculada de acordo com o valor obtido pela camada três, entre os valores normalizados e o valor consequente da regra. A saída de cada nó é obtida através de:

$$O_j^4 = f_j = \bar{w}_j = (p_j x_1 + q_j x_2 + r_j) \quad (7)$$

Camada 5: esta última é formada por apenas um nó, sendo este não ajustável. Corresponde a saída do sistema, sendo este uma soma parcial de todas as outras saídas ou a defuzzyficação das camadas três e quatro.

$$O_j^5 = f = \sum_{j=1}^2 f_j \quad (8)$$

A modelagem matemática ANFIS, é um método de estimativa baseado na adaptação de regras, o qual usa-se o treinamento dos dados para aprendizagem do sistema, para o ajuste de parâmetros (SILVA et al., 2014).

1.2.5 Etapas da confecção da modelagem

Inicialmente foi feita a organização dos dados para posterior alimentação do sistema *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* e então treinamento dos mesmos. Portanto, para treinamento dos dados, foram utilizados como variáveis de

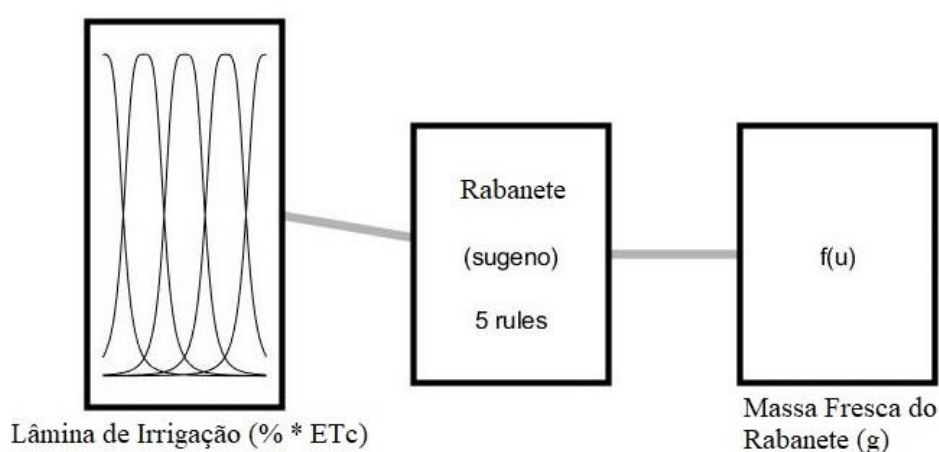
entrada as cinco lâminas de irrigação predefinidas (25%, 50%, 75%, 100% e 125%*ETc), correspondentes a variável 'x' (Tabela 3), e como variável de saída a produtividade específica do rabanete para cada um destes tratamentos, variável 'y'. as variáveis de entrada consideradas para esta modelagem, envolve não só as medias como indicado na tabela abaixo, considera inclusive os valores obtidos nas repetições do experimento, garantindo assim um melhor ajuste do modelo.

Tabela 3. Dados de treinamento da produção do rabanete por lâmina de irrigação.

Lâminas de Irrigação (%)	Massa Fresca do Bulbo (g)
25	21,35
50	13,83
75	25,09
100	31,95
125	14,3

Primeiramente foi feito o carregamento desses dados para o *software*, o qual insere-se os dados de treinamento, dados de teste e dados para checagem, sendo eles elaborados pelo *software*. A Figura 3, representa a estrutura do sistema ANFIS para estimativa da produtividade do rabanete.

Figura 3. Sistema ANFIS para estimativa da produtividade do rabanete em função de diferentes lâminas de irrigação.



Posteriormente informou ao programa número e tipos de funções de pertinência de entrada, para estimativa da produtividade do rabanete em diferentes lâminas de irrigação, que neste caso foi em forma de sino generalizada (gbellmf). Seguidamente

foi feita a determinação das funções de pertinência bem como as variáveis de saída, obtendo-se os parâmetros delimitadores (Tabela 4 e Figura 4), a Tabela 5, ilustra o range (tamanho) das variáveis de entrada e saída.

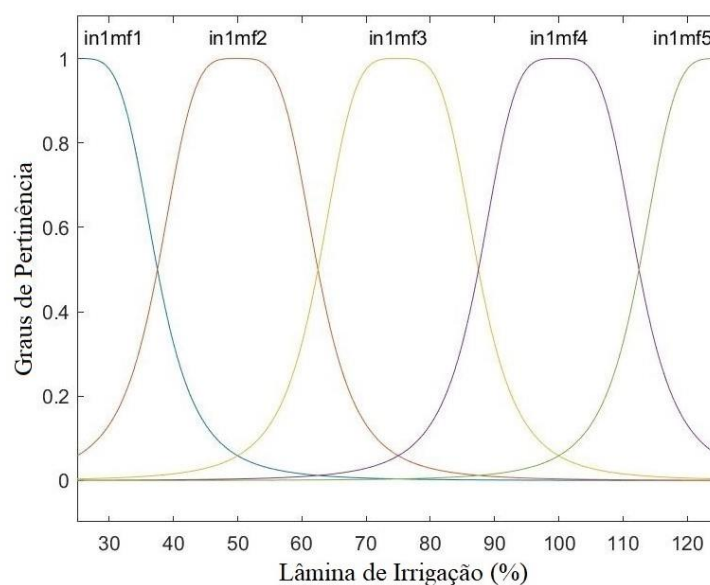
Tabela 4. Parâmetros dos delimitadores das funções de pertinência do tipo gbellmf (forma de sino generalizada) para as variáveis de entrada e linear ($y = ax + b$) para as variáveis de saída.

Função de Pertinência	Entrada	Saída
1	[12,49 2,04 25]	[0,892 0,035]
2	[12,5 1,99 50]	[0,239 0,006]
3	[12,5 2,01 75]	[0,339 0,005]
4	[12,49 2,03 100]	[0,331 0,003]
5	[12,5 2 125]	[0,101 0,001]

Tabela 5. Range (tamanho) das variáveis de entrada e saída.

Entrada	Saída
[25 125]	[6,397 36,646]
[25 125]	[19,084 53,413]

Figura 4. Funções de pertinência para as variáveis de entrada para estimativa da produtividade do rabanete.



Seguido pela escolha do método de treino, no caso método híbrido (rede neural), formado pela combinação dos métodos back-propagation (responsável pelas estimativas dos parâmetros das regras *fuzzy* de entrada) e o dos mínimos quadrados

(responsável pelos valores estimados de saída através das regras *fuzzy*), selecionou-se os critérios de parada do modelo, e por fim iniciado o treinamento das variáveis descritas na Tabela 3.

Outros fatores importantes utilizados, foi a tolerância de erro que foi fixado o mais próximo de zero. Os valores reais versus os valores gerados pelo modelo podem ser observados de duas formas, através da checagem, podendo-se avaliar visualmente o quão próximos estão e por meio de erros gerado pelo *software*.

Comumente a avaliação do modelo neuro-*fuzzy*, é feita com a divisão em dois grupos: 80% dos dados são para o treinamento dos modelos e 20% para validação, isto para pesquisar estimativas futuras de previsões de dados. Neste trabalho, realizou-se treinamento e a checagem com 100% dos dados para atingir os objetivos deste capítulo, já que o mesmo foi estimar a produtividade do rabanete nas lâminas que não foram aferidas experimentalmente.

1.2.6 Índices estatísticos

Para avaliação da performance dos resultados dos valores intermediários estimados da produtividade do rabanete, foi feito o uso de índices estatísticos. Erro do quadrado médio (*RMSE*), Erro absoluto médio (*MAE*), Qui-quadrado (χ^2) e Coeficiente de determinação (r^2), cujas formulas para o cálculo são dadas por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (10)$$

$$\chi_c^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{\hat{y}_k} \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (12)$$

Onde:

y_i e y'_i : vetores desejado e observado;

N: número de pares de entrada-saída do vetor usado no treinamento.

O *RMSE*, calcula a variabilidade das variáveis analisadas, as quais podem ser explicadas através do modelo, este índice pode ser afetado negativamente por grandes resíduos, sabendo-se que na sua mensuração é utilizando o quadrado dos resíduos obtidos no conjunto de dados. Apesar da grande maioria dos dados serem

explicados de forma satisfatória, algumas exceções consideradas no cálculo podem afetar o *RMSE*.

O MAE, possivelmente pode resolver estas incertezas do cálculo do Erro do quadrado médio (*RMSE*), pelo fato de considerar o erro absoluto dos resíduos do conjunto de dados.

O teste do Qui-quadrado, é utilizado para avaliar a frequência, ou seja, se a distribuição de frequência se adequa na distribuição de frequência esperada (LARSON, 2010). Trata-se de um teste não paramétrico, por não depender de média e variância.

E por fim o coeficiente de determinação (R^2), que caracteriza-se em avaliar o ajuste do modelo matemático, ou seja, visualizar a qualidade do modelo e função do quanto foi capaz de explicar os dados.

1.2.7 Softwares utilizados

Para elaboração dos três modelos matemáticos (regressão polinomial quadrática, *fuzzy* e *neuro-fuzzy*), foram utilizadas planilhas eletrônicas do Excel e o *software* MATLAB® 7.0 (MATHWORKS, 1995).

Para determinação de graus de pertinência e treinamento dos dados utilizou-se a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do *software* MATLAB®, o programa possui licença para utilização acadêmica pela Faculdade de Ciências e Engenharia – FCE, campus de Tupã/SP.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante todo o ciclo do cultivo do rabanete, foi necessário um total de 57,1 mm de água, para as taxas de reposição hídrica pré-definidas, Santos et al. (2014), observaram o desenvolvimento e a evapotranspiração do rabanete em diferentes lâminas de irrigação, e encontraram um total de consumo hídrico de 47,68 mm da lâmina de 100% de reposição, esta diferença está relacionada aos fatores climáticos da época de cultivo, já que no presente trabalho foi entre setembro e outubro e o dos pesquisadores citados foi entre os meses de abril e maio, período caracterizado pelo início da incidência pluviométrica. Segundo Hallal et. al. (2013), existe relação inversamente proporcional entre precipitação evapotranspiração.

De maneira geral, a maior produtividade do rabanete foi obtida quando o mesmo foi submetido a lâminas de irrigação entre 75 e 100% da ET_c , entretanto, a

produtividade foi menor de 25 a 50% de reposição hídrica (Tabela 6), comportamento semelhante encontrado no estudo feito por Santos et al. (2014), que obteve menor produção na lâmina de 25% de irrigação.

Tabela 6. Produtividade média do rabanete em função das diferentes lâminas de irrigação.

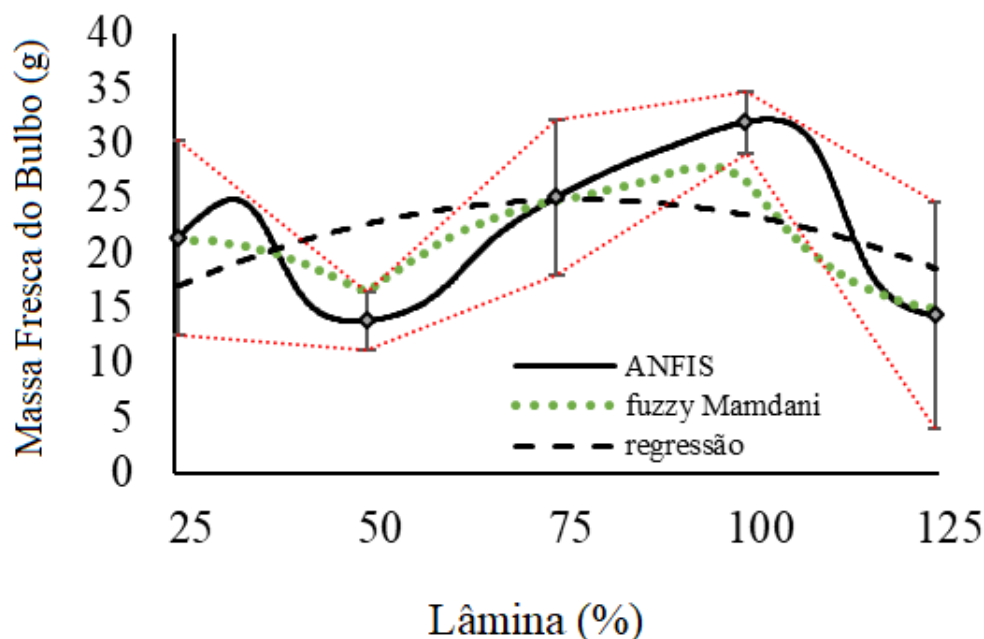
Lâminas de Irrigação (%)	Massa Fresca do Bulbo (g)
25	21,35
50	13,83
75	25,09
100	31,95
125	14,3

A importância da quantidade hídrica é de suma importância para o desenvolvimento das plantas em todas os estádios fenológicos. Lancher (2000), submeteu o rabanete a estresse hídrico e avaliou o desenvolvimento e produção em todos os estádios fenológicos, e notou que a vitalidade do rabanete é afetada pelo estresse hídrico, e quanto maior for a duração do estresse menor a sua vitalidade.

A cultura apresenta sensibilidade quanto ao excesso ou a falta de água durante o seu ciclo, afetando-o de forma negativa, em relação a queda de produtividade e danos físicos, o que resulta, em prejuízos econômicos (SILVA et al., 2012); SHAFIQ, 2015). O rabanete apresenta maior produtividade quando submetido a reposição hídrica igual ou próxima de 100% (LACERDA et al., 2017).

Para melhor visualização destas variáveis, relacionadas a produção do rabanete e posterior estimativa de valores intermediários (a produção não medidas experimentalmente), utilizou-se 3 diferentes modelagens matemáticas, para serem comparadas e avaliar qual se aproximou do valor real, estas estão apresentadas na Figura 5.

Figura 5. Modelagem matemática de treinamento da produção de rabanete no ANFIS em função do percentual de reposição hídrica.



Fonte: Autora.

Por meio da Figura 5, é possível verificar as 3 curvas representativas das modelagens matemáticas: de regressão polinomial, modelagem *fuzzy*, e modelagem neuro-*fuzzy* (ANFIS), representadas em linha preta tracejada, linha verde tracejada e linha preta contínua, respectivamente. A linha vermelha tracejada envolvendo as 3 curvas, representa o desvio padrão dos dados e o ponto cinza no interior delas representa a média de cada tratamento.

A linha preta tracejada (regressão quadrática), é utilizada mais comumente no campo das ciências agrárias. Alguns pesquisadores utilizaram este método para representar produtividade de hortícolas submetidas a diferentes taxas de reposição hídrica (KOETZ et al, 2008; SILVA et al., 2013; SANTOS et al., 2014). Porém, este método traz alguns erros de estimativas, sendo possível observa-los na Figura 5.

A curva que representa a regressão quadrática, passa somente com exatidão na média da lâmina de 75% de lâmina de irrigação, visto que superestima a produção na reposição de água nas lâminas de 40 a 70% e subestima a produtividade entre 75 e 100%, e volta a superestimar a produção em torno do índice de reposição de 125%,

o maior erro considerado utilizando este método é em torno da lâmina de 50%, observando-se que a linha passa acima do desvio padrão dos dados.

A curva obtida pela lógica *fuzzy* (linha tracejada verde), obteve o comportamento mais satisfatório em relação a curva de regressão, como método de estimativa da produção do rabanete em função das lâminas irrigada, visto que, a lógica *fuzzy* conseguiu estimar com mais precisão, ou seja, passou o mais próximo possível dos valores medidos, porém, ao tentar estimar a produção na lâmina de 100% a mesma subestimou, obtendo-se valor mais baixo do que o mínimo encontrado no tratamento, passando ainda abaixo da linha representante do desvio padrão.

A lógica *fuzzy* é considerada um método refinado, o qual alguns pesquisadores já o vem introduzindo dentro do campo agrônomo, em especial no âmbito da irrigação, para explicar fenômenos de causa e efeito, estes conseguiram resultados satisfatórios. Viais Netto (2016), avaliou o desenvolvimento do tomate em função da irrigação e salinidade, Putti (2015) estudou o desenvolvimento da alface utilizando água magnetizada, ambos obtiveram resultados parecidos a este estudo, no qual a lógica *fuzzy*, estimou de forma mais eficiente em relação a regressão quadrática.

A terceira curva elaborada foi a ANFIS (neuro-*fuzzy*), representada pela linha preta contínua, visivelmente nota-se que foi o modelo que melhor se ajustou ao redor dos pontos aferidos, ou seja, a curva que apresentou mais eficiência em relação a estimativa da produtividade do rabanete em função da lâmina de irrigação.

A curva que representa este modelo passou exatamente sobre todos os pontos medidos de produtividade (25, 50, 75, 100 e 125%*ETc), visto que também em nenhum deles saiu fora dos da linha que representa o desvio padrão. Isto se dá pelo fato de que a elaboração da modelagem se considera todos os pontos medidos (cada tratamento), inclusive suas respectivas repetições, além disso utiliza-se plataformas em que faz o treinamento dos dados, os quais procura o melhor ajuste possível, justificando o fato de ser mais eficiente em relação aos outros modelos. Silva et al. (2014), também encontrou resultados satisfatórios ao utilizar o sistema neuro *fuzzy* para estimar a produção do trigo a diferentes doses adubação nitrogenada.

Após obtenção das curvas, realizou-se o cálculo dos índices estatísticos (Qui-quadrado (X^2), Coeficiente de determinação (R^2), Erro do Quadrado Médio (RMSE) e Erro Absoluto Médio (MAE) o quais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Índices estatísticos dos modelos: Regressão quadrática, Modelagem fuzzy e modelagem ANFIS da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.

Índices	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo ANFIS	Regressão polinomial $y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
χ^2	67,489 (p=0)	57,277 (p=0,0002)	125,262 (p=0)
R^2	0,504 (p=0,0001)	0,537 (p=0)	0,104 (p=0,116)
RMSE	6,898	6,332	8,808
MAE	5,943	5,135	7,831

Os índices estatísticos de maneira geral apresentaram-se mais satisfatórios na modelagem neuro *fuzzy*, que em todos os índices foram mais baixos nesta modelagem, representando menor erro nas estimativas da produtividade do rabanete.

1.5 CONCLUSÃO

A maior produtividade do rabanete foi encontrada nas lâminas de irrigação próximas das lâminas de 100% de reposição hídrica.

O estudo mostre-se favorável a elaboração de modelagem ANFIS, para estimativa da produtividade do rabanete, cultivado sob diferentes lâminas de irrigação, em ambiente protegido.

O modelo ANFIS, apresentou valores menores nos índices estatísticos avaliados, em relação aos modelos lógica *fuzzy* e regressão quadrática, mostrando-se satisfatório e de maior confiabilidade de estimativas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p
- ALVES, E.S.; 1; LIMA, D.F.; BARRETO, J.A.S.; SANTOS, D.P.; SANTOS, M.A.L. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. Irriga, v. 22, n. 1, p. 194-203, 2017.
- AZEVEDO, L. P. Uso de dois espaçamentos entre gotejadores na mesma linha lateral e seus efeitos sobre a formação do bulbo molhado, produtividade e qualidade de rabanete (*Raphanus sativus* L). 2008, 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.
- CARVALHO, D. F de; OLIVEIRA, L. F. C de. Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada. Viçosa, MG: UFV. 2012. 68p.

CARVALHO, W. A., ESPÍNDOLA, C. R., PACCOLA, A. A. Legenda atualizada do Levantamento de Solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médice” Boletim CI. FCA/UNESP, Botucatu, n.1, 1983. 95 p. Legenda Complementar Atualizada, 2000.

CREMASCO, C. P.; Gabriel Filho, L. R. A. ; PUTTI, F. F. ; LUDWIG, R. ; SILVA JUNIOR, J.F. . Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), São Pedro-SP. v. 54. p. 1-9, 2015.

ESCOBEDO, J.F., GOMES, E.N., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J. RATIOS of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renew. Energy* 36, 169–178, 2011.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa, MG: UFV, 2008. 421p.

GABRIEL FILHO, L. R. A. *Sistemas Fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias*. 2015. 258p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional) - FCE/UNESP, Tupã, 2015.

GHOUSH, M. A.; SAMHOURI, M.; AL-HOLY, M.; HERALD, T. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 84, n. 2, p.348-357, 2008.

GIUSTI, E.; MARSILI-LIBELLI, S. A *Fuzzy Decision Support System* for irrigation and water conservation in agriculture. *Environmental Modelling & Software*, v. 63, p. 73-86, 2015.

HALLAL, M. O. C.; SCHÖFFEL, E. R; BRIXNER, G. F.; RADÜNZ, A. L. Estimativa da evapotranspiração de referência e sua relação com a precipitação ocorrida na região de Pelotas – RS. *Irriga*, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 85-98, 2013.

JANG, J. S. R.; SUN C. T. Neuro fuzzy modeling and control. *Proceeding of IEEE*, v.83, p.378-406, 1995.

JANG, J-R.R. Adaptive-network based fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v.23, n.3:665-685, 1993.

KOETZ, M., MASCA, M.G.C.C., CARNEIRO, L.C., RAGAGNIN, V.A., SENA JUNIOR5; GOMES FILHO, R.R. Produção de tomate industrial sob irrigação por gotejamento no sudoeste de goiás. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*. v.2, n.1, p.09–15, 2008.

LACERDA, V. R., GONÇALVES, B. G., OLIVEIRA, F. G., SOUSA, Y. B., CASTRO, I. L., Características Morfológicas E Produtivas Do Rabanete Sob Diferentes Lâminas De Irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.11, nº.1, p. 1127 - 1134, 2017.

LANCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima, 2000. p. 519.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação por gotejamento do tomateiro industrial durante o estágio de frutificação, na região do cerrado. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 342-346, 2006.

MATWORKS The student edition of MatLab: version 4 user's guide. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 834 p.

NELSEN, T. C. The state of statistics in agricultural science. *Journal of agricultural, biological, and environmental statistics*, v.7, n. 3, p. 313-319, 2002.

PUTTI, F. F. Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2015.

RIBEIRO, A. C. S.; FREITAS, A. L. P. Análise de regressão múltipla para identificação de fatores relevantes na qualidade do transporte rodoviário intermunicipal de passageiros. *Caderno do IME- Série Estatística*, v. 32, p.15-31, 2012.

SANTOS, J. C. C.; SILVA, C. H.; SANTOS, C. S.; SILVA, C. S.; MELO, E. B.; BARROS, A. C. Análise de crescimento e evapotranspiração da cultura do rabanete submetido a diferentes lâminas de água. *Revista Verde*, Mossoró, v. 9, n.1, p. 151 - 156, 2014.

SHAFIQ, S AKRAM, N. A., ASHRAF. M. Does exogenously-applied trehalose alter oxidative defense system in the edible part of radish (*Raphanus sativus* L.) under water-deficit conditions. *Scientia Horticulturae*. V.185 p. 68–75, 2015.

SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; FILHO, M.C. M.T.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180–187, 2014.

SILVA, I. N.; SPATTI, S. H.; FLAUZINO R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 2010. 399p.

SILVA, J.M., FERREIRA, R.S., MELO, A.S., SUASSUNA1, J.F., DUTRA, A.F., GOMES, J.P. Cultivo do tomateiro em ambiente protegido sob diferentes taxas de reposição da evapotranspiração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.17, n.1, p.40–46, 2013.

SILVA, R. T. da.; SOUZA, A. A. T.; OLIVEIRA, F. de A. de.; TARGINO, I. S. de O.; SILVA, M. L. do N. Tolerância do rabanete ao encharcamento do solo. *Revista Verde*, Mossoró, v. 7, n.1, p. 25-33, jan./mar. 2012.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *Journal of Irrigation and Drainage. Engineering of ASCE*, v.118, n.6, p.977-980, 1992.

TANSCHKEIT, R.; GOMIDE, F.; TEIXEIRA, M. C. M. Modelagem e controle nebuloso. In: AGUIRRE, L. A. (Ed.) Enciclopédia de automática. São Paulo: Edgard Blucher, v. 3, p. 283-324, 2007.

VIAIS NETO, D. S. Modelagem *fuzzy* para avaliação do desenvolvimento do tomate em tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2016.

VILAS BOAS, R. C.; PEREIRA, G. M.; SOUZA, R. J. DE; CONSONI, R. Desempenho de cultivares de cebola em função do manejo da irrigação por gotejamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.15, p.117-124, 2011.

ZADEH L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v.8, p.338- 353, 1965.

ZAVALA, A. A. Z.; BOLFARINE, H.; DE CASTRO, M. Consistent estimation and testing in heteroscedastic polynomial errors-in-variables models. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, v. 59, n. 3, p. 515-530, 2007.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM NEURO *FUZZY* DA PRODUTIVIDADE DO RABANETE IRRIGADO COM ÁGUA MAGNETIZADA

RESUMO: A cultura do rabanete tem origem das regiões mediterrâneas, é um dos vegetais mais antigos, por isto é classificada como uma planta robusta. Apesar da sua rusticidade, a mesma se mostra muito sensível a varrições hídricas, garantindo maior produção quando lhe é oferecido reposição hídrica plena ou em torno de 100%. Atualmente o mundo se preocupa com os recursos hídricos e, desta forma, se faz necessário métodos alternativos em que se busque o uso da água com economia e eficiência, em relação as necessidades das plantas. Desta forma, objetivou-se neste trabalho estimar a produção do rabanete utilizando modelagem neuro *fuzzy*, onde a cultura foi submetida a cinco lâminas de irrigação distintas em dois tratamentos diferentes, sendo utilizado irrigação com água convencional e água tratada magneticamente. O modelo confeccionado se mostrou satisfatório e preciso, podendo, no entanto, estimar a produtividade do rabanete em função da lâmina de irrigação em pontos intermediários, ou seja, locais onde não foi aferido experimentalmente.

Palavras-Chave: Produtividade; lógica nebulosa, redes neurais, otimização hídrica.

ABSTRACT: The radish culture originates from the Mediterranean regions, it is one of the oldest vegetables, therefore it is classified as a robust plant. Despite its rusticity, it is very sensitive to water variations, guaranteeing greater production when it is offered full water replacement or around 100%. Nowadays, the world is concerned with water resources and, in this way, it is necessary to have alternative methods in which water is used economically and efficiently, in relation to plant needs. The objective of this work was to estimate the production of radish using neuro *fuzzy* modeling, where the culture was submitted to five different irrigation slides in two different treatments, using irrigation with conventional water and the other using magnetically treated water. The prepared model was satisfactory and accurate, but it was possible to estimate the productivity of the radish as a function of irrigation depth in intermediate points, that is, where it was not possible to measure.

Keywords: Productivity; nebulous logic, neural networks, water optimization.

2.1 INTRODUÇÃO

O rabanete (*Raphanus Sativus L.*), é uma cultura proveniente de regiões mediterrâneas, pertencente à família das Brassicaceae. Suas raízes comestíveis, são avermelhadas, circulares e de sabor levemente picante. Contem características medicinais, capazes de ajudar na digestão alimentar, podendo também atuar como expectorante natural, a cultura é rica em vitaminas e tem alta quantidade de fibras alimentares, é ainda considerada um alimento de baixo teor calórico (CAMARGO et al., 2007; MELLO et al., 2013).

O cultivo do rabanete vem ganhando espaço, por se tratar de uma cultura de ciclo curto (25 a 35 dias), por ser considerada uma planta rustica (FILGUEIRA, 2008). No Brasil a produção do rabanete ainda é pouco expressiva (PULITI et al., 2009). O cultivo advém mais comumente de olericultores de pequeno e médio porte, geralmente próximos ou em centros urbanos (OLIVEIRA et al., 2010).

A parte comercializada do rabanete fica penetrada no solo, portanto, as condições hídricas do mesmo, estão ligadas diretamente com a produtividade da cultura (SILVA et al., 2012). De acordo com a literatura, a cultura é de muita sensibilidade a condições hídricas, a saturação do solo lhe oferece rachaduras e quebra de qualidade das raízes (FILGUEIRA, 2003), e a falta de água no solo compromete a fisiologia, morfologia e a parte bioquímica da planta (PEREIRA et al., 1999).

A água está envolvida em quase todos os fatores fisiológico das plantas (MORENO-FONCECA, 2009). Por isto, a falta de água no solo influencia diretamente na produção das plantas, podendo ser piorado devido a fatores climáticos (ALISHAH & AHMADIKHAH, 2009). Quando há algum tipo de estresse hídrico durante o processo desenvolvimento das plantas, as mesmas são capazes de desenvolver mecanismos de defesa, que prejudicam a planta desde a parte aérea até as raízes, por meio de processos fisiológicos e bioquímicos (TAIZ & ZEIGER, 2009). Por isto se faz importante a busca por métodos eficientes para o uso da água a fim de se alcançar maior produção e economia da água.

A avaliação da produção obtida nos experimentos feitos na área agrônômica, sendo eles coletados em campo ou em laboratório, geralmente são analisados utilizando estatística básica e teste de Tukey com probabilidade de 5%, extrapolados em gráficos de regressão polinomial de ordem 2, no entanto, este método não oferece

muita precisão, pois a estimativa é pouco ajustada e os valores são em torno da média.

Atualmente novas técnicas como redes neurais artificiais vem sendo utilizadas como modelos de estimativa e previsão de parâmetros complexos. Esta metodologia vem ganhando espaço em diversas áreas da ciência, pois são muito eficientes nas análises de um conjunto de dados com incertezas, sendo, portanto, utilizadas como métodos estatísticos alternativos (YILMAZ & KAYNAR, 2011).

O sistema *fuzzy* proposto por Zadeh (1965), trata-se de sistemas capaz de executar de forma precisa informações complexas, por meio de base de regras criadas por um especialista para obter resultados desejados.

A junção das redes neurais artificiais e o sistema *fuzzy*, resulta no sistema híbrido (neuro fuzzy), o qual intenciona alcançar um sistema mais preciso, na previsão, na aprendizagem de máquina, na estimativa de dados e por fim na generalização, resultando em um modelo matemático o mais parecido possível com dados reais.

Frente ao exposto, o objetivo deste trabalho foi elaborar modelo matemático utilizando o sistema de interferência neuro *fuzzy*, para estimar a produtividade do rabanete (massa fresca do bulbo), em diferentes lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100 e 125%), usando de água magnetizada (AM) e água convencional (AC).

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Descrição da área experimental

Para a realização deste trabalho utilizaram-se dados experimentais do mês de setembro de 2013, provenientes de estudo feito por Cremasco et al. (2015) no Departamento de Engenharia Rural da UNESP, Faculdade Ciências Agronômicas, Fazenda Experimental Lageado, Botucatu – SP, geograficamente localizada em: latitude 22°53' S, longitude 48°26'W e 786m de altitude.

Segundo classificação de Köppen, o clima da região de Botucatu é Cwa, clima tropical de altitude, com intensa chuva no verão quente e úmido, a temperatura média no mês mais quente é de 24°C (CPA, 2018). Escobedo et al., 2011, caracterizam a cidade com clima mesotérmico (temperaturas elevadas), verão quente e umido com precipitação e inverno seco.

O ambiente do experimento foi uma casa de vegetação, onde foram medidos os parâmetros climáticos utilizando uma estação meteorológica automática, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros climáticos no decorrer dos ciclos.

	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa (%)
Mínimo	14 ± 3.19	32.02 ± 17.30
Máximo	28.98 ± 4.90	79.14 ± 11.33
Média	21.49 ± 3.02	55.5 ± 13.09

Fonte: Cremasco et al. (2015).

O solo utilizado foi Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, possuindo estrutura média/argilosa, conforme classificação de Carvalho et al (2000). O solo utilizado passou por análises químicas de macro e micronutrientes, os quais seguem detalhados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Análise química do solo: Macronutrientes.

Análise química: Macronutrientes									
V	CTC	SB	Mg	Ca	K	H+Al	PH	M.O.	P(resina)
%	mmolc dm ⁻³						CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³
85	114	67	25	68	4,8	17	5,9	24	191

Fonte: Cremasco et al. (2015).

Tabela 3. Análise química do solo: Micronutrientes

Análise química: Micronutrientes				
Zinco	Cobre	Manganês	Boro	Ferro
mmolc dm ⁻³				
8	4,8	10,10	0,51	20

Fonte: Cremasco et al. (2015).

As correções químicas foram feitas de acordo com as recomendações preconizadas pelo boletim 100 para o estado de São Paulo.

2.2.2 Delineamento experimental e coleta

A avaliação da cultura do rabanete, foi feita utilizando a variedade maçarias nº19. A semeadura da cultura, foi realizada entre os meses de setembro e outubro de

2013, a cultura foi introduzindo diretamente no solo com espaçamento foi de 25 cm entre linhas e 5 cm entre plantas. As parcelas foram definidas em quatro linhas de plantio, com 3 metros de comprimento e 1,20m de largura, totalizando 3,6 m² de cultivo. O desbaste da cultura foi feito 14 dias após semeadura.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado 2x5, com cinco repetições de plantas. Os tratamentos foram constituídos por cinco taxas de reposição hídrica de acordo com a evapotranspiração de cultura (ET_c), sendo elas 25%, 50%, 75%, 100% e 125% * ET_c, irrigadas com dois tipos de água: convencional e tratada magneticamente. Durante todo o ciclo foi utilizado um total de 114,2 mm de água.

A magnetização da água foi feita através de um equipamento chamado *Sylocimol Rural*, da empresa Timol. O magnetizador é composto por ímãs revestido de inox, que ao entrar em contato com água submete a mesma em um campo magnético de 3860 *gauss*, mudando a polaridade 60 vezes por segundo, quebrando as partículas da água, através do fluxo ionizante de elétrons, o tempo para magnetização de 1000 litros de água utilizando este aparelho é de 20 minutos.

Utilizou-se o sistema de irrigação localizada (gotejamento), em que dissipa água diretamente na raiz da planta, através de linhas secundarias provenientes de linha principal que é ligada a bomba, as linhas gotejadoras foram espaçadas a 0,30m sob pressão da bomba de 10 mca com vazão média de 1,47 Lh⁻¹. Os dois tratamentos (água convencional e magnetizada) foram implantados independentemente.

A determinação da lâmina de irrigação a ser aplicada, respeitando as lâminas predefinidas, foi por meio de um tanque classe A e um termo-higrômetro, instalados no interior da casa de vegetação, submetidos a medições de evaporação diária, sistematicamente às 8:00 horas, seguindo metodologia de Snyder (1992), para obtenção da taxa de evaporação (K_p), por meio da Equação 1.

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 * V + 0,0045 * UR \quad (1)$$

onde:

K_p : coeficiente de tanque;

B: bordadura da área de vegetação em torno do tanque (m);

V: velocidade do vento a 2 m de altura (km dia⁻¹);

UR: média da umidade relativa (%).

O coeficiente de cultura (K_c), foi obtido através do boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998), em que estipula três coeficientes distintos conforme fase fenológica das

culturas, a determinação para a cultura do rabanete: no início do ciclo 0,60, na fase de desenvolvimento vegetativo acelerado 1,15 e no estágio final do ciclo 0,70 a 0,90, neste caso utilizou-se 0,8.

O tempo de irrigação que permite suprir a necessidade hídrica de acordo com cada tratamento descrito anteriormente, foi feita através da equação 2, que considera a evaporação do Tanque classe A (MAROUELLI et al., 2006).

$$Ti = 6.000 * \frac{Kc * Kp * ECA * Sl * Sg * TR}{Ei * Vg} \quad (2)$$

Onde: Ti: tempo de irrigação; Kc: coeficiente de cultura; Kp: coeficiente de tanque; Eca: evaporação do tanque “Classe A” (mm dia-1); Sl: espaçamento entre laterais (m); Sg: espaçamento entre gotejadores (m); Ei: eficiência de irrigação (%); Vg: vazão de gotejadores (L h-1).

A coleta dos dados de produtividade dos tratamentos foi feita no ato da colheita (35 Dias Após Transplante – DAT), para ambos tratamentos. Os bulbos verdes foram pesados, utilizando uma balança de precisão de 0,0001g.

2.2.3 Tratamento dos dados

Inicialmente foi feita a organização dos dados para posterior alimentação do sistema *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* e então treinamento dos mesmos. Portanto, para treinamento dos dados, foram utilizados como variáveis de entrada as cinco lâminas de irrigação predefinidas (25%, 50%, 75%, 100% e 125%*ETc), correspondentes a variável ‘x’ (Tabela 4), e como variável de saída a produtividade específica do rabanete para cada um destes tratamentos, variável ‘y’. Os modelos foram rodados separadamente, água magnetizada (AM) e convencional (AC). A modelagem da produtividade do rabanete irrigado com AC, refere-se ao conjunto de dados apresentados no primeiro capítulo deste trabalho, a fim de realizar a comparação da produtividade e das modelagens, com diferentes tipos de água.

Tabela 4. Média dos dados de treinamento da produção de rabanete por lâmina.

Lâmina de Irrigação (%)	Massa Fresca do Bulbo (g)	
	AC	AM
25	21.35	27.10
50	13.83	29.27
75	25.09	33.41
100	31.95	37.24
125	14.30	39.31

2.2.4 Modelagens

Os dados coletados por Cremasco et al. (2015), foram analisados em três diferentes tipos de ajustes, sendo eles: regressão quadrática polinomial, lógica *fuzzy* (método Mandani) e *neuro-fuzzy*, para elaboração de todas utilizou-se o *software* MATLAB®7.0, o procedimento realizado para execução das mesmas, foi descrito no primeiro capítulo deste trabalho, sendo que para este caso elaborou-se a modelagens para a produtividade do rabanete irrigado com água magnetizada.

Para elaboração do processador *fuzzy* foi utilizado o sistema *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)* pertencente ao *Fuzzy Logic Toolbox* do *software* MATLAB® 7.0 (MATHWORKS, 1995), o qual advém implementação da metodologia proposta por Jang (1993).

Inicialmente foi feito o carregamento desses dados para o *software* MATLAB®7.0 (MATHWORKS, 1995). Posteriormente informou ao programa número e tipos de funções de pertinência de entrada e saída. Seguido pela escolha do método de treino, no caso método híbrido (rede neural), formado pela combinação dos métodos back-propagation (responsável pelas estimativas dos parâmetros das regras *fuzzy* de entrada) e o dos mínimos quadrados (responsável pelos valores estimados de saída através das regras *fuzzy*), e então selecionou-se os critérios de parada do modelo, e por fim iniciado o treinamento das variáveis descritas nas Tabela 4.

Seguidamente foi informado ao *software* o número e tipos de funções de pertinência de entrada, para estimativa da produtividade do rabanete em diferentes lâminas de irrigação, irrigado com AC e AM, que neste caso foi em forma de sino generalizada (gbellmf), para ambas. Posteriormente foi feita a determinação das funções de pertinência bem como as variáveis de saída, obtendo-se o range (tamanho), na Tabela 5, e os parâmetros delimitadores (Tabela 6), ambas das variáveis de entrada e saída.

Tabela 5. Range (tamanho) das variáveis de entrada e saída.

Condição da água	Entrada	Saída
AC	[25 125]	[6,397 36,646]
AM	[25 125]	[19,084 53,413]

Tabela 6. Parâmetros dos delimitadores das funções de pertinência do tipo gbellmf (forma de sino generalizada) para as variáveis de entrada e linear ($y = ax + b$) para as variáveis de saída.

Condição da água	Função de Pertinência	Entrada	Saída
AC	1	[12,49 2,04 25]	[0,892 0,035]
	2	[12,5 1,99 50]	[0,239 0,006]
	3	[12,5 2,01 75]	[0,339 0,005]
	4	[12,49 2,03 100]	[0,331 0,003]
	5	[12,5 2 125]	[0,101 0,001]
AM	1	[12,5 2,01 25]	[1,116 0,044]
	2	[12,5 2,01 50]	[0,564 0,012]
	3	[12,5 1,99 75]	[0,441 0,006]
	4	[12,5 1,99 100]	[0,371 0,004]
	5	[12,5 2 125]	[0,31 0,003]

Comumente a avaliação do modelo neuro *fuzzy*, é feita com a divisão em dois grupos: 80% dos dados foram para o treinamento dos modelos e 20%, isto permite ao pesquisar estimativas futuras, de previsões de dados. Neste trabalho, realizou-se treinamento e a checagem com 100% dos dados para atingir os objetivos deste capítulo, já que o mesmo foi disponibilizar a produção do rabanete nas lâminas não estudadas.

O método ANFIS utiliza de duas técnicas na atualização de parâmetros (GHOUSH et al., 2008): o *backpropagation* (gradiente descendente) e o híbrido. O treinamento de aprendizagem do híbrido ANFIS utilizou neste estudo, a combinação de duas técnicas, propostas por Ghoush et al. (2008), sendo elas: aprendizagem dos parâmetros dos antecedentes, utilizando-se o gradiente descendente da rede neural *backpropagation* para refinar o erro; aprendizagem dos parâmetros consequentes, que definem os coeficientes de cada equação de saída, usando o método dos mínimos quadrados para identificá-los.

Esta modelagem é utilizada para previsões e aproximações de funções, atuando como sistema de interferência do modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno (Jang & Sun, 1995) de ordem constante (zero) ou ordem linear (um) (Tanscheit; Gomide; Teixeira, 2007). Modelagem caracterizada por obter uma única saída, sendo esta a intenção do presente trabalho, a estimativa da produção do rabanete em posições intermediárias.

Os sistemas de inferência *fuzzy* proporcionam diferentes arquiteturas para o modelo ANFIS. Assim, o sistema construído foi do tipo *Takagi-Sugeno* (JANG, 1993), sendo definido por um conjunto de regras da forma:

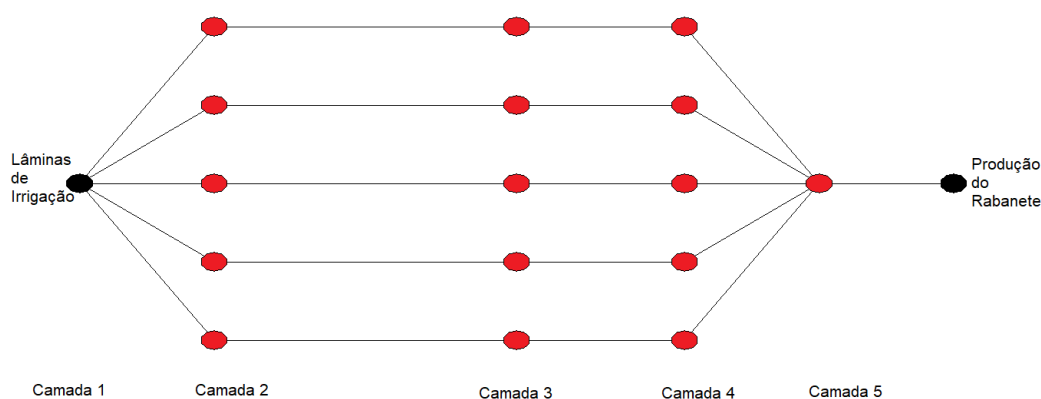
$$\text{“se } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B, \text{ então } z = f(x,y)\text{”}$$

Onde: x e y são variáveis *fuzzy*; A e B são conjuntos *fuzzy*; f é uma combinação linear das variáveis de entradas.

O sistema de controle *fuzzy* em consideração, contém cinco variáveis de entradas (x) quais foram fracionadas em cinco conjuntos *fuzzy*, correspondentes aos valores de reposição hídrica para cada tratamento, seguindo-se 25%, 50%, 75%, 100% e 125% e conseqüentemente uma variável de saída (y), sendo ela a produtividade do rabanete (g), sendo que este procedimento foi feito duas vezes, um para dados utilizando irrigação com AC e o outros utilizando AM.

A arquitetura do sistema de interferência ANFIS, para estimativa da produtividade do rabanete em função das diferentes lâminas de irrigação, é composta por 5 camadas (JANG, 1993), conforme Figura 1.

Figura 1. Arquitetura ANFIS com cinco regras para estimativa da produção de rabanete.



Fonte: Autora.

Esta arquitetura composta por cinco camadas para estimar a produção do rabanete em função da reposição hídrica, tem finalidade específica dentro do sistema para cada uma delas (JANG, 1993), os nós das camadas um e quatro são adaptativos, ou seja, seus valores são fracionados em valores antecedentes e consequentes da regra, respectivamente.

A modelagem matemática ANFIS, é um método de estimativa baseado na adaptação de regras, o qual usa-se o treinamento dos dados para ensinar o sistema, para o ajuste de parâmetros (SILVA et al., 2014).

2.2.5 Avaliação do desempenho do modelo

Para avaliação da performance dos resultados dos valores intermediários estimados da produção do rabanete, foi feito o uso de índices estatísticos. Erro do quadrado médio (*RMSE*), Erro absoluto médio (*MAE*), Qui-quadrado (χ^2) e Coeficiente de determinação (r^2) cujas fórmulas para o cálculo são dadas por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (4)$$

$$\chi_c^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{\hat{y}_k} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Em que: y_i e y'_i : vetores desejado e observado; n: número de pares de entrada-saída do vetor usado no treinamento.

O *RMSE*, mede a variabilidade das variáveis analisadas (produtividade do rabanete irrigado com água convencional e magnetizada) quais podem ser explicadas através do modelo, este índice pode ser afetado negativamente por grandes resíduos, sabendo-se que na sua mensuração é utilizado o quadrado dos resíduos obtidos no conjunto de dados. Apesar da grande maioria dos dados serem explicados de forma satisfatória, algumas exceções consideradas no cálculo podem afetar o *RMSE*.

O *MAE*, possivelmente pode resolver estas incertezas do cálculo do Erro do quadrado médio (*RMSE*), pelo fato de considerar o erro absoluto dos resíduos do conjunto de dados.

O teste do Qui-quadrado, é utilizado para avaliar a frequência, ou seja, se a distribuição de frequência se adequa na distribuição de frequência esperada (LARSON, 2010). Trata-se de um teste não paramétrico, por não depender de média e variância.

E por fim o coeficiente de determinação, que caracteriza-se em avaliar o ajuste do modelo matemático, ou seja, visualizar a qualidade do modelo e função do quanto foi capaz de explicar os dados.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com relação aos dados de produção do rabanete irrigado com água convencional (proveniente do capítulo 1) e magnetizada em casa de vegetação, a produção foi analisada e posteriormente foi feita a análise dos resultados obtidos através das três diferentes curvas do modelo matemático (regressão polinomial quadrática, lógica *fuzzy* e *neuro-fuzzy*).

Os dados de produção do rabanete utilizado neste trabalho foram provenientes de cultivo na primavera. Embora a cultura do rabanete prefira temperaturas mais amenas, ela pode ser cultivada em qualquer época do ano, se apresentando mais sensível a temperaturas altas (FILGUEIRA, 2007).

A produtividade do rabanete teve comportamento crescente (Figura 2), a partir da reposição hídrica de 50% da evapotranspiração, visto que a produção agrícola está diretamente relacionada a disponibilidade de água para as plantas. Akram & Ashraf (2013); Shafiq et al. (2014); Shafiq (2015), também perceberam isto, quando o rabanete foi submetido a baixas lâminas de irrigação houve queda de produtividade.

O excesso hídrico, causa a cultura do rabanete danos físicos, podendo acumular rachaduras, acarretando o déficit econômico (SILVA et al., 2012). O solo saturado dificulta o desenvolvimento do rabanete, principalmente no décimo dia após semeadura, segundo estudo de Alves et al. (2017), este é o período de maior evapotranspiração diária do rabanete, estágio responsável pela formação dos frutos. Observa-se que a produção foi decrescente neste experimento, a partir da reposição hídrica acima de 100% no tratamento com AC, resultando em perdas econômicas em relação a água, produção e possivelmente qualidade do rabanete, no tratamento com AM, a produção se estabilizou a partir da lâmina de 100% resultando na perda de água já que a produção estaciona a partir da lâmina plena.

A maior produção em ambos tratamentos foi encontrada em torno das lâminas com reposição plena (100%). Condizente com a literatura, informando que a cultura se desenvolve bem quando há disponibilidade hídrica próxima ou igual a

100%. Lacerda et al. (2017), observou que os melhores teores produtivos foram encontrados nas lâminas de 100 e 125%.

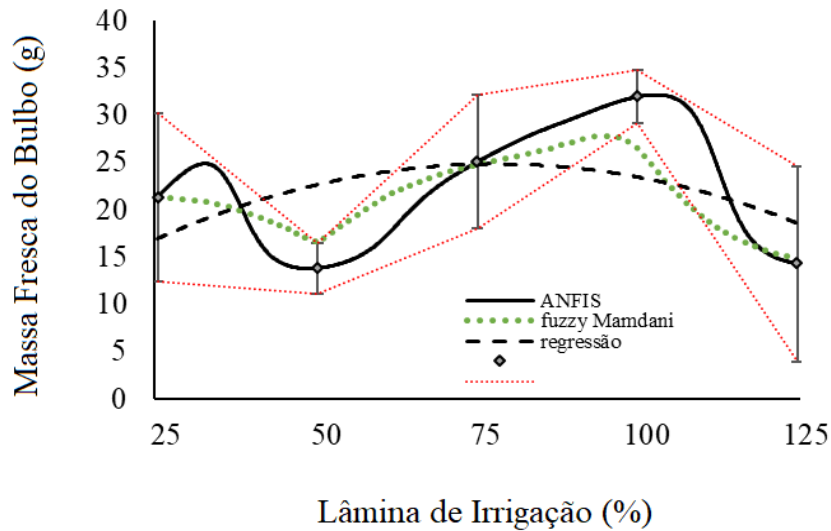
É possível notar através do experimento de Cremasco et al. (2015), que houve variações de produção, quando se analisa lâminas de irrigação e também diferença de produção nos tratamentos, estas análises podem ser visualizadas nas Figuras 2 e 3, produção em função da irrigação com água convencional e magnetizada respectivamente, ilustram o modelo de regressão desenvolvido (linha tracejada), por meio das médias de produção do rabanete, as linhas verdes tracejadas, representam o modelo mamdani (*fuzzy*) e as linhas contínuas representam a curva do modelo ANFIS.

De maneira geral, há diferença na produtividade entre os tratamentos, o tratamento com água magnetizada, apresenta vantagem na produção do rabanete, quando comparado ao irrigado com água convencional. A começar pela diferença entre a produção média máxima que no tratamento irrigado com água convencional produziu 31,9 g e com água magnetizada 39,3 g. Isto pode ser explicado pela estrutura modificada após magnetização da mesma, que se encontra mais fina por passar por processo de retirada de metais e quebra de moléculas, faz com que ela se transloque mais facilmente pelas células vegetais, condizendo com informações da literatura, que houve aumento da produção de culturas (alface, cenoura, milho, café), através de irrigação com água magnetizada.

O ajuste das curvas, pode ser analisado considerando os métodos de formas de cada uma. Nas Figuras 2 e 3, estão cada curva identificada tracejadas, tracejadas de verde e contínuas, representando regressão quadrática, lógica *fuzzy* e neuro-*fuzzy* respectivamente, as linhas vermelhas que passam por todo o modelo representam o desvio dos dados, sendo que no centro do mesmo localiza-se as médias.

Visualmente se percebe os ajustes das três curvas onde no tratamento com água convencional, a regressão quadrática apresenta muitos erros nas estimativas dos dados passando pontualmente somente na média da produção da Lâmina de 75% e passando fora do desvio padrão nas lâminas próximas a 50%, no geral estimando muito abaixo ou muito acima da produção real, no tratamento com água magnetizada, a curva de regressão se comporta de forma mais precisa, pois se adequa ao comportamento dos dados que são mais suaves em relação a mudanças de doses hídricas, isto se torna um pouco incerto pois nem sempre a cultura se comporta de forma esperada.

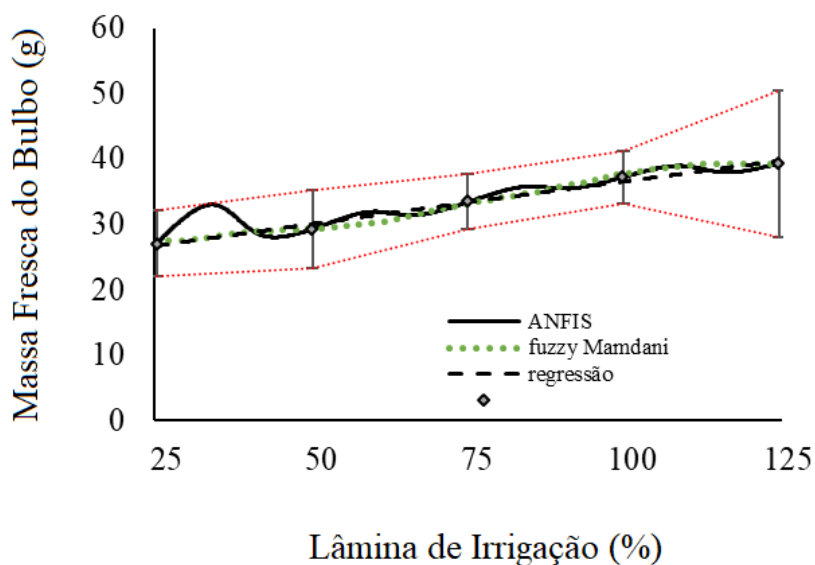
Figura 2 - Modelagem matemática de treinamento da produção de rabanete no ANFIS em função do percentual de reposição hídrica com água convencional.



Fonte: Autora.

A regressão quadrática em formato de 'sino', a qual é mais comumente executado e esperado pelos produtores e agrônomos.

Figura 3. Modelagem matemática de treinamento da produtividade de rabanete no ANFIS em função do percentual de reposição hídrica com água magnetizada.



Fonte: Autora.

A curva obtida pelo método mamdani (*fuzzy*), consegue explicar o comportamento dos dados de forma mais próxima do real, pois a curva passa muito próxima dos valores coletados do experimento. No tratamento com água convencional, a curva mamdani, embora estime exatamente a produtividade média obtida com a lâmina de 75%, passa fora da lâmina de 100%, inclusive abaixo do desvio, estimando produção abaixo do real e na lâmina de 50% estima o valor de produção máxima obtida. No tratamento com água magnetizada, ela passa de maneira precisa por todas as lâminas, devido ao comportamento real e sutil dos dados.

As curvas obtidas por meio do híbrido (neuro *fuzzy*), consegue explicar o comportamento dos dados de maneira mais real possível, pois a curva passa exatamente sobre todos os valores de produção real, sem extrapolar as linhas que representam o desvio nos dois tratamentos, isto acontece devido a análise dos dados como um todo.

O bom ajuste do modelo, ou a boa estimativa depende de como é feita a análise e o cálculo. A regressão quadrática depende do coeficiente de variação (CV) dos dados, podendo-se notar que o CV foi menor e que ele tem dessas exigências para um bom ajuste. O método mamdani (*fuzzy*), considerou as médias de produtividade do rabanete. A neuro *fuzzy*, analisou os dados de maneira plena o qual possibilitou encontrar valores iguais ou bem próximos dos dados coletados experimentalmente.

A modelagem neuro *fuzzy*, mostrou que é uma técnica adequada para estimar a produtividade do rabanete submetido a cinco diferentes taxas de reposição hídrica, irrigado com AC e AM. Os valores de saída dos modelos ANFIS, dispõem as produções intermediárias do rabanete, tornando possível posteriores tomadas de decisão.

Com base nos dados de saída do modelo mais eficiente, foi possível determinar a produção desconhecida para cada tratamento, a produção com AC, se manteve mais alta, quando esteve em torno de 75 e 80% de reposição de água, já irrigada com AM, a maior produção foi entre 50 e 60% e posteriormente em torno de 120 a 125%, pode-se considerar no entanto, que a irrigação com água magnetizada, oferece maior produção do rabanete e também maior economia de água, visto que a produção com a lâmina de 75% com AM foi maior do que a lâmina de 100% irrigada com AC.

Após processo de treinamento da rede neural, foi possível analisar os índices estatísticos (Tabela 7 e 8), mostrando que a aprendizagem para predição da produtividade do rabanete foi satisfatória.

Tabela 7. Indicativos estatísticos dos modelos matemáticos para estimativas da produção do rabanete Irrigado com água Convencional.

Índices	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo ANFIS	Regressão polinomial $y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
χ^2	67,489 (p=0)	57,277 (p=0,0002)	125,262 (p=0)
R^2	0,504 (p=0,0001)	0,537 (p=0)	0,104 (p=0,116)
RMSE	6,898	6,332	8,808
MAE	5,943	5,135	7,831

Tabela 8. Indicativos estatísticos dos modelos matemáticos para estimativas da produção do rabanete Irrigado com água Magnetizada.

Índices	Modelo <i>fuzzy</i>	Modelo ANFIS	Regressão polinomial $y = 0.x^2 + 0,138.x + 23,306$
χ^2	27,564 (p=0,2788)	27,361 (p=0,2879)	27,906 (p=0,264)
R^2	0,375 (p=0,0011)	0,376 (p=0,0011)	0,371 (p=0,0012)
RMSE	5,944	5,936	5,959
MAE	4,572	4,591	4,691

Na tabela acima, analisa-se a produção do rabanete estimada a partir de lâminas de irrigação, por meio do modelo de regressão quadrática, modelagem *fuzzy* e modelagem Matemática neuro *fuzzy* ANFIS, podendo-se avaliar que os índices estatísticos no geral foram menores, ou seja, melhores no modelo neuro *fuzzy*, indicados na tabela, isto garante o melhor ajuste do modelo.

2.4 CONCLUSÃO

O uso da água magnetizada para irrigação do rabanete, pode alcançar maior produção da cultura e mais economia de água.

A modelagem neuro *fuzzy*, possibilitou a visualização dos valores intermediários de produção do rabanete, aqueles que não foram mensurados.

Quando comparado os três modelos estudados, foi possível notar a eficiência e pontualidade da ANFIS em estimar a produção do rabanete.

A simplicidade da compreensão do modelo, acarreta em facilidades em tomadas de decisão, podendo conhecer índices produtivos de dados desconhecidos.

A modelagem mais eficiente provou que é possível utilizar água magnetizada na cultura do rabanete, para fins lucrativos, pois produz mais com menos quantidade de água.

REFERÊNCIAS

- ALISHAH, O., AHMADIKHAH, A. The effects of drought stress on improved cotton varieties in Golestan province of Iran. *International Journal of Plant Production*, v. 3, p. 17-26, 2009.
- AKRAM, N.A., ASHRAF, M., Regulation in plant stress tolerance by a potential plant growth regulator, 5-aminolevulinic acid (ALA). *J. Plant Growth Regul.* v. 32, p. 663–679, 2013.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- ALVES, E. S.; LIMA, D. F.; BARRETO, J. A. S.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Determinação Do Coeficiente De Cultivo Para A Cultura Do Rabanete Através De Lisimetria De Drenagem. *Irriga, Botucatu*, v. 22, n. 1, p. 194-203, 2017.
- CAMARGO, G. A.; CONSOLI, L.; LELLIS, I. C. S.; MIELI, J.; SASSAKI, E. K. Bebidas naturais de frutas perspectivas de mercado, componentes funcionais e nutricionais. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v.1, p.181-195, 2007.
- CARVALHO, W. A., ESPÍNDOLA, C. R., PACCOLA, A. A. Legenda atualizada do Levantamento de Solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médice” *Boletim Cl. FCA/UNESP, Botucatu*, n.1, 1983. 95 p. Legenda Complementar Atualizada, 2000.
- CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A. ; PUTTI, F. F. ; LUDWIG, R. ; SILVA JUNIOR, J.F. . Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), São Pedro-SP. v. 54. p. 1-9, 2015.
- ESCOBEDO, J.F., GOMES, E.N., OLIVEIRA, A.P., SOARES, J. RATIOS of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renew. Energy* 36, 169–178, 2011.
- FILGUEIRA, F.A.R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290, 2003.
- FILGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2007.

- FILGUEIRA, F. A. R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa, MG: UFV, 2008. 421p.
- GHOUSH, M. A.; SAMHOURI, M.; AL-HOLY, M.; HERALD, T. Formulation and fuzzy modeling of emulsion stability and viscosity of a gum-protein emulsifier in a model mayonnaise system. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v. 84, n. 2, p.348-357, 2008.
- JANG, J-R.R. Adaptive-network based fuzzy inference systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v.23, n.3:665-685, 1993.
- JANG, J.S.R; SUN, CHUEN, T.S.A.I. Neuro-fuzzy modeling and control. *Proceedings of the IEEE*, New York, v. 83, n. 3, p. 378-406, 1995.
- LACERDA, V. R., GONÇALVES, B. G., OLIVEIRA, F. G., SOUSA, Y. B., CASTRO, I. L., Características Morfológicas E Produtivas Do Rabanete Sob Diferentes Lâminas De Irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.11, nº.1, p. 1127 - 1134, 2017.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação por gotejamento do tomateiro industrial durante o estágio de frutificação, na região do cerrado. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 342-346, 2006.
- MELLO, M. F.; LUENGO, R. F. A.; MATOS, M. J. L. F.; TAVARES, S. A.; LANA, M. M. Embrapa hortaliças. Disponível em: < http://www.cnpq.embrapa.br/paginas/dicas_ao_consumidor/rabanete.htm>. Acesso em: 26 maio de 2018.
- MORENO-FONCECA, L. P. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Uma revisión. *Agronomía Colombiana*, Bogotá, v. 27, n. 2, p. 179-191, 2009.
- OLIVEIRA, F. R. A. de. Interação entre salinidade e fósforo na cultura do rabanete. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 4, p. 519-526, 2010.
- PEREIRA, A.J.; BLANK, A.F.; SOUZA, J.R. OLIVEIRA, P.M.; LIMA, L.A. 1999. Efeito dos níveis de reposição e frequência de irrigação sobre a produção e qualidade do rabanete. *Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 1, p. 117-120.
- PULITI, J. P. M.; REIS, H. B.; PAULINO, H. D. M.; RIBEIRO, T. C. M.; TEIXEIRA, M. Z.; CHAVES, A. S.; RIBEIRO, B. R.; MACIEIRA, G. A. A.; YURI, J. E. Comportamento da cultura do rabanete em função de fontes e doses de cálcio. *Horticultura Brasileira*, v. 27, p. 3003-3008, 2009
- SILVA, R. T. da.; SOUZA, A. A. T.; OLIVEIRA, F. de A. de.; TARGINO, I. S. de O.; SILVA, M. L. do N. Tolerância do rabanete ao encharcamento do solo. *Revista Verde*, Mossoró, v. 7, n.1, p. 25-33, jan./mar. 2012.
- SHAFIQ, S., AKRAM, N.A., ASHRAF, M., ARSHAD, A., Synergistic effects of drought and ascorbic acid on growth, mineral nutrients and oxidative defense system in canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Physiol. Plant*, v. 36, p.1539–1553, 2014.

SHAFIQ, S AKRAM, N. A., ASHRAF. M. Does exogenously-applied trehalose alter oxidative defense system in the edible part of radish (*Raphanus sativus* L.) under water-deficit conditions. *Scientia Horticulturae*. V.185 p. 68–75, 2015.

SILVA, R. T., SOUZA, A. A. T., OLIVEIRA, F. A., TARGINO, I. S. O., SILVA, M. L. N. Tolerância do rabanete ao encharcamento do solo. *Revista Verde*. v.7, n.1, p. 25 - 33, 2012.

SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; FILHO, M.C. M.T.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180–187, 2014.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *Journal of Irrigation and Drainage. Engineering of ASCE*, v.118, n.6, p.977-980, 1992. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1992\)118:6\(977\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:6(977)).

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TANSCHKEIT, R.; GOMIDE, F.; TEIXEIRA, M. C. M. Modelagem e controle nebuloso. In: AGUIRRE, L. A. (Ed.) *Enciclopédia de automática*. São Paulo: Edgard Blucher, v. 3, p. 283-324, 2007.

YILMAZ I.; KAYNAR O. Multiple regression, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potencial of clayey soils. *Expert systems with applications*, v.38, p.5958-5966, 2011.

ZADEH L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p.338- 353, 1965.

CAPÍTULO 3

ESTIMATIVA BIOMÉTRICA DA CULTURA DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO UTILIZANDO MODELAGEM NEURO *FUZZY*

RESUMO: A cultura do rabanete é considerada uma hortícola muito antiga e tem sua produtividade e qualidade diretamente ligada a disponibilidade hídrica no solo. Desta forma, é importante que se busque métodos que possam explicar a aplicabilidade hídrica e produção do rabanete acompanhada de menor erro possível. Diante disto, o objetivo deste trabalho, foi avaliar a produtividade do rabanete submetido a diferentes lâminas de irrigação utilizando a modelagem Neuro *fuzzy*, comparando-a com o modelo *fuzzy* e de regressão quadrática. Os dados de entrada dos modelos foram provenientes de um experimento feito nas dependências da Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp-Botucatu/SP, em ambiente protegido, onde a cultura foi submetida a lâminas de irrigação com base na evapotranspiração de cultura (ETc). A coleta dos dados biométricos foi feita 35 após o transplântio, utilizou-se o *software* MATLAB para elaboração das modelagens. Foi possível estimar a produção utilizando a modelagem neuro *fuzzy*, a mesma apresentou resultados satisfatórios em relação as outras (*fuzzy* e regressão quadrática), obtendo-se ainda menores índices estatísticos.

Palavras-chave: Morfologia, evapotranspiração, modelos matemáticos.

ABSTRACT: Radish cultivation is considered a very old horticultural crop and its productivity and quality are directly linked to water availability in the soil. Therefore, it is important to search for methods that may explain the water applicability and production of the radish accompanied by the smallest possible error. Therefore, the objective of this work was to evaluate the productivity of the radish submitted to different irrigation slides using the Neuro-fuzzy modeling, comparing it with the fuzzy and quadratic regression model. The input data of the models came from an experiment conducted at the Unesp-Botucatu School of Agronomic Sciences, in a protected environment, where the crop was submitted to irrigation slides based on crop evapotranspiration (ETc). The biometric data collection was done after transplanting, using the MATLAB *software* for modeling. It was possible to estimate the production using the Neuro-fuzzy modeling, which presented satisfactory results in relation to the others (fuzzy and quadratic regression), obtaining even lower statistical indices.

Keywords: Morphology, evapotranspiration, mathematical models.

3.1 INTRODUÇÃO

O rabanete (*Raphanus sativus* L.), é uma cultura de pequeno porte, possuindo raiz carnuda e comestível, uma olerícola pertencente à família Brassicaceae (FILGUEIRA, 1982). A cultura é considerada pouco expressiva em termos de área plantada, portanto, pode ser importante na visibilidade econômica, por servir como cultura intercalar de culturas de ciclos mais longos, além do rabanete ser considerado uma planta rustica ainda mantém um ciclo curto e com retorno rápido (MINANI et al., 1998).

O ciclo do rabanete dura em torno de 23 a 28 dias, portanto, a depender das condições climáticas da cultivar, estes valores podem aumentar até 10 dias (FILGUEIRA, 1982). A temperatura e umidade do solo é um fator preponderante para desenvolvimento e crescimento das plantas, podendo interferir de maneira negativa a produtividade das culturas e principalmente o sistema radicular (COSTA et al. (2006). Segundo levantamento bibliográfico, a cultura do rabanete tem o seu melhor desenvolvimento quando cultivada em condições ótimas de umidade no solo, podendo ter queda de produtividade quando há falta de água e falta de qualidade quando cultivada em solo saturado (PEREIRA et al. (1999); (FILGUEIRA, 2003).

Geralmente, as hortícolas apresentam quatro diferentes fases de desenvolvimento divididos em: fase inicial, fase vegetativa, fase de produção e fase de maturação (MAROUELLI et al., 2001). Conhecer os estádios de desenvolvimento das plantas facilita a escolha de métodos de otimização da irrigação, basicamente definida como a aplicação da lâmina necessária para suprir as necessidades da planta sem desperdícios e que apresente um potencial de resposta positiva (CUNHA & BERGAMASCHI, 1992).

Os estudos no campo das ciências agrárias, seja os dados referentes a experimentos em campo ou em laboratório, tradicionalmente são avaliados por meio de estatística, o qual são calculados análise variância e posteriormente realizando-se o teste de Tukey a 0,05 de probabilidade para variáveis qualitativas (SILVA et al., 2014), como as lâminas de irrigação aplicadas as culturas. Após estes procedimentos estatísticos, as medias encontradas dos dados coletados, são representadas por meio de regressão polinomial quadrática.

Há algum tempo, algumas técnicas estatísticas mais refinadas vêm sendo utilizadas para explicar dados de experimentos no campo das ciências agrônômicas, como por exemplo sistema nebuloso *fuzzy*, as redes neurais artificiais, programação

computacional e sistemas híbridos. A lógica *fuzzy* criada por Zadeh (1965), através de uma base de regras é capaz resolver problemas não lineares de forma eficiente. As redes neurais artificiais, são consideradas sistemas computacionais semelhantes aos neurônios do ser humano, por se tratar de um sistema com pretensão de aprendizagem e predição de informações inseridas no sistema (SILVA et al., 2010).

A junção do sistema nebuloso (*fuzzy*) e as redes neurais artificiais, torna possível a resolução de dados complexos, com comportamento de dados não lineares (SILVA et al., 2014). A associação destes dois sistemas recebe o nome de *Neuro-fuzzy*, o qual pretende formar um sistema preciso de aprendizado, predição, estimação de dados através de treinamento do sistema computacional.

Com base no exposto, objetivou-se neste trabalho analisar a possibilidade de elaboração de modelagem *neuro fuzzy*, para estimativa dos dados biométricos do rabanete submetidos cinco diferentes lâminas de irrigação cultivados em ambiente protegido e compara-los com a modelagem polinomial quadrática.

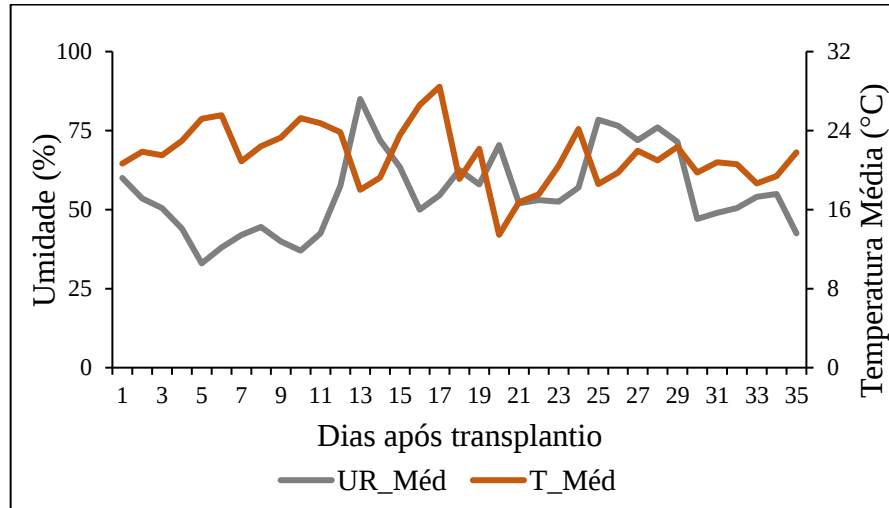
3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Descrição experimental

O experimento foi conduzido em ambiente protegido situado em área experimental pertencente a Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, em Botucatu, SP, a 22° 53' S, 48° 26' W e altitude de 786 m. A região em estudo apresenta clima do tipo Cfa (clima subtropical úmido), segundo classificação climática de Köppen (KÖPPEN; GEIGER, 1928). O experimento foi realizado entre os meses de setembro e novembro de 2013, sob supervisão de Cremasco et al. (2015).

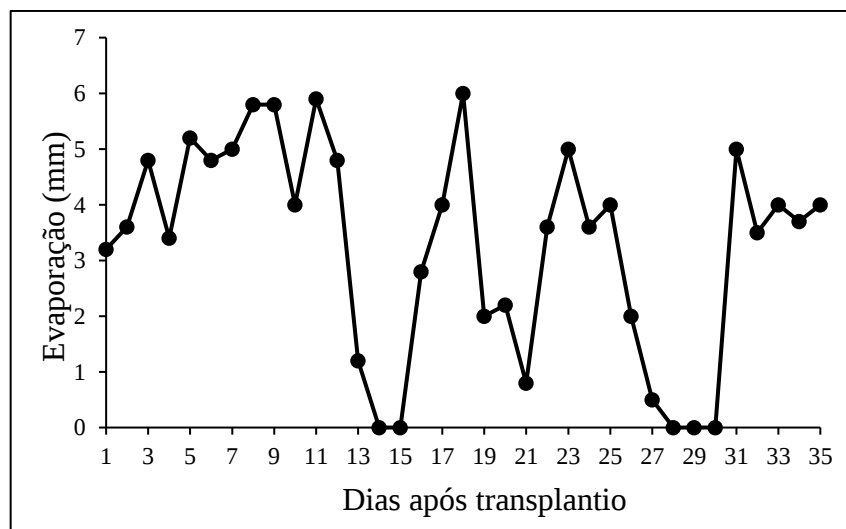
No interior da casa de vegetação utilizada para o cultivo do rabanete, foi instalada uma estação automática para aferição diária da temperatura do ar e umidade relativa do ar. A determinação da evaporação diária da água foi feita por meio de um tanque classe A que foi instalado no centro do ambiente protegido. A Figura 1 apresenta a temperatura média do ar (°C) e a umidade relativa média (%), a Figura 2 ilustra a evaporação (mm) diária.

Figura 1. Temperatura do ar e umidade relativa do ar aferidas diariamente no interior da casa de vegetação durante o ciclo da cultura do rabanete, entre os meses de setembro e outubro de 2013.



A obtenção da evapotranspiração da cultura (ETc) diária, foi feita considerando as seguintes etapas: evaporação do tanque classe A (E_{ca} mm dia⁻¹); determinação do coeficiente do tanque (K_p) e coeficiente de cultura (K_c). A evaporação diária foi aferida diariamente com ajuda do termo-higrômetro, instalado no tanque classe, a Figura 2 apresenta essas medidas aferidas.

Figura 2 - Evaporação diária obtidas por meio do tanque classe A diariamente no interior da casa de vegetação durante o ciclo da cultura do rabanete, entre os meses de setembro e outubro de 2013.



A determinação do coeficiente do tanque (K_p), foi obtida por meio de metodologia de Snyder (1992), o qual desconsidera a velocidade do vento quando o experimento é realizado em ambiente protegido, bem como a bordadura, o método segue equação abaixo:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \ln(B) - 0,000376 * V + 0,0045 * UR \quad (1)$$

Em que: K_p : coeficiente de tanque; B: bordadura da área de vegetação em torno do tanque (m); V: velocidade do vento a 2 m de altura (km dia^{-1}); UR: média da umidade relativa (%).

O coeficiente de cultura (K_c), foi obtido conforme orientação do boletim da FAO 56 (ALLEN et al., 1998), que determina coeficiente distinto para cada cultura, bem como a diferença para cada estágio vegetativo, para o rabanete orienta-se 3 diferentes coeficientes a serem considerados (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficiente da cultura do rabanete, conforme recomendação da FAO 56.

Cultura	K_c		
	Fase inicial	Desenvolvimento vegetativo	Final do ciclo
Rabanete	0,6	1,15	0,8

Fonte: FAO 56 (Allen et al., 1998).

Por fim foi calculado a evapotranspiração da cultura diariamente, por meio da equação abaixo.

$$ET_c = E_{ca} * K_p * K_c \quad (2)$$

Em que: E_{ca} : evaporação do tanque (mm dia^{-1}); K_p : coeficiente do tanque; K_c : coeficiente de cultura.

O método de irrigação utilizado, foi o sistema localizado (gotejamento). As lâminas de irrigação aplicada foram determinadas a partir de metodologia proposta por Marouelli et al. (2006), em que considera o tempo de irrigação como determinante de percentual de lâminas pré-determinadas, conforme segue equação abaixo:

$$T_i = 6.000 * \frac{ET_c * S_l * S_g * TR}{E_i * V_g} \quad (3)$$

Em que T_i : tempo de irrigação; ET_c : evapotranspiração de cultura (mm dia^{-1}); S_l : espaçamento entre laterais (m); S_g : espaçamento entre gotejadores (m); E_i : eficiência de irrigação (%); V_g : vazão de gotejadores (L h^{-1}).

O solo utilizado para o experimento é caracterizado como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico, possuindo estrutura média/argilosa, conforme classificação de Carvalho et al. (2000). O mesmo foi submetido a análise laboratorial, o qual apresentou as seguintes características: Para macronutrientes 5,9 de pH em CaCl₂, 24 g dm⁻³ de matéria orgânica, 191 mg dm⁻³ de P (resina), 25, 68, 4.8 e 17 mmolc dm⁻³ de Mg, Ca, K e H+Al respectivamente, e 67% de saturação por base. Para micronutrientes: zinco, cobre, manganês, boro, ferro, 8, 4.8, 10.10, 0.51 e 20 mmolc dm⁻³ respectivamente.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e cinco repetições, os tratamentos foram constituídos por cinco lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100 e 125% * ETc). A cultura avaliada foi o rabanete da cultivar maçarias. O experimento foi desenvolvido em uma área de 3,6 m², com espaçamento entre linhas de 25 cm e entre plantas de 5 cm, a semeadura foi feita diretamente no solo 14 dias após desbaste.

A colheita do rabanete foi feita 35 dias após o transplântio, conforme recomendação de maturação da cultivar estudada. Neste mesmo dia, foi feita a avaliação de dez fatores biométricos dos cinco tratamentos, que posteriormente foram utilizados como dados de entrada para elaboração das modelagens deste trabalho sendo eles: Número de Folhas (NF); Massa Fresca da Folhas (MFF); Massa Seca das Folhas (MSF); Comprimento da Raiz (CR); Massa Fresca da Raiz (MFR); Massa Seca da Raiz (MSR); Diâmetro do Bulbo (DB); Comprimento do Bulbo (CB); Massa Fresca do Bulbo (MSB) e Massa Seca do Bulbo (MSB).

3.2.2 Elaboração das modelagens matemáticas

Com base nos dados biométricos coletados no experimento realizado por Cremasco et al. (2015), foi elaborada para os dez fatores biométricos (Tabela 3), as duas modelagens propostas neste trabalho, sendo regressão polinomial e modelagem neuro *fuzzy*. Para execução dos modelos utilizou-se planilhas eletrônicas do Excel e o *software* MATLAB® 7.0 (MATHWORKS, 1995).

Tabela 3. Dados de entrada para elaboração dos modelos matemáticos, dos fatores biométricos do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido.

Dados de entrada	Lâmina de Irrigação (%)				
	25	50	75	100	125
Número de Folhas	6,9	6,9	6,6	6,1	5,8
Massa Fresca das Folhas (g)	20,6	18,5	29,3	12,2	13,6
Massa Seca das Folhas (g)	3,0	2,2	2,1	1,4	1,1
Comprimento da Raiz (cm)	45,8	45	47,8	35,2	34,8
Massa Verde da Raiz (g)	1,7	1,2	1,4	1,1	0,6
Massa Seca da Raiz (g)	1,2	1,5	0,9	0,7	0,6
Diâmetro do Bulbo (cm)	39,8	49	44,8	41,4	14,9
Comprimento do Bulbo (cm)	27,9	24,3	21	21	33,9
Massa Fresca do Bulbo (g)	21,3	13,8	25,1	31,9	14,3
Massa Seca do Bulbo (g)	1,2	1,1	1,7	0,7	0,7

Os modelos de regressão polinomial são comumente utilizados para explicar dados obtidos no campo agrícola, sendo estes dados provenientes de dados coletados em área experimental ou em laboratório. Este tipo de modelagem matemática, consiste em explicar a associação entre as variáveis analisadas (RIBEIRO & FREITAS, 2012).

Com isto, foi elaborado modelos de estimativas para as respectivas modelagens, utilizando as variáveis independentes (x) e estimando as variáveis independentes (y) (ZAVALA, 2007), dada pela equação:

$$y = \beta_0 + ax_1 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 \quad (4)$$

Em que: β_0 : Coeficiente linear; x_1 : Tratamento (tipo de água); x_2 : Lâminas de irrigação (mm).

Por meio desta, foi obtido os valores de cada fator biométrico do rabanete (variáveis dependentes), em relação as diferentes lâminas de irrigação (variáveis independentes).

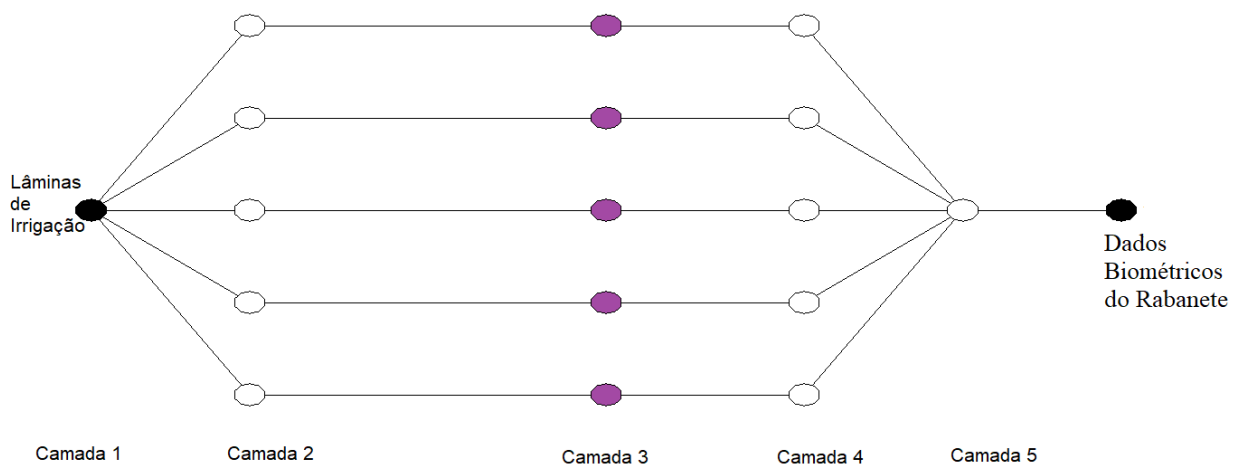
A elaboração do modelo neuro *fuzzy*, foi dividida em 3 etapas sendo treinamento dos dados de entrada, teste e validação dos modelos, utilizando, portanto, o sistema de interferência adaptativo neuro *fuzzy* (ANFIS). Geralmente, a elaboração das modelagens neuro *fuzzy* é utilizada para estimativa de resultados futuros, portanto, os dados são fracionados previamente e aleatoriamente, separando em torno de 70% dos dados para treinamento do sistema e 20% para validação dos

dados, o presente trabalho pretende estimar dados biométricos em lâminas intermediárias, ou seja, as não medidas, por este fato os dados foram treinados e validados com 100% dos dados.

O sistema híbrido ANFIS é comumente utilizado para exercer previsão ou aproximação de funções, aplicando como sistema de inferência o modelo *fuzzy* Takagi-Sugeno, proposto por Jang & Sun (1995), de ordem constante ou linear (TANSCHKEIT et al., 2007), executado para cada um dos 10 modelos, mantendo somente uma saída para cada um deles, referente aos dados biométricos do rabanete.

O sistema de inferência ANFIS, possui uma arquitetura que descrita em cinco camadas (Figura 3). A seguir, serão detalhados alguns fatores relacionados a estrutura do sistema, em que foram utilizados para estimativa do desenvolvimento do rabanete, particionado em cinco regras *fuzzy*, correspondente as lâminas de irrigação.

Figura 3. Arquitetura da modelagem neuro *fuzzy* de uma entrada e uma saída com cinco camadas no sistema para estimativa dos dados biométricos do rabanete.



Fonte: Autora.

Cada uma das camadas tem finalidade específica dentro do sistema (JANG, 1993), os nós das camadas um e quatro são adaptativos, ou seja, seus valores são fracionados em valores antecedentes e consequentes da regra.

A modelagem matemática ANFIS, é um método de estimativa baseado na adaptação de regras, o qual usa-se o treinamento dos dados para ensinar o sistema, para o ajuste de parâmetros (SILVA et al., 2014).

Para elaboração do modelo ANFIS, inicialmente realizou-se o carregamento do conjunto de dados (Tabela 3), bem como suas respectivas repetições. Após carregamento dos dados no *software*, informou-se os números de funções de pertinência de entrada e saída. Seguido pela escolha do método de treino, no caso método híbrido (rede neural), formado pela combinação dos métodos back-propagation (responsável pelas estimativas dos parâmetros das regras *fuzzy* de entrada) e o dos mínimos quadrados (responsável pelos valores estimados de saída através das regras *fuzzy*), e então selecionou-se os critérios de parada do modelo, e por fim iniciado o treinamento das variáveis biométricas do rabanete.

Seguidamente foi informado ao *software* o número e tipos de funções de pertinência de entrada, para estimativa dos fatores biométricos do rabanete em diferentes lâminas de irrigação, que neste caso foi em forma de sino generalizada (gbellmf). Posteriormente foi feita a determinação das funções de pertinência bem como as variáveis de saída, obtendo-se os parâmetros delimitadores (Tabela 4), a Tabela 5, ilustra o range (tamanho) das variáveis de entrada e saída.

Tabela 4. Range (tamanho) das variáveis de entrada e saída.

Variável	Entrada	Saída
NF	[25 125]	[5 7,5]
CR	[25 125]	[26,325 58,52]
DB	[25 125]	[9,17 82,715]
CB	[25 125]	[12,23 41,94]
MFR	[25 125]	[0,424 3,211]
MFF	[25 125]	[7,369 47,974]
MFB	[25 125]	[6,397 36,646]
MSR	[25 125]	[0,31 2,096]
MSF	[25 125]	[0,696 4,574]
MSB	[25 125]	[0,249 2,945]

Tabela 5. Parâmetros dos delimitadores das funções de pertinência do tipo gbellmf (forma de sino generalizada) para as variáveis de entrada e linear ($y = ax + b$) para as variáveis de saída.

Variável	Função de Pertinência	Entrada	Saída
NF	1	[12,5 2,01 25]	[0,285 0,011]
	2	[12,5 2,02 50]	[0,133 0,003]
	3	[12,48 2,07 74,99]	[0,087 0,001]
	4	[12,5 1,98 100]	[0,06 0,001]
	5	[12,51 1,95 124,99]	[0,045 0]
CR	1	[12,51 1,96 25]	[1,893 0,075]
	2	[12,5 1,98 50]	[0,857 0,019]
	3	[12,5 1,96 75]	[0,638 0,009]
	4	[12,5 1,98 100,01]	[0,335 0,004]
	5	[12,5 2,01 125]	[0,273 0,002]
DB	1	[12,5 1,98 25]	[1,635 0,064]
	2	[12,52 1,94 50,01]	[0,965 0,021]
	3	[12,49 2,04 75]	[0,581 0,008]
	4	[12,49 2,06 100]	[0,421 0,004]
	5	[12,51 1,94 124,99]	[0,1 0,001]
CB	1	[12,49 2,02 24,99]	[1,156 0,046]
	2	[12,5 1,99 50]	[0,463 0,01]
	3	[12,52 1,93 75]	[0,27 0,004]
	4	[12,49 2,05 99,99]	[0,2 0,002]
	5	[12,51 1,94 124,99]	[0,275 0,002]
MFR	1	[12,5 2 25]	[0,07 0,003]
	2	[12,5 2,01 50]	[0,021 0]
	3	[12,5 2,02 75]	[0,019 0]
	4	[12,5 1,99 100]	[0,011 0]
	5	[12,5 1,98 125]	[0,004 0]
MFF	1	[12,5 2,01 25]	[0,851 0,034]
	2	[12,5 2,01 50]	[0,341 0,008]
	3	[12,49 2,03 75]	[0,409 0,006]
	4	[12,5 1,99 100]	[0,105 0,001]
	5	[12,5 2 125]	[0,108 0,001]
MFB	1	[12,49 2,04 25]	[0,892 0,035]
	2	[12,5 1,99 50]	[0,239 0,006]
	3	[12,5 2,01 75]	[0,339 0,005]
	4	[12,49 2,03 100]	[0,331 0,003]
	5	[12,5 2 125]	[0,101 0,001]
MSR	1	[12,49 2,05 24,99]	[0,049 0,002]
	2	[12,49 2,02 50]	[0,031 0,001]
	3	[12,52 1,94 75]	[0,012 0]
	4	[12,5 1,98 100]	[0,007 0]
	5	[12,5 2 125]	[0,005 0]
MSF	1	[12,5 1,99 25]	[0,123 0,005]
	2	[12,5 1,99 50,01]	[0,04 0,001]
	3	[12,5 2,01 75]	[0,027 0]
	4	[12,5 2,02 100,01]	[0,013 0]
	5	[12,5 2 125]	[0,008 0]
MSB	1	[12,5 2 25]	[0,05 0,002]
	2	[12,5 2 50]	[0,02 0]
	3	[12,5 1,99 75]	[0,023 0]
	4	[12,51 1,96 100]	[0,006 0]
	5	[12,5 1,99 125]	[0,005 0]

Posterior a elaboração dos modelos foi feita a avaliação da performance dos mesmos, a fim de obter a confiabilidade dos dados biométricos estimados do rabanete em função do percentual de reposição hídrica. Para isto utilizou-se erro do quadrado médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação (r^2) e Qui-quadrado, por meio das equações relacionadas abaixo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

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

$$\chi_c^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{\hat{y}_k} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Em que: y_i e y'_i : vetores desejado e observado; N: número de pares de entrada-saída do vetor usado no treinamento.

Os índices estatísticos considerados neste trabalho, tem a função de analisar o desempenho do modelo de forma particular para cada um deles, em que quanto mais baixo for o valor maior confiabilidade das estimativas dos dados biométricas do rabanete.

O *RMSE*, quantifica a variabilidade dos dados analisados, o qual pode ser interferido devido ao seu método de cálculo (quadrado dos resíduos do conjunto de dados). O *MAE*, geralmente pode ‘resolver’ o problema anterior, pois considera o erro absoluto dos conjuntos de dados. O teste do Qui-quadrado, foi utilizado para avaliar a frequência dos dados obtidos de forma não paramétrica. E por fim, foi feito o coeficiente de determinação que tem por finalidade avaliar o ajuste do modelo.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos dados biométricos do rabanete obtidos por meio do experimento realizado por Cremasco et al. (2015), submetidos a diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido, observou-se que houve efeito em todos dez fatores biométricos analisados, em relação as lâminas de irrigação aplicadas.

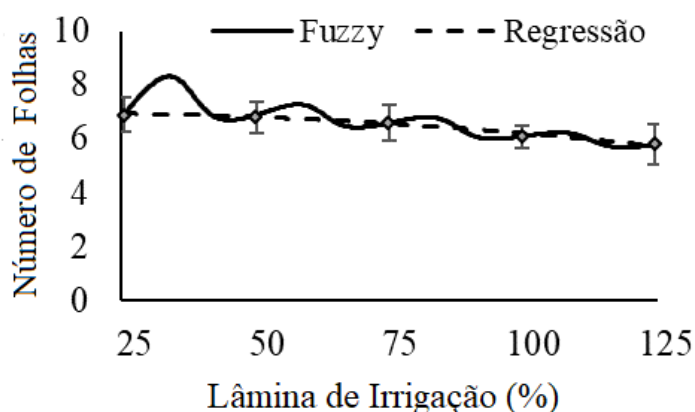
Posterior a análise de normalidade dos dados, provenientes da coleta do rabanete 35 dias após transplante, desenvolveu-se as modelagens estatísticas

(regressão polinomial quadrática), utilizando valores médios dos dados biométricos do rabanete em função do percentual de reposição hídrica. O modelo representativo para cada fator, foi escolhido considerando maior coeficiente de determinação (R^2). A modelagem matemática ANFIS, foi realizada respeitando as suas respectivas etapas de treinamento, checagem e validação dos dados. As curvas estão apresentadas nas figuras a seguir, em que as curvas tracejadas representam a regressão polinomial e a linha contínua a modelagem neuro *fuzzy*.

Em relação às análises da parte aérea, obteve-se o número de folhas, massa fresca das folhas (g) e massa seca das folhas (g) (Figura 4 e 5ab). O desenvolvimento da parte aérea da planta, ocorre enquanto o teor hídrico for suprido, quando este fator é limitante o crescimento aéreo é afetado de forma negativa, tendo como consequência dimensões de folhas menores, número de folhas inferiores, ocasionando portanto, na redução fotossintética da planta, ocasionando diminuição na produção de energia e glicose (GRIFFITHS & PARRY, 2002; TEJEDA et al., 2014).

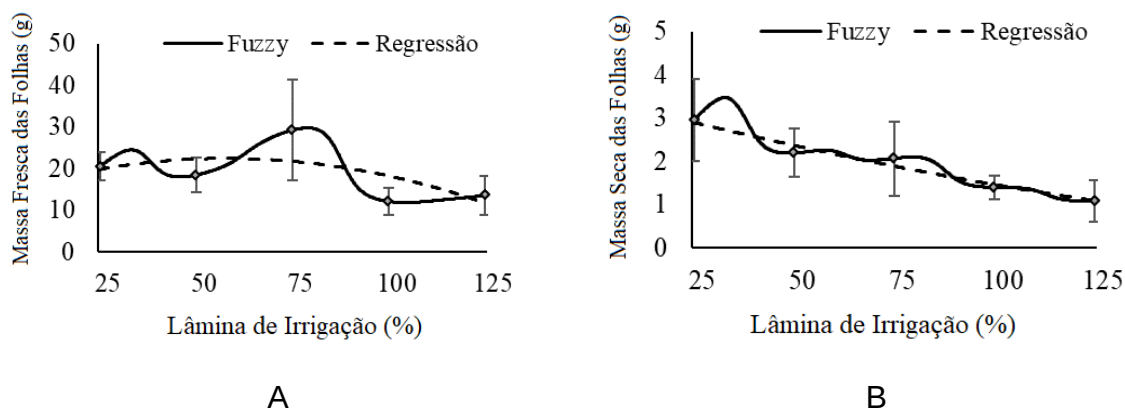
O número de folhas das plantas do rabanete, não tiveram valores muito distintos da média dos respectivos tratamentos, conforme Figura 5a, por outro lado as duas curvas matemáticas comportaram-se de forma semelhante, obtendo média máxima do NF igual a 5,9 e NF mínimo de 5,8. Santo et al. (2014), encontrou uma média de 8,9 de NF na lâmina de 100% de irrigação do rabanete cultivado em campo aberto, nos meses de abril a maio, na região do nordeste.

Figura 4. Modelos neuro fuzzy e regressão polinomial do NF da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.



A massa das folhas da cultura do rabanete, estão apresentadas na Figura 6 em massa fresca (A) e massa seca (B). Observa-se que as medidas das folhas frescas apresentam maior massa na lâmina de 100% de reposição hídrica o que condiz com estudos encontrados na literatura, segundo Pereira et al. (1999), a produção da massa média fresca foliar, obtém-se quando o rabanete é submetido a capacidade de campo plena. Após secagem das folhas frescas as mesmas foram medidas, conforme Figura 6B, em que pode se observar comportamento decrescente da curva, devido ao maior índice de água presente nas folhas.

Figura 5. Modelos neuro *fuzzy* e regressão polinomial da MFF (A) e MSF(B)da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.



Observando as curvas em que representam as modelagens matemáticas, nota-se erros de estimativas embutidos na regressão polinomial, em que subestima o valor médio na lâmina de 75% e superestima na lâmina de 50%. A modelagem ANFIS consegue passar exatamente de massa medidas, sem extrapolar a o limite do desvio padrão dos dados, observa-se este fato, principalmente na reposição de 75%, visto que foi onde ocorreu o maior desvio dos dados. A massa seca das folhas obteve o maior desvio dos dados entorno da média na lâmina de 75%, no entanto, ambas curvas tiveram comportamentos semelhantes.

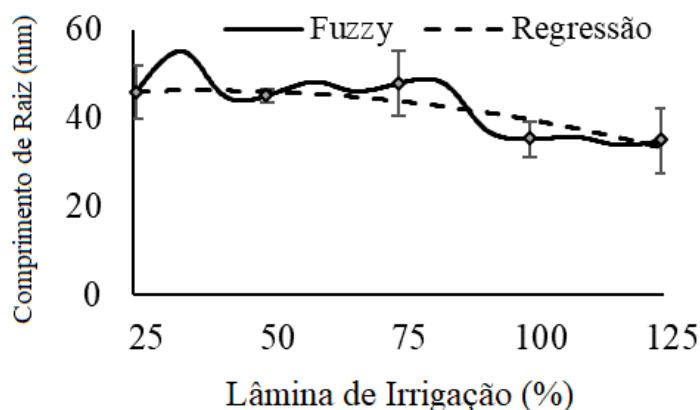
Do sistema radicular foram aferidos o comprimento das raízes (mm), a massa fresca das raízes (g) e a massa seca das raízes (g).

O CR obteve dimensões próximas a 20 mm, entre as lâminas aplicadas. A média do comprimento foi muito semelhante na lâminas de 25, 50 e 75% de reposição, foram eles maiores comparados as lâminas de 100 e 125%, este fato pode ser

explicado como uma reação fisiológica na planta, em que quando as plantas são submetidas falta de água no solo elas tendem a se alargarem em busca de disponibilidade hídrica.

Com base nos modelos de regressão polinomial e ANFIS, a segunda apresentou maior precisão de estimativa em relação a primeira, ainda possibilita visualizar que entre a lâmina de 25 e 32% de água as raízes do rabanete são mais compridas.

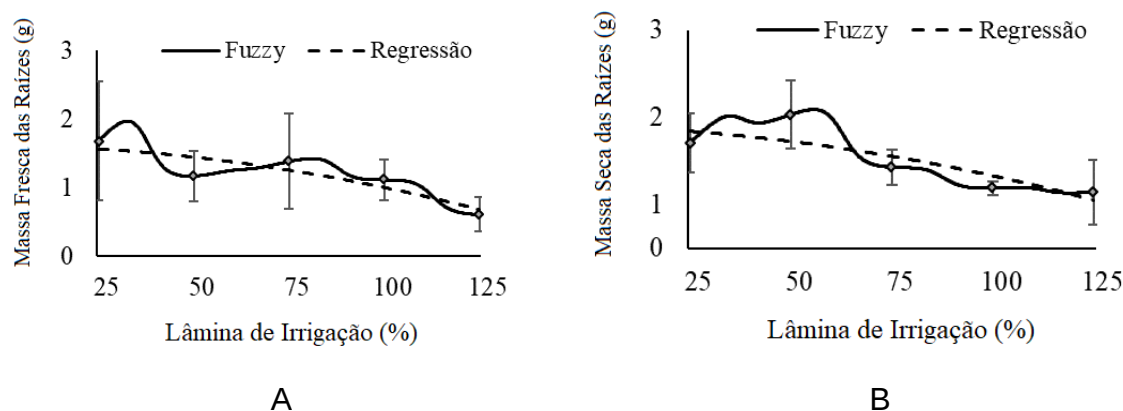
Figura 6. Modelos neuro *fuzzy* e regressão polinomial do CR da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.



Conforme Figura 7A, em que apresenta as curvas de MFR, os maiores valores encontrados foi nas taxas de reposição de água de 40% e entorno de 80%, sendo estes também os tratamentos com maior desvio dos dados em relação à média. Bregonci et al. (2008) e Pereira et al.(1999), encontraram maiores produção de raízes em tratamentos com lâmina de 100% de irrigação, na batata Miller & Martin (1983), encontraram os maiores resultados de massa fresca das raízes, utilizando lâmina de 80% de reposição de água. A curva da MSR, se comportou quase de forma decrescente, exceto para lâminas entorno de 55%, que apresentaram menor massa.

Visivelmente percebe que as curvas de regressão polinomial, apresentou maior índice de estimativa, por vezes passando fora dos pontos representados pelas medias dos tratamentos, a modelagem neuro *fuzzy* também se mostrou mais eficiente pra estimar fatores biométricos do sistema radicular do rabanete.

Figura 7. Modelos neuro *fuzzy* e regressão polinomial da MFE (A) e MSR (B) da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.

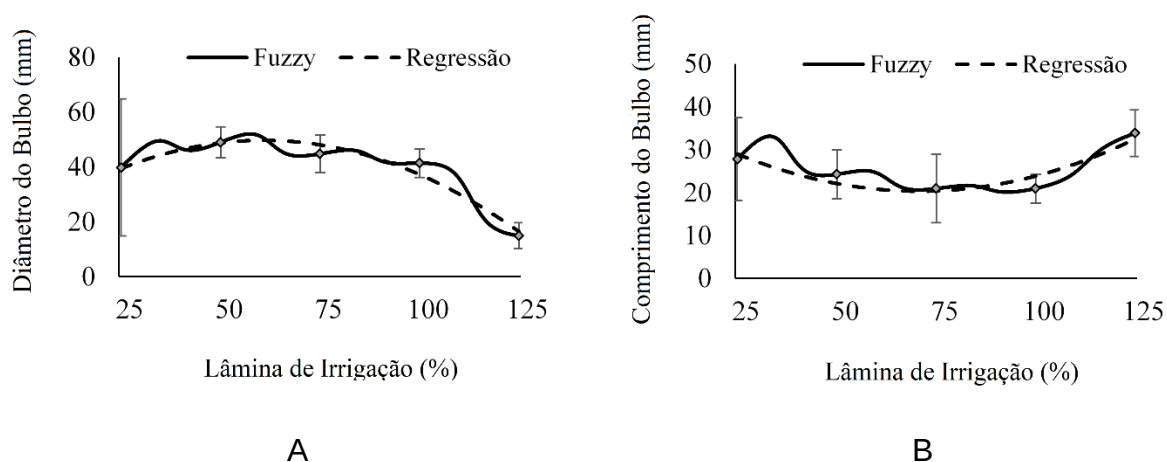


As avaliações de produção do rabanete, ou seja, parte comercial da planta, foi determinada com medidas de diâmetro e comprimento do bulbo (Figura 8) e massa fresca e seca do bulbo (Figura 9), ambas estão representadas abaixo, com as duas curvas matemáticas elaboradas (neuro *fuzzy* e regressão). A disponibilidade hídrica no solo é dos fatores determinantes para qualidade e produtividade do rabanete, de acordo com a literatura, baixos índices hídricos no solo causa perda de produtividade da cultura e excesso causa danos nos bulbos, como rachaduras (PEREIRA et al. (1999); Filgueira, 2003).

Os maiores valores do diâmetro do bulbo das plantas do rabanete apresentados foram na lâmina entorno de 50 e 55%, o comprimento do bulbo foi maior na lâmina de 30% de reposição hídrica, Santos et al. (2014), observou que o rabanete cultivado em campo aberto, obteve maior DB e CB na reposição de água no solo plena (100%), podendo ser explicado por ter sido cultivado em diferente época do ano (março a maio). Este mesmo autor, representou estes dados biométricos utilizando regressão polinomial quadrática.

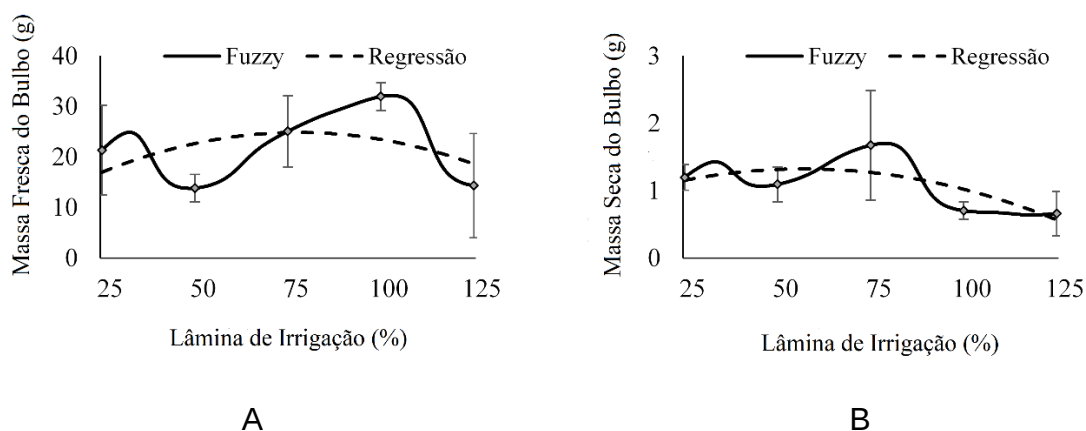
A variação das médias dos experimentos foi sutil para estes dados analisados (DB e CB), apresentados nas curvas de regressão e ANFIS, porem nota-se erros de estimativas menores da segunda, não passando por fora das médias, ambas não estimaram nenhum tratamento fora do desvio padrão dos dados.

Figura 8. Modelos neuro *fuzzy* e regressão polinomial do DB (A) e CB (B) da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.



A avaliação das massas (fresca e seca) do bulbo das plantas do rabanete, estão apresentadas na Figura 10. A maior massa fresca do bulbo encontrada foi no tratamento com irrigação plena (100%), condizente com os dados obtidos na literatura, explicado pelo fato da cultura do rabanete manter uma necessidade hídrica durante todo seu ciclo, os menos valores de massa fresca encontrados foi nas lâminas de 50 e 125%. Segundo Filgueira (2003), lâminas acima de 100% interferem de maneira negativa a produção dos bulbos do rabanete. De acordo com a Figura 9 (B), a MSB que apresentou maior massa foi na lâmina de 75%, a mesma também apresentou maior desvio dos dados em relação à média.

Figura 9. Modelos neuro *fuzzy* e regressão polinomial da MFB (A) e MSB (B) da cultura do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação.



Notoriamente observa-se que ambos dados de massa expostos por meio de modelagens matemáticas (Figura 9), a regressão polinomial apresentou um erro de estimativa muito expressivo em vários casos estimando valores acima ou abaixo da

média dos tratamentos e até mesmo fora do desvio padrão dos dados. Já a modelagem ANFIS manteve-se com estimativas precisas e satisfatórias, visto que em nenhum momento passou fora dos pontos representados pelas medias dos tratamentos.

Silva et al. (2014), notou que comparando as modelagens matemáticas de regressão polinomial e ANFIS para estimativa da produção do trigo em função de dosagens de nitrogênio, obteve resultados satisfatórios com o modelo híbrido neuro *fuzzy*, alcançando índice de erro de estimativa expressivamente menores.

Posteriormente ao treinamento das redes neurais para estimativa dos fatores biométricos do rabanete, os índices estatísticos: Erro do quadrado médio (*RMSE*); Erro absoluto médio (*MAE*); Qui-quadrado (X^2) e Coeficiente de determinação (r^2), foram menores do que os encontrados com a aproximação da regressão polinomial, conforme Tabela 2.

Tabela 6. Valores comparativos dos índices estatísticos dos modelos de regressão quadrática e neuro *fuzzy*.

Variáveis	Índices	Neuro <i>fuzzy</i>	Regressão polinomial	Equação Regressão
Número de Folhas	χ^2	1.289 (p=1)	1.291 (p=1)	$y = -0.00009.x^2 + 0.002.x + 6.96$
	R ²	0.364 (p=0.0014)	0.36 (p=0.0015)	
	RMSE	0,557	0,559	
	MAE	0,476	0,485	
Comprimento da Raiz (mm)	χ^2	15.803 (p=0.8951)	19.996 (p=0.697)	$y = -0.002.x^2 + 0.124.x + 43.92$
	R ²	0.543 (p=0)	0.408 (p=0.0006)	
	RMSE	5,1	5,81	
	MAE	4,125	4,438	
Diâmetro do Bulbo (mm)	χ^2	65.459 (p=0)	69.781 (p=0)	$y = -0.008.x^2 + 0.978.x + 19.985$
	R ²	0.543 (p=0)	0.52 (p=0)	
	RMSE	10,975	11,246	
	MAE	6,478	7,438	
Comprimento do Bulbo (mm)	χ^2	37.769 (p=0.0366)	41.271 (p=0.0156)	$y = 0.004.x^2 + -0.587.x + 41.11$
	R ²	0.39 (p=0.0008)	0.336 (p=0.0024)	
	RMSE	6,073	6,339	
	MAE	4,916	5,022	
Massa Fresca da Raiz (g)	χ^2	4.029 (p=1)	4.475 (p=1)	$y = -0.00005.x^2 + -0.0009.x + 1.625$
	R ²	0.341 (p=0.0022)	0.274 (p=0.0073)	
	RMSE	0,492	0,517	
	MAE	0,382	0,369	
Massa Fresca da Folha (g)	χ^2	37.211 (p=0.0417)	64.702 (p=0)	$y = -0.002.x^2 + 0.276.x + 14.474$
	R ²	0.525 (p=0)	0.206 (p=0.0227)	
	RMSE	5,77	7,457	
	MAE	4,263	5,187	
Massa Fresca do Bulbo (g)	χ^2	57,277 (p=0,0002)	125.262 (p=0)	$y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
	R ²	0,537 (p=0)	0.104 (p=0.116)	
	RMSE	6,332	8,808	
	MAE	5,135	7,831	
Massa Seca da Raiz (g)	χ^2	1.929 (p=1)	2.383 (p=1)	$y = -0.00004.x^2 + -0.001.x + 1.403$
	R ²	0.602 (p=0)	0.431 (p=0.0004)	
	RMSE	0,271	0,324	
	MAE	0,223	0,244	
Massa Seca da Folha (g)	χ^2	3.979 (p=1)	3.986 (p=1)	$y = 0.00004.x^2 + -0.024.x + 3.479$
	R ²	0.541 (p=0)	0.523 (p=0)	
	RMSE	0,599	0,611	
	MAE	0,479	0,474	
Massa Seca do Bulbo (g)	χ^2	3.05 (p=1)	3.877 (p=1)	$y = -0.0002.x^2 + 0.019.x + 0.787$
	R ²	0.49 (p=0.0001)	0.259 (p=0.0093)	
	RMSE	0,378	0,456	
	MAE	0,266	0,313	

Os resultados dos índices estatísticos calculados, mostram que a predição dos dados biométricos do rabanete submetidos a diferentes lâminas de irrigação em ambiente protegido, foram satisfatórias para a modelagem neuro *fuzzy*, visto que os índices de erro para estimação de todas as variáveis foram menores em relação a regressão.

3.4 CONCLUSÃO

O presente estudo mostra que é possível utilizar modelagem ANFIS pra estimativa de dados biométricos da cultura do rabanete em função de lâminas de água com precisão, utilizando dados provenientes de experimento em ambiente protegido.

A modelagem neuro *fuzzy* possibilita a estimativa biométrica do rabanete com mais precisão que a regressão polinomial quadrática, visto que apresenta índice de erros e ajuste menores.

O modelo matemático ANFIS, mostrou-se satisfatório, podendo ser utilizado como ferramenta de tomada de decisão, para avaliações biométricas da cultura do rabanete cultivados sob taxas de irrigação de 25, 50, 75, 100 e 125%, de maneira eficiente.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p
- BREGONCI, I.S.; ALMEIDA, G.D.; BRUM, V.J.; ZINI JÚNIOR, A.; REIS, E.F. Desenvolvimento do sistema radicular do rabanete em condição de estresse hídrico. IDESIA (Chile) Volumen 26, Nº 1, Enero-Abril, 2008.
- CARVALHO, W. A., ESPÍNDOLA, C. R., PACCOLA, A. A. Legenda atualizada do Levantamento de Solos da Fazenda Lageado – Estação Experimental “Presidente Médice” Boletim CI. FCA/UNESP, Botucatu, n.1, 1983. 95 p. Legenda Complementar Atualizada, 2000.
- COSTA, C.C.; OLIVEIRA, C.D.; SILVA, C.J.; TIMOSSI, P.C.; LEITE, I.C. 2006. Crescimento, produtividade e qualidade de raízes de rabanete cultivadas sob diferentes fontes e doses de adubos orgânicos. Horticultura Brasileira, v. 24, p. 118-122.
- CREMASCO, C.P.; GABRIEL FILHO, L. R. A. ; PUTTI, F. F. ; LUDWIG, R. ; SILVA JUNIOR, J.F. . Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), São Pedro-SP. v. 54. p. 1-9, 2015.

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H. 1992. Efeitos da disponibilidade hídrica sobre o rendimento das culturas. In: BERGAMASCHI, H. (ed). Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: UFRGS, 1992. cap. 6, p. 85-96.

FILGUEIRA, F.A.R. 2003. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290.

FILGUEIRA, F.A.R. 2003. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290.

FILGUEIRA, F.A.R. Manual de olericultura: cultura e comercialização de hortaliças. São Paulo: CERES, v. 2, 1982. p. 62-65 1982.

GRIFFITHS, H.; PARRY, M. A. J. Plant Responses to Water Stress. Annals of Botany, v. 89, p. 801-802, 2002.

JANG, J. S. R.; SUN C. T. Neuro fuzzy modeling and control. Proceeding of IEEE, v.83, p.378-406, 1995.

JANG, J-R.R. Adaptive-network based fuzzy inference systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v.23, n.3:665-685, 1993.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wallmap 150cm x 200cm.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Irrigação por gotejamento do tomateiro industrial durante o estágio de frutificação, na região do cerrado. Horticultura Brasileira, v. 24, p. 342-346, 2006.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C.; SILVA, H.R. 2001. Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo. Brasília: Embrapa/CNPQ, 111 p.

MATHEWORKS The student edition of MatLab: version 4 user's guide. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 834 p.

MILLER, D.E.; MARTIN, M.W.. Effect of daily irrigation rate and soil texture on yield quality of russet bubank potatoes. American Potato Journal, v. 60, p. 745-757, 1983.

MINAMI, K.; CARDOSO, A.I.I.; COSTA, F.; DUARTE, F.R. 1998. Efeito do espaçamento sobre a produção em rabanete. Bragantia, v. 57, p. 169-173.

PEREIRA, A.J.; BLANK, A.F.; SOUZA, R.J.; OLIVEIRA, P.M.; LIMA, L.A. Efeito dos níveis de reposição e frequência de irrigação sobre a produção e qualidade do rabanete. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.1, p.117-120, 1999.

RIBEIRO, A. C. S.; FREITAS, A. L. P. Análise de regressão múltipla para identificação de fatores relevantes na qualidade do transporte rodoviário intermunicipal de passageiros. Caderno do IME- Série Estatística, v. 32, p.15-31, 2012.

SANTOS, J.C.C., SILVA, C.H., SANTOS, C.S., SILVA, C.S., MELO, E.B., BARROS, A.C. Análise de crescimento e evapotranspiração da cultura do rabanete submetido

a diferentes lâminas de água. *Revista Verde* (Mossoró – RN - BRASIL), v. 9, n.1, p. 151 -156, 2014.

SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; FILHO, M.C. M.T.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180–187, 2014.

SILVA, I. N.; SPATTI, S. H.; FLAUZINO R. A. *Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas*. São Paulo: Artliber, 2010. 399p.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering of ASCE*, v.118, n.6, p.977-980, 1992.

TANSCHKEIT, R.; GOMIDE, F. A. C.; TEIXEIRA, M. C. M. Modelagem e controle nebuloso. In: L. A. Aguirre (org). *Enciclopédia de Automática*. 1.ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2007. v.3, p.283-323.

TEJEDA, M. T.; ARREDONDO, J.; PÉREZ-STAPLES, D.; RAMOS-MORALES, P.; LIEDO, P.; DÍAZ-Fleischer, F. Effects of size, sex and teneral resources on the resistance to hydric stress in the tephritid fruit fly *Anastrepha ludens*. *Journal of insect physiology*, v. 70, p. 73-80, 2014.

ZADEH L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p.338- 353, 1965.

ZAVALA, A. A. Z.; BOLFARINE, H.; DE CASTRO, M. Consistent estimation and testing in heteroscedastic polynomial errors-in-variables models. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, v. 59, n. 3, p. 515-530, 2007.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM NEURO FUZZY DOS FATORES BIOMÉTRICOS DO RABANETE IRRIGADO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE

RESUMO: O rabanete é uma hortaliça de pequeno porte, robusta e comestível. A produção da cultura geralmente vem de pequenos e médios produtores, sendo que os mesmos a cultivam em grandes centros urbanos. O fato de estar sendo produzida em cidades, dá ao produtor a única alternativa, que é utilizar a irrigação. A cultura é muito suscetível a variações hídrica no solo, sendo que os dois extremos (saturação e estresse no solo), influenciam diretamente no seu desenvolvimento e produção. De acordo com a literatura o auge produtivo da cultura é alcançado quando lhe é oferecido a condição hídrica em torno de 100%. Portando as maneiras de otimização da água são de extrema importância não só para a produção da cultura, como também no contexto atual em relação a disponibilidade de água. O objetivo deste trabalho foi utilizar o sistema computacional neuro *fuzzy*, para estimar dez características biométricas do rabanete submetido a dois tratamentos de irrigação, um utilizando água convencional e o outro utilizando água magnetizada, cada um deles com cinco lâminas de irrigação (25, 50, 75, 100 e 125%). Os dez modelos neuro *fuzzy*, se comportaram de maneira satisfatória, possibilitando estimativas mais refinadas do que as encontradas no modelo de regressão quadrática de ordem 2, podendo ser observado os dados nas lâminas não estudadas, ou as que não foram aferidas experimentalmente. Concluindo que foi possível estimar os fatores biométricos do rabanete irrigado com água convencional e magnetizada, podendo esta ter perfeita aplicabilidade como ferramenta para tomadas de decisão, atribuindo aos dados valores muito próximos ao real.

Palavras-Chave: Hortícola, desenvolvimento do rabanete, ANFIS, lâmina de irrigação.

ABSTRACT: Radish is a small, robust and edible vegetable. The production of the crop usually comes from small and medium producers, and they grow it in large urban centers. The fact that it is being produced in cities, gives the producer the only alternative, which is to feed it with irrigation. The crop is very susceptible to soil water changes, and the two extremes (saturation and soil stress) directly influence its development and production. According to the literature, the productive peak of the

crop is reached when it is offered the water condition around 100%. Taking the ways of optimizing water is of extreme importance not only for the production of the crop, but also in the current context in relation to the availability of water. The objective of this work was to use the neural-fuzzy computational system to estimate ten biometric characteristics of the radish submitted to two irrigation treatments, one using conventional water and the other using magnetized water, each with five irrigation slides (25, 50, 75, 100 and 125%). The ten models behaved in a satisfactory manner, and the data on the slides not studied, the intermediaries, could be observed. Concluding that this type of modeling can help perfectly in decision making.

Keywords: Horticultural, Radish development, ANFIS, irrigation blade.

4.1 INTRODUÇÃO

O rabanete (*Raphanus sativus* L.), é uma hortalica de pequeno porte, possui uma raiz carnuda, com formato circular ou alongado, sendo esta a sua parte comestível (FILGUEIRA, 1982). A sua expressividade é mais comumente pequena e em termos de área plantada, pois é mais produzida em centros urbanos. Mesmo sendo uma cultura pouco importante em termos de dimensão de área plantada, pode ser utilizada como uma cultura intercelular, ocupando lugar de culturas de ciclos longos, pois o seu ciclo é curto, podendo ainda ser considerada uma planta relativamente rústica (MINANI et al., 1998). Geralmente o ciclo desta cultura se finda entre 23 e 28 dias, podendo ser acrescidos 10 dias a depender da cultivar e clima (FILGUEIRA, 1982).

A umidade e temperatura do solo pode ocasionar em diversas variações no desenvolvimento das plantas, comprometendo a produtividade e qualidade do sistema radicular (COSTA et al., 2006). O rabanete exige uma disponibilidade plena ou próxima de 100% de água no solo ao longo do seu ciclo (PEREIRA et al., 1999). Sendo que a saturação hídrica no solo prejudique a qualidade das raízes, promovendo rachaduras (FILGUEIRA, 2003). Quando submetido a estresse hídrico, fica lesionado em relação a morfologia, fisiologia e mais ainda nas interações bioquímicas (PEREIRA et al., 1999).

Conhecer os limites hídricos no desenvolvimento das culturas é de extrema importância, pois possibilita no manejo da irrigação, principalmente a respeito da otimização do uso da água que deve ser de maneira eficiente para fins produtivos (BREGONCI et al., 2008).

Geralmente, nas pesquisas realizadas nos setores de ciências agrárias, os dados coletados em área experimental ou em laboratório, são submetidos a testes estatísticos simples, ou seja, análise da média, variância, teste de Tukey, e extrapolados para gráficos de regressão polinomial de ordem 2, onde se permite analisar a curva de forma pouco refinada.

O sistema *fuzzy* proposto por Zadeh (1965), é capaz de processar fenômenos complexos, para isto é necessário a ajuda de um especialista para a elaboração das regras utilizadas para confecção do modelo. Ao contrário da complexidade de interpretação dos modelos matemáticos, a lógica *fuzzy* oferece facilidade na interpretação de fenômenos de várias áreas (GABRIEL FILHO, 2015). Cremasco et al. (2010), avaliou o consumo de energia elétrica em empresas de avicultura de postura, Rezende et al. (2012), trabalhou com *fuzzy*, na temperatura do ar utilizado para secagem de grãos. Alguns estudos foram feitos recentemente na área agrônômica utilizando esta técnica (GABRIEL FILHO et al., 2015; RODRÍGUEZ et al., 2016; PUTTI et al., 2017; VIAIS NETO, 2016).

As redes neurais artificiais, são de um sistema semelhante ao cérebro humano, tendo a capacidade de aprendizagem (SILVA et al., 2010). A interação destes dois sistemas (*fuzzy* + redes neurais artificiais), resultam na *neuro fuzzy* (ANFIS), estes dois sistemas são capazes de explicar conjuntos de dados complexos com comportamento não lineares. A junção destes dois sistemas intenciona estimar e prever, informações complexas.

Estudos utilizando modelagem *neuro fuzzy*, vem ocupando grande espaço na área agrônômica, com aplicabilidade em ciências do solo, regimes hídricos, desenvolvimento de cultura e também para tomadas de decisões na agricultura de precisão (Huang et al., 2010). Benini (2007), avaliou a técnica para estimar a densidade do solo, Alves et al. (2011), utilizou o híbrido para estimar a severidade da ferrugem na soja, Yilmaz & Kaynar (2011), trabalhou com a absorção da água no solo, Silva et al. (2014) obteve resultados eficientes na estimativa da produção do trigo em função de adubação nitrogenada.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi estimar os fatores biométricos da cultura do rabanete, irrigado com água magnetizada (AM) e irrigado com água convencional (AC), em cinco diferentes tensões de água (25, 50, 75, 100 e 125%), utilizando modelo de predição *neuro fuzzy*, para estimativa de fatores não medidos.

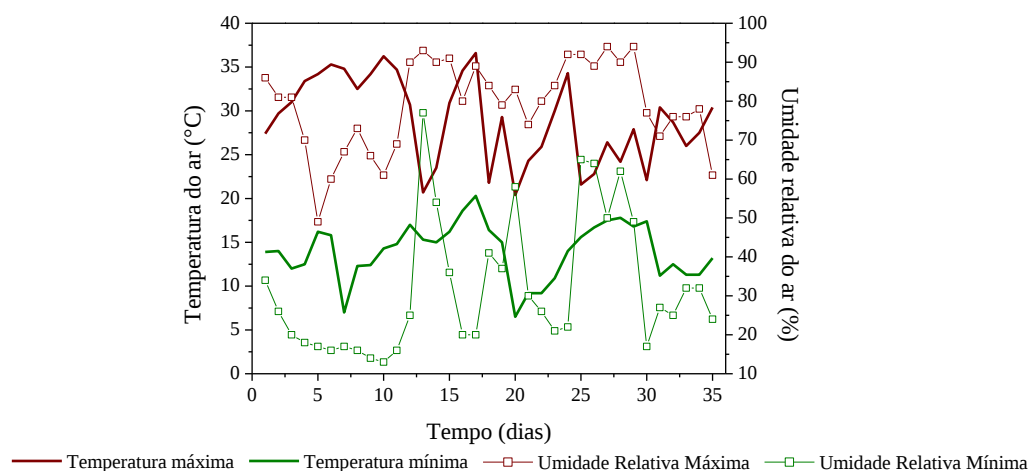
4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Material

Para desenvolvimento das modelagens deste trabalho, utilizou-se *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), para treinamento dos dados coletados por Cremasco et al. (2015).

A coleta dos dados biométricos da cultura do rabanete foi feita 35 dias após transplântio, a variedade utilizada foi maçarias n°19, o experimento seguiu-se em casa de vegetação implantada na Fazenda experimental da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP-Botucatu/SP (22°53'S latitude, 48°26'W longitude e 786m de altitude). A classificação climática de Köppen a define como Cwa, com clima tropical de altitude, verão quente, úmido e com alta precipitação e inverno seco, com temperatura média no período de verão acima de 22°C. Os dados climáticos foram medidos diariamente dentro da casa de vegetação (Figura 1).

Figura 1. Dados climáticos no interior da casa de vegetação.



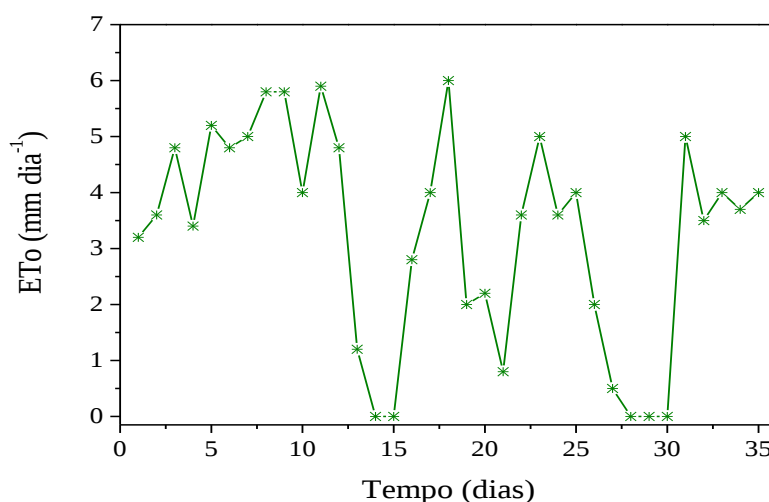
A correção do solo foi feita, através de análise química dos atributos do solo, efetuada antes da instalação do experimento, obtidos os seguintes valores: Para macronutrientes: 5,9 de pH em CaCl₂, 24 g dm⁻³ de matéria orgânica, 191 mg dm⁻³ de P (resina), 25, 68, 4,8 e 17 mmolc dm⁻³ de Mg, Ca, K e H+Al respectivamente, e 67% de saturação por base. Para micronutrientes: zinco, cobre, manganês, boro, ferro, 8, 4,8, 10,10, 0,51 e 20 mmolc dm⁻³ respectivamente.

O delineamento experimental dos dados coletados foi casualizados 2x5 com cinco repetições de plantas, em que foram submetidos a duas condições de reposição

hídrica, um irrigado com água convencional e o outro com água magnetizada, em cada tratamento houve cinco lâmina de Irrigação, com relação a evapotranspiração de cultura (Etc), de acordo com coeficientes para a cultura do rabanete orientados pela FAO 56, sendo fixado 0,60 no início do ciclo, 1,15 na fase de desenvolvimento vegetativo e 0,8 na fase final do ciclo (ALLEN et al., 1998).

A irrigação foi feita pelo sistema localizado (gotejamento), a reposição foi de acordo com a evapotranspiração, medida diariamente, obtida através de um tanque classe A, conforme metodologia de Snyder (1992). Gráfico 2, ilustra a evapotranspiração ao longo do ciclo do rabanete.

Figura 2. Evapotranspiração diária (mm).



A partir da obtenção da perda de água para a atmosfera (evapotranspiração), eram calculados para cada lâmina pré-definida (25, 50, 75, 100 e 125% *Etc), para cada tratamento (irrigação convencional e magnetizada).

Ao final do ciclo do rabanete (35 dias após transplante), iniciaram-se as coletas biométricas, que foram utilizados como dados de entrada neste trabalho: Número de Folhas; Massa Fresca das folhas; Massa Seca das Folhas; Comprimento da Raiz; Massa Fresca das Raízes; Massa Seca das Raízes; Diâmetro do Bulbo; Comprimento do Bulbo; Massa Fresca do Bulbo e Massa Seca do Bulbo.

4.2.2 Modelagem Neuro *fuzzy* (ANFIS) para obtenção dos dados biométricos do rabanete

O sistema ANFIS é resultado da junção de dois modelos, ele pode ser entendido como um sistema de interferência *fuzzy*, treinado por redes neurais

artificiais (CHAVES, 2013). A finalidade da união destes modelos é aperfeiçoar o sistema minimizando as deficiências particulares de cada um deles e unindo a eficiência de ambos (FULLÉR, 1995).

A integração destes dois modelos, é capaz de resultar em uma arquitetura homogênea, a qual o sistema *fuzzy* ‘aprende’ fazendo o uso de algoritmo de treinamento com base na modelagem das redes neurais artificiais (CALDEIRA, 2007).

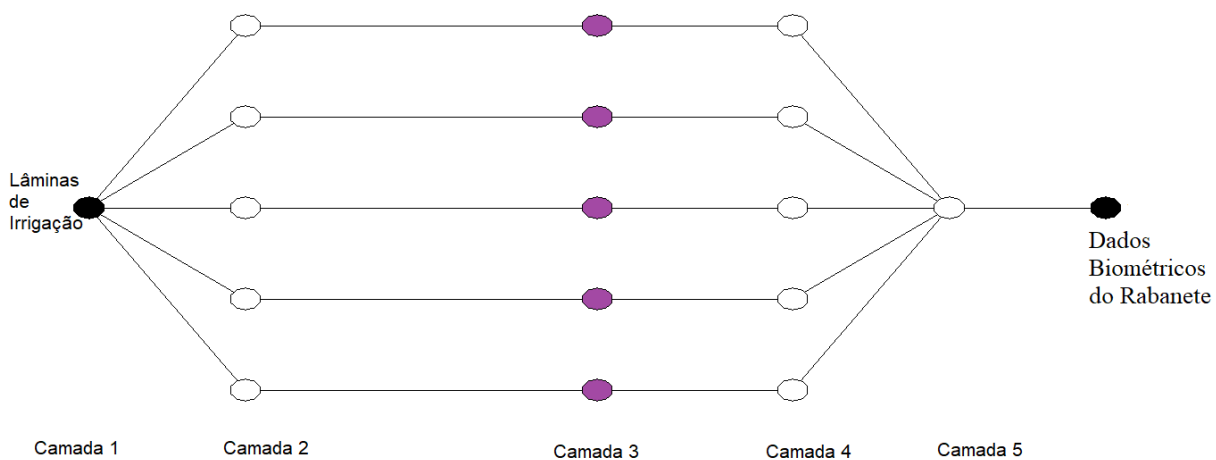
O sistema de interferência neuro *fuzzy*, proposto por Jang (1993), suporta este sistema de ordem um ou zero, conforme modelagem tipo Takagi-Sugeno, onde considera várias variáveis de entrada e somente uma variável de saída. Este modelo é composto por duas bases de regras:

“Regra 1: Se x_1 é A_1^1 e x_2 é A_2^1 , então $f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$ ”

“Regra 2: Se x_1 é A_1^2 e x_2 é A_2^2 , então $f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$ ”

O qual pode ser ilustrado pela Figura 3.

Figura 3. Arquitetura típica de uma modelagem neuro *fuzzy*.



Fonte: Autora.

O sistema ANFIS é composto por 5 camadas (Figura 3), cada uma delas apresenta uma função diferente, sendo que cada nó, permanecem executando tarefas semelhantes dentro de suas respectivas camadas. Somente as camadas 1 e 4 são adaptativas, e ainda seus valores são parcialmente dependentes dos parâmetros antecedentes e consequentes da regra em execução (BENINI, 2007).

A modelagem matemática proposta, permite a determinação da quantidade de funções de pertinência do modelo, a caracterização do conjunto de regras *fuzzy* não

linear e por fim, a determinação dos parâmetros de ajuste, caracterizado como raios de vizinhança de centros de agrupamentos, por meio de técnica desenvolvida por Chiu (1996), em que separa o conjunto de dados em relação a entradas e saídas.

Para elaboração do modelo foi feito o uso do *software* MATLAB® 7.0 (MATWORKS, 1995), por meio do sistema *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*, proveniente do *Fuzzy Logic Toolbox*, agregado ao programa.

Os dados selecionados com totalidade nos três processos: treinamento, checagem e validação, geralmente os dados são particionados aleatoriamente em 70% para treinar e 30% para checagem, esta técnica é utilizada quando se pretende ter uma previsão de dados. O presente trabalho intencionou estimar os teores biométricos intermediários, ou seja, os valores não medidos de todos os dados analisados, portanto, os três processos mencionados foram feitos de forma total, ou seja, utilizou-se 100% dos dados para aquisição do modelo. Seguindo abaixo os dados médios de entrada no sistema (Tabela 1).

Tabela 1. Dados medidos de treinamento da análise biométrica do rabanete em função da lâmina de irrigação.

Dados de entrada	Água Convencional (%)					Água Magnetizada (%)				
	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125
Número de Folhas	6,9	6,9	6,6	6,1	5,8	8,1	7,7	7,3	7,3	7,5
Massa Fresca das Folhas (g)	21	19	29	12	14	31	38	32	29	34
Massa Seca das Folhas (g)	3	2,2	2,1	1,4	1,1	2,3	2,3	2,4	2,7	2,8
Comprimento da Raiz (mm)	46	45	48	35	35	46	45	41	43	53
Massa Fresca das Raízes (g)	1,7	1,2	1,4	1,1	0,6	1	1,1	1	1,1	1,1
Massa Fresca das Raízes (g)	1,2	1,5	0,9	0,7	0,6	1,2	1,4	1,2	1,4	1,3
Diâmetro do Bulbo (mm)	40	49	45	41	15	48	49	46	52	50
Comprimento do Bulbo (mm)	28	24	21	21	34	25	29	26	26	27
Massa Fresca do Bulbo (g)	21	14	25	32	14	27	29	33	37	39
Massa Seca do Bulbo (g)	1,2	1,1	1,7	0,7	0,7	1,8	2	1,6	1,5	1,7

Posterior ao carregamento dos dados no *software*, foi selecionado o número de funções de pertinência de entrada, para estimativa dos fatores biométricos do rabanete irrigado com dois tipos de água (AC e AM), que neste caso foi em forma de sino generalizada (gbellmf). Seguidamente foi feita a determinação das funções de pertinência bem como as variáveis de saída.

No presente estudo, consideram-se, como entrada do sistema ANFIS, a reposição hídrica, de acordo com o percentual pré-definido de lâmina de irrigação.

Tendo como finalidade, comparar as estimativas encontradas a partir da regressão quadrática polinomial, com as encontradas pela modelagem matemática ANFIS.

A conjunto de dados utilizados para elaboração dos modelos dos fatores biométricos do rabanete com água convencional, foram provenientes do capítulo 3 deste trabalho, em que serão, portanto, analisados juntamente com os dados obtidos com a irrigação com água magnetizada.

As variáveis de entrada para treinamento do modelo, foi por meio da variável de entrada: Lâmina de Irrigação, e variáveis de saída: Número de Folhas; Massa Fresca das folhas; Massa Seca das Folhas; Comprimento da Raiz; Massa Fresca das Raízes; Massa Seca das Raízes; Diâmetro do Bulbo; Comprimento do Bulbo; Massa Fresca do Bulbo e Massa Seca do Bulbo. (Tabela 1).

Para confecção do modelo seguiu-se as seguintes fases:

- Preparo do arquivo de treinamento, utilizando a Tabela 1.
- Inserindo os arquivos de treinamento no sistema;
- Elaborando as funções de pertinência: número e tipos nas entradas e saídas;
- Selecionando o método de treinamento híbrido (redes neurais + *fuzzy*) ANFIS.

4.2.3 Análise do desempenho do modelo

Após escolha do melhor modelo neuro *fuzzy*, avaliou-se a performance dos resultados das modelagens de estimativas dos valores biométricos encontrados na cultura do rabanete, por meio do erro do quadrado médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação (r^2) e Qui-quadrado.

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

$$MAE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (2)$$

$$\chi_c^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(y_k - \hat{y}_k)^2}{\hat{y}_k} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (4)$$

sendo que: y_i e y'_i : vetores desejado e observado; n: número de pares de entrada-saída do vetor usado no treinamento.

Os índices estatísticos, tem por finalidade analisar o desempenho do modelo de forma particular para cada um deles. O *RMSE*, quantifica a variabilidade dos dados analisados, o qual pode ser interferido devido ao seu método de cálculo (quadrado

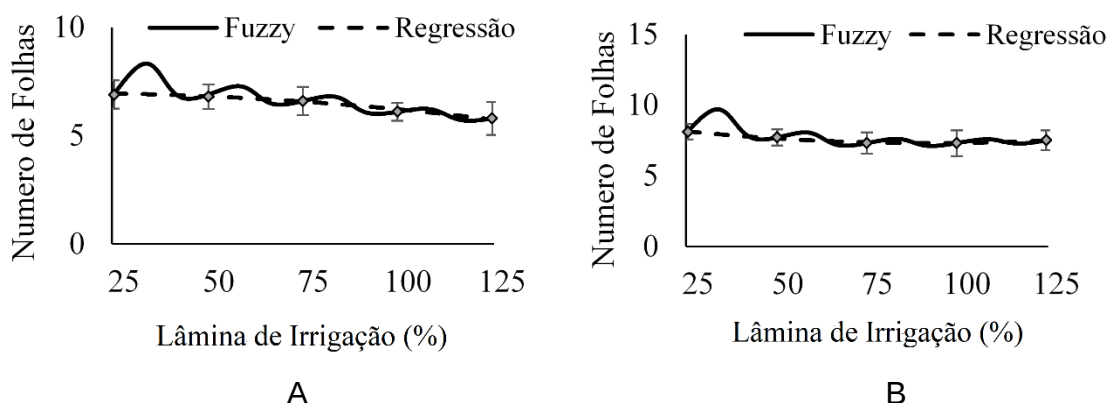
dos resíduos do conjunto de dados). O *MAE*, geralmente pode ‘resolver’ o problema anterior, pois considera o erro absoluto dos conjuntos de dados. O teste do Qui-quadrado, foi utilizado para avaliar a frequência dos dados obtidos de forma não paramétrica. E por fim, foi feito o coeficiente de determinação que tem por finalidade avaliar o ajuste do modelo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados obtidos por Cremasco et al. (2015), foram feitas as curvas matemáticas para cada fator biométrico definido, sendo: Número de Folhas; Massa Fresca das folhas; Massa Seca das Folhas; Comprimento da Raiz; Massa Fresca das Raízes; Massa Seca das Raízes; Diâmetro do Bulbo; Comprimento do Bulbo; Massa Fresca do Bulbo e Massa Seca do Bulbo, em todas as figuras, as imagens provenientes do capítulo 3, são classificadas como A.

Para tanto, os modelos seguem ilustrados nas Figuras de 2 a 11, onde as linhas tracejadas representam a regressão quadrática de grau 2 e as de linhas contínuas representam a curva neuro *fuzzy*, para os dois tratamentos de irrigação, com água convencional (lado esquerdo das figuras) e água magnetizada (lado direito das figuras), para fins de quantificar os valores em locais não medidos das lâminas utilizadas.

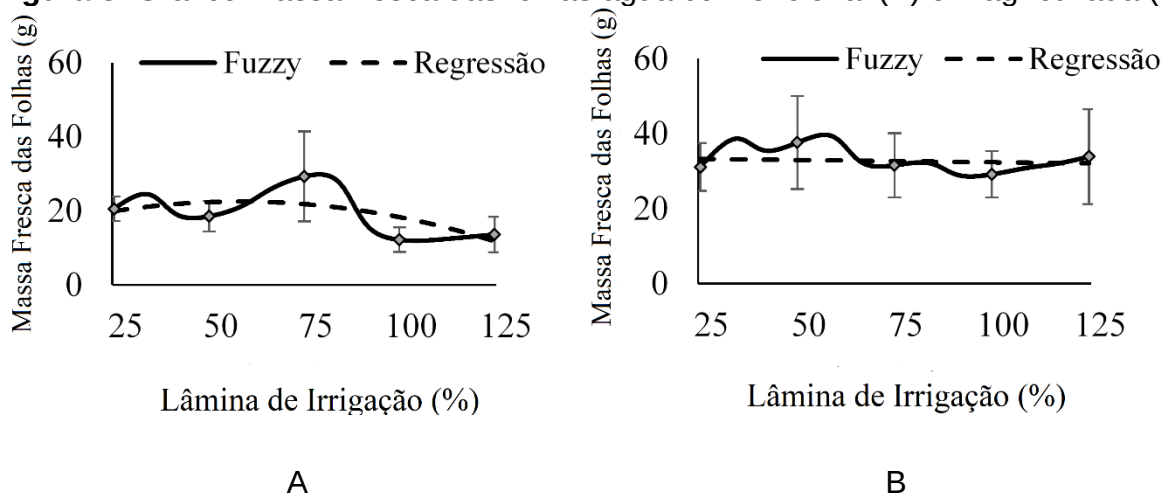
O número de folhas (Figura 4), em média obtidos pelo tratamento com água convencional, comportou-se de forma sutilmente decrescente, ou seja, conforme aumento de lâmina houve a diminuição do número de folhas na planta. Já no tratamento com água magnetizada os dados se comportaram de forma semelhante ao longo das diferentes lâminas, onde foi obtido o número de folhas muito parecidos em todas as lâminas.

Figura 4. Gráfico do número de folhas água convencional (A) e magnetizada (B).

As duas curvas obtiveram comportamentos semelhantes em ambos tratamentos, a regressão foi mais sutil e a ANFIS teve um comportamento um pouco variável, explicado pelo fato deste sistema considerar os desvios dos dados ao redor da média.

As variações hídricas do solo, afetam diretamente a parte área das plantas, sendo elas, as primeiras a sentirem os efeitos em suas nas células, por consequente, a diminuição das taxas fotossintéticas (BRANDES et al., 1973; STONE et al., 1988), de maneira geral, o tratamento com água magnetizada obteve um maior número de folhas.

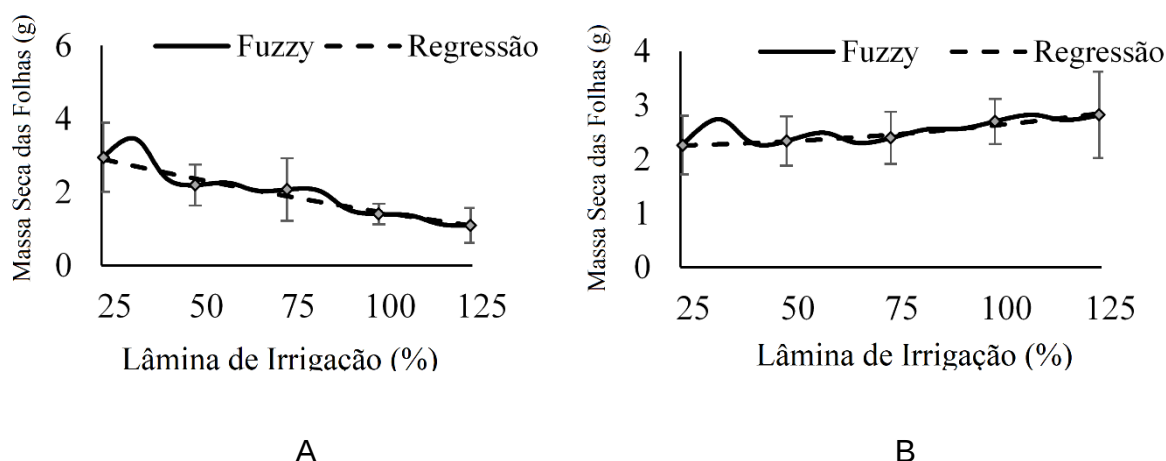
A massa fresca das folhas no tratamento com água convencional, se mostrou maior na lâmina de 75%, nas duas curvas (Regressão e ANFIS), porém, a segunda passou exatamente explicando que a maior massa esteve na lâmina de 82% (Figura 5).

Figura 5. Gráfico massa fresca das folhas água convencional (A) e magnetizada (B).

Conforme exposto, o comportamento da linha de regressão com relação ao número de folhas obteve as curvas na forma semelhante ao sino, atribuído maior número de folhas próximo ao centro do gráfico (em torno da lâmina de 75%) e menores números nas extremidades (25% e 125%). No tratamento com água convencional a curva da regressão quadrática foi da forma de um sino, e no tratamento com água magnetizada a curva foi quase reta, o que indica pouca variação na massa fresca das folhas nas diferentes lâminas com massa muito parecido entre as duas extremidades analisadas, 25 e 125% (Figura 3). Contudo, a ANFIS mostrou que a maior massa foliar na lâmina de 83% no tratamento convencional e na lâmina de 59% na magnetizada. Com tudo, foi possível observar que a irrigação com água tratada magneticamente, no geral, obteve maior massa fresca foliar do que no tratamento com água convencional.

A massa seca das folhas, está diretamente relacionado a quantidade de água retirada da mesma. Conforme Figura 6, é possível notar que o comportamento das curvas do tratamento com água convencional foi decrescente, quanto maior a lâmina mais leve as folhas, ocorrendo o inverso no tratamento irrigado com água magnetizada, em que conforme aumento de lâmina maior massa foliar.

Figura 6. Massa Seca das folhas água convencional (A) e magnetizada (B).



A linha continua (ANFIS) mostra pequenas oscilações ao longo da curva, devido ao fato de considerar o desvio padrão dos pontos específicos. No tratamento com água convencional o peso máximo encontrado foi de 3,0g (25%) e mínima de 1,1g (125%), e com água magnetizada mínima em 2,3 g (25%) e máxima 2,8 g (125%).

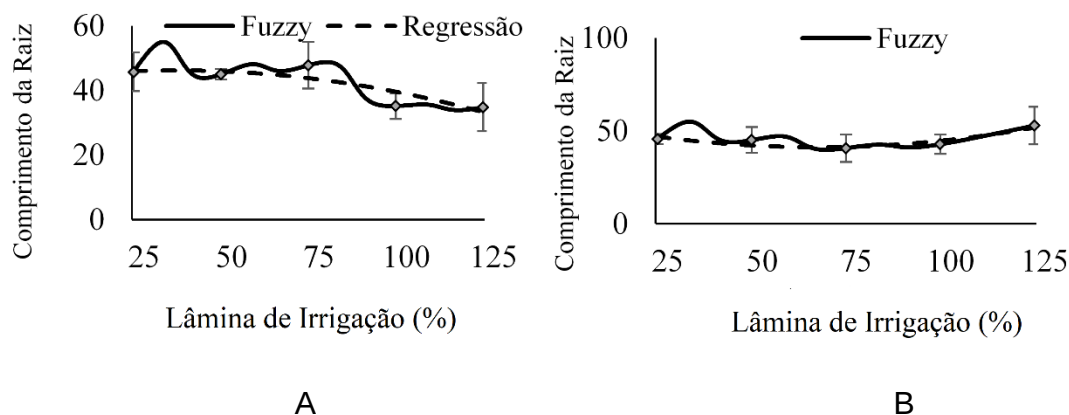
O desenvolvimento foliar da planta está diretamente ligado a capacidade de absorção de água no solo, ou seja, a disponibilidade hídrica do mesmo, podendo ser explicada pelo fechamento estomático e consequentemente a diminuição da atividade fotossintética (KRAMER & BOYER, 1995).

A produção e desenvolvimento das raízes podem ser prejudicadas, quando expostas a baixa umidade do solo (COSTA et al., 2006). Por outro lado, o excesso hídrico pode prejudicar o sistema radicular do rabanete, ficando propenso a rachaduras (FILGUEIRA, 2003).

O comportamento do sistema radicular do rabanete nestes dois tratamentos, em relação ao percentual de reposição, foi levemente distinto, quando avaliado a mesma a lâmina de água aplicada em ambos.

O comprimento da raiz ao ser irrigado com água convencional, alcançou o maior número quando a reposição hídrica foi de 84% com comprimento de 48,22 cm, e o menor em lâmina de 100% resultando 35,2 cm (Figura 7).

Figura 7. Gráfico do comprimento da raiz água convencional água (A) convencional e magnetizada (B).



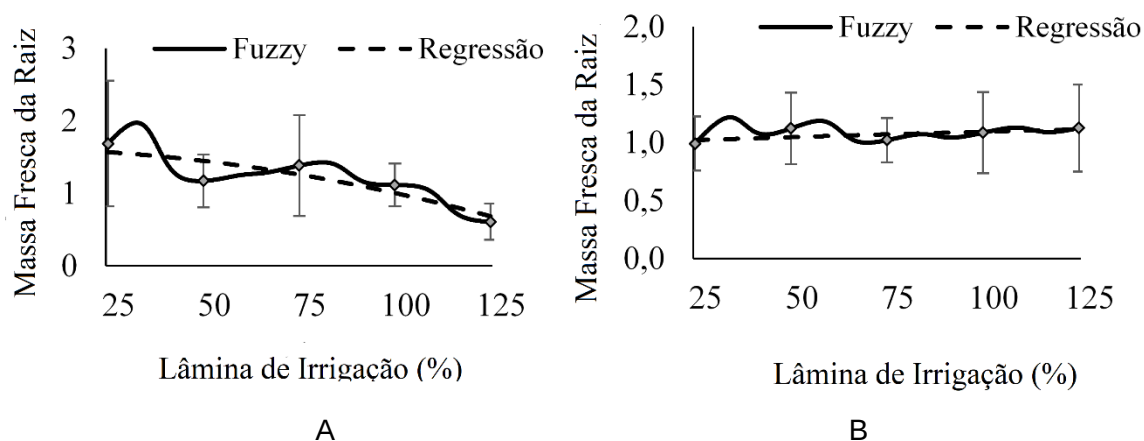
O tratamento irrigado com água magnetizada, ofereceu um valor maior no comprimento da raiz, na lâmina de 125%, chegando a 52,8 mm (Figura 5).

A modelagem *fuzzy*, possibilitou visualizar que o comprimento da raiz com água convencional, se desenvolve melhor nas lâminas entre 75 e 85%, já com água magnetizada a partir da lâmina de 60% se comporta de forma crescente até 125%.

A massa fresca das raízes em média foi maior no tratamento de 25% de reposição hídrica com água convencional (Figura 8). De acordo com o modelo ANFIS,

o peso maior seria quando lâmina fosse 34%, e começa a ter queda constante quando irrigada com lâmina de 84%, chegando ao peso de 0,6 na reposição de 125%.

Figura 8. Gráfico da massa fresca das raízes água convencional (A) e magnetizada (B).



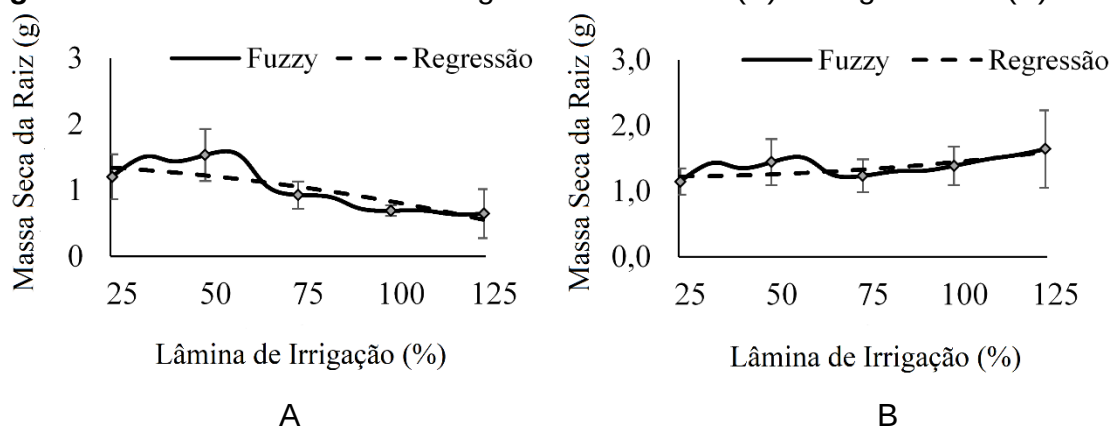
Na regressão quadrática polinomial, a massa fresca das raízes é decrescente na irrigação convencional, conforme aumento de reposição hídrica diminui o peso da raiz, sendo que em nenhuma vez a curva consegue atingir o valor medido, isto se dá pelo fato dela não considerar o desvio padrão dos dados.

No tratamento com água magnetizada, a massa fresca da raiz, foi levemente crescente, quando se observa a regressão quadrática, ao analisar a curva do modelo neuro *fuzzy*, nota-se que o maior peso foi também na lâmina de 34%, com 1,6 e com menor em 100% resultando em 1,1 de peso médio de massa verde (Figura 8).

De modo geral, a massa fresca da raiz, foi maior no tratamento irrigado com água convencional dando diferença da máxima alcançada entre os dois de 0,40 g, e da menor de 0,60 g.

Em relação a análise feita com a massa seca da raiz, o tratamento com água convencional (Figura 9), a curva quadrática teve um comportamento decrescente, em que a lâmina de 25% teve 1,34 g e na 125% com 0,6 gramas.

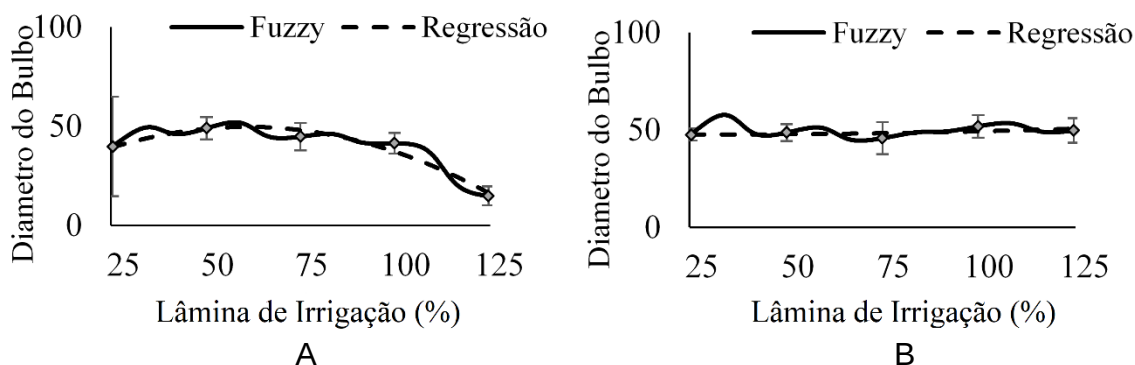
A curva obtida por ANFIS teve a maior quantidade de matéria seca na parcela com 58% de reposição com peso de 1,58 gramas e menor na lâmina de 125% tendo 0,6 gramas.

Figura 9. Massa seca das raízes água convencional (A) e magnetizada (B).

O peso de matéria seca do tratamento com água magnetizada (Figura 9) de acordo com a curva de regressão quadrática, foi crescente tendo menor valor na reposição de 25% (1,1g) e maior na de 125% (1,6 g)

O modelo ANFIS possibilitou visualizar que a reposição em 58% obteve um peso (1,52 g) muito próximo da reposição máxima de 125% (1,6 g), explicando que a água magnetizada permite um desenvolvimento muito parecido com a quantidade excessiva e ainda tendo maior massa na irrigação plena (100%), que obteve peso de 1,4 gramas.

De acordo com a curva de regressão quadrática, o diâmetro do bulbo alcançou as maiores proporções em torno de 75% de lâmina aplicada (Figura 10). A falta de disponibilidade hídrica no solo afeta de maneira negativa o diâmetro do bulbo da cultura do rabanete (BREGONCI et al., 2008). A modelagem ANFIS encontrou o maior diâmetro do bulbo na lâmina de 58% com 51.

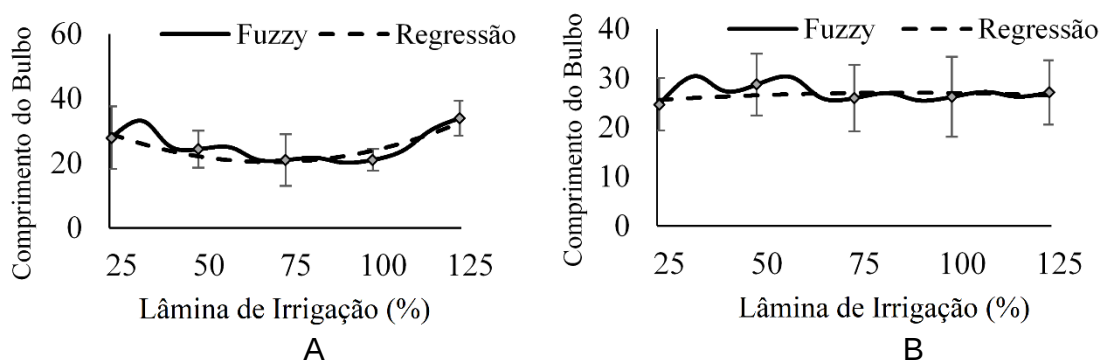
Figura 10. Gráfico do diâmetro do bulbo água convencional (A) e magnetizada (B).

O diâmetro do rabanete encontrado no tratamento com água magnetizada, foi no geral, maior do que com água convencional (Figura 8). A partir da curva tracejada, é possível observar que o resultado de diâmetros do bulbo das respectivas lâminas, se comportaram de forma semelhante mesmo com diferentes lâminas de reposição, tendo 47,6 cm na reposição de água em 25% e 49,7 em 125%.

Na curva ANFIS o modelo se comportou de maneira um pouco diferente, pois considerou a variação nas dentro de cada repetição, obtendo na lâmina de 100% de reposição um diâmetro de 53,5 mm, e o menor na reposição de 68% com 44,58 mm. Os diâmetros foram maiores no tratamento irrigado com água magnetizada.

Conforme análises das curvas do comprimento do bulbo no tratamento com água convencional, a linha tracejada apresentou os maiores valores nas extremidades, ou seja, nas lâminas de 25% e 125% de reposição hídrica (Figura 11). De acordo com os desvios nos dados, a modelagem ANFIS, o comprimento do bulbo se comportou de forma crescente a partir da lâmina 94%, no tratamento com água convencional provou que o menor diâmetro foi na lâmina de 100%.

Figura 11. Gráfico do comprimento do Bulbo com água convencional e água magnetizada.



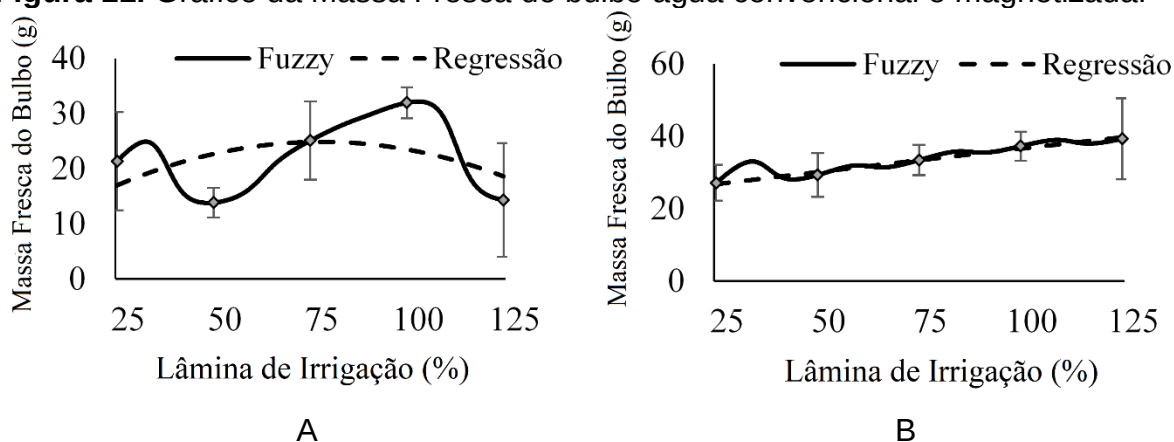
De acordo com a Figura 11, nota-se que a variação nos comprimentos do tratamento com água magnetizada foi considerável, porem as suas respectivas medias obteve valores mais próximos, em ambas as curvas. Sendo que na de regressão polinomial a menor foi em 25% e a maior em 125%, com diferença de 0,24 mm. Através da curva do modelo híbrido *fuzzy* o maior comprimento foi na lâmina de 36% e muito próximos nas lâminas de 25%, 60% e 125%.

A massa fresca do bulbo determina a produtividade do rabanete, de acordo com a literatura, o rabanete tem maior produtividade quando tem disponibilidade plena de água no solo. Com base na curva de regressão polinomial do rabanete irrigado

com água convencional, a cultura teve maior produção quando a reposição foi em 75%, e muito parecida nas extremidades do gráfico, em 25 e 125% de lâmina (Figura 11).

O modelo ANFIS, mostrou menor produção na lâmina de 50% irrigado (Gráfico 9b) com água magnetizada, segundo Bregonci et al. (2008), a cultura se apresenta muito sensível a lâmina inferior a 100%. O gráfico ainda mostra que a produção se comporta de forma crescente a partir da reposição em 75%, começando a diminuir a partir da lâmina de 108%.

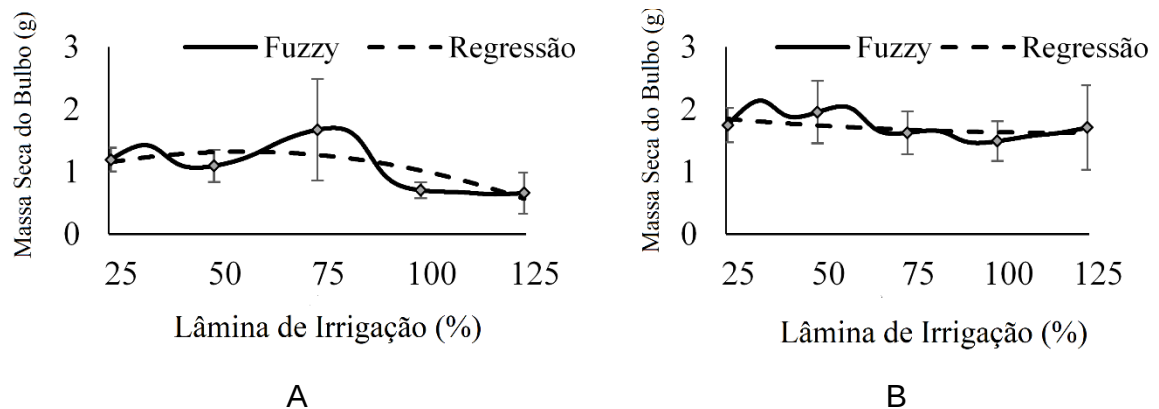
Figura 11. Gráfico da Massa Fresca do bulbo água convencional e magnetizada.



No tratamento irrigado com água convencional, a produção do rabanete foi maior em todas as lâminas, onde as curvas ainda se comportaram de maneira crescente, ou seja, quando maior a disponibilidade hídrica, maior produtividade. A produção encontrada com lâmina de 100% irrigada com água convencional, foi igual a lâmina de 60% irrigada com água magnetizada, portanto, entende-se que o uso da água magnetizada tem uma economia de 40% de água, neste caso, ao comparar a produção máxima entre os dois tratamentos encontra-se uma vantagem de 9Kg na irrigada com água convencional, encontradas nas lâminas de 100% e 125%.

A massa seca do bulbo se dá a retirada de água do bulbo verde, com isto é possível saber a quantidade de matéria seca. Como ilustra a figura abaixo.

Figura 12. Massa seca do bulbo água convencional e magnetizada



A massa seca encontrada no tratamento com água convencional, conforme com a linha tracejada, obteve o menor valor na lâmina de 125% e maior na de 75%. A curva ANFIS, o menor valor obtido foi na reposição de 100 a 125% de água.

As curvas para o tratamento com água magnetizada, obteve uma curva quase reta, apresentando erros em relação aos valores reais, valor mínimo da massa do bulbo foi encontrado na reposição de 75% de água e máxima nas lâminas de 25% e 35%. No modelo ANFIS, o maior peso da massa seca de bulbo foi encontrado na lâmina de 58%, o qual considerou as variações dos dados estudados.

O após treinamento e validação de cada modelo, foi feito os índices estatísticos Qui-Quadrado (χ^2), coeficiente do modelo (R^2), erro do quadrado médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Índices estatísticos dos modelos ANFIS dos dados biométricos do rabanete irrigado com água convencional.

Variáveis	Índices	Neuro fuzzy	Regressão polinomial	Equação Regressão
Número de Folhas	χ^2	1.289 (p=1)	1.291 (p=1)	$y = -0.00009.x^2 + 0.002.x + 6.96$
	R^2	0.364 (p=0.0014)	0.36 (p=0.0015)	
	RMSE	0,557	0,559	
	MAE	0,476	0,485	
Comprimento da Raiz (mm)	χ^2	15.803 (p=0.8951)	19.996 (p=0.697)	$y = -0.002.x^2 + 0.124.x + 43.92$
	R^2	0.543 (p=0)	0.408 (p=0.0006)	
	RMSE	5,1	5,81	
	MAE	4,125	4,438	
Diâmetro do Bulbo (mm)	χ^2	65.459 (p=0)	69.781 (p=0)	$y = -0.008.x^2 + 0.978.x + 19.985$
	R^2	0.543 (p=0)	0.52 (p=0)	
	RMSE	10,975	11,246	
	MAE	6,478	7,438	
Comprimento do Bulbo (mm)	χ^2	37.769 (p=0.0366)	41.271 (p=0.0156)	$y = 0.004.x^2 + -0.587.x + 41.11$
	R^2	0.39 (p=0.0008)	0.336 (p=0.0024)	
	RMSE	6,073	6,339	
	MAE	4,916	5,022	
Massa Fresca da Raiz (g)	χ^2	4.029 (p=1)	4.475 (p=1)	$y = -0.00005.x^2 + -0.0009.x + 1.625$
	R^2	0.341 (p=0.0022)	0.274 (p=0.0073)	
	RMSE	0,492	0,517	
	MAE	0,382	0,369	
Massa Fresca da Folha (g)	χ^2	37.211 (p=0.0417)	64.702 (p=0)	$y = -0.002.x^2 + 0.276.x + 14.474$
	R^2	0.525 (p=0)	0.206 (p=0.0227)	
	RMSE	5,77	7,457	
	MAE	4,263	5,187	
Massa Fresca do Bulbo (g)	χ^2	57,277 (p=0,0002)	125.262 (p=0)	$y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
	R^2	0,537 (p=0)	0.104 (p=0.116)	
	RMSE	6,332	8,808	
	MAE	5,135	7,831	
Massa Seca da Raiz (g)	χ^2	1.929 (p=1)	2.383 (p=1)	$y = -0.00004.x^2 + -0.001.x + 1.403$
	R^2	0.602 (p=0)	0.431 (p=0.0004)	
	RMSE	0,271	0,324	
	MAE	0,223	0,244	
Massa Seca da Folha (g)	χ^2	3.979 (p=1)	3.986 (p=1)	$y = 0.00004.x^2 + -0.024.x + 3.479$
	R^2	0.541 (p=0)	0.523 (p=0)	
	RMSE	0,599	0,611	
	MAE	0,479	0,474	
Massa Seca do Bulbo (g)	χ^2	3.05 (p=1)	3.877 (p=1)	$y = -0.0002.x^2 + 0.019.x + 0.787$
	R^2	0.49 (p=0.0001)	0.259 (p=0.0093)	
	RMSE	0,378	0,456	
	MAE	0,266	0,313	

Tabela 3. Índices estatísticos dos modelos ANFIS dos dados biométricos do rabanete irrigado com água magnetizada.

Variável	Índices	Modelo <i>fuzzy</i>	Regressão polinomial	Equação Regressão
Número de Folhas	χ^2	1,354 (p=1)	1,362 (p=1)	
	R ²	0,182 (p=0,0337)	0,178 (p=0,0358)	$y = 0,0002.x^2 + -0,034.x + 8,86$
	RMSE	0,636	0,637	
	MAE	0,48	0,484	
Comprimento da Raiz (mm)	χ^2	20,112 (p=0,6904)	21,447 (p=0,6123)	
	R ²	0,304 (p=0,0043)	0,252 (p=0,0106)	$y = 0,003.x^2 + -0,426.x + 55,553$
	RMSE	6,21	6,441	
	MAE	4,794	4,746	
Diâmetro do Bulbo (mm)	χ^2	13,14 (p=0,9638)	15,066 (p=0,9188)	
	R ²	0,134 (p=0,0721)	0,04 (p=0,3398)	$y = 0,0003.x^2 + -0,017.x + 47,827$
	RMSE	5,172	5,445	
	MAE	4,189	4,375	
Comprimento do Bulbo (mm)	χ^2	38,717 (p=0,0292)	41,02 (p=0,0166)	
	R ²	0,048 (p=0,2933)	0,007 (p=0,6911)	$y = -0,0004.x^2 + 0,065.x + 24,185$
	RMSE	5,954	6,08	
	MAE	4,888	4,871	
Massa Fresca da Raiz (g)	χ^2	1,954 (p=1)	1,972 (p=1)	
	R ²	0,039 (p=0,3437)	0,014 (p=0,5691)	$y = -0,000002.x^2 + 0,001.x + 0,994$
	RMSE	0,268	0,272	
	MAE	0,225	0,23	
Massa Fresca da Folha (g)	χ^2	51,196 (p=0,001)	54,528 (p=0,0004)	
	R ²	0,101 (p=0,1207)	0,002 (p=0,8267)	$y = 0,000009.x^2 + -0,013.x + 33,583$
	RMSE	8,632	9,097	
	MAE	6,989	6,871	
Massa Fresca do Bulbo (g)	χ^2	27,361 (p=0,2879)	27,906 (p=0,264)	
	R ²	0,376 (p=0,0011)	0,371 (p=0,0012)	$y = -0,00006.x^2 + 0,138.x + 23,306$
	RMSE	5,936	5,959	
	MAE	4,591	4,691	
Massa Seca da Raiz (g)	χ^2	1,661 (p=1)	1,799 (p=1)	
	R ²	0,218 (p=0,0187)	0,137 (p=0,0686)	$y = 0,00003.x^2 + -0,001.x + 1,234$
	RMSE	0,324	0,341	
	MAE	0,249	0,259	
Massa Seca da Folha (g)	χ^2	2,719 (p=1)	2,76 (p=1)	
	R ²	0,161 (p=0,0468)	0,154 (p=0,0522)	$y = 0,00004.x^2 + 0,000005.x + 2,233$
	RMSE	0,498	0,5	
	MAE	0,396	0,402	
Massa Seca do Bulbo (g)	χ^2	2,101 (p=1)	2,269 (p=1)	
	R ²	0,128 (p=0,0792)	0,036 (p=0,3644)	$y = 0,00003.x^2 + -0,006.x + 1,979$
	RMSE	0,401	0,422	
	MAE	0,309	0,301	

De forma geral, o modelo ANFIS se apresentou com coeficientes (RMSE e MAE) mais baixos do que nos outro modelos (Regressão quadrática de ordem 2), ou

seja, as estimativas dos valores intermediários, foram mais próximas possível dos teores biométricos estudos intermediários, podendo, portanto, explicar de forma precisa os valores obtidos nas lâminas desconhecidas, através do método de estimativa proposto.

Os percentuais de ajustes dos modelos comparando regressão quadrática e a curva ANFIS apresentaram-se melhores no segundo modelo, visto que os percentuais alcançados foram sempre menores para esta curva. Os resultados de p-valor encontrados foram sempre coerentes e mais satisfatórios em comparação ao modelo mais comumente utilizado para explicar fenômenos agrônômicos. Porém o bom ajuste também depende da variação dos dados.

4.5 CONCLUSÃO

Os modelos obtidos a partir do sistema neuro *fuzzy*, mostrou-se satisfatório, podendo-se concluir que pode perfeitamente ser utilizado como ferramenta para tomada de decisão, na avaliação de desenvolvimento do rabanete em função de lâminas de irrigação.

Os modelos de regressão quadrática são inferiores na estimativa biométrica da cultura do rabanete, comparado a ANFIS, pois os resultados dos índices estatísticos se mostraram muito mais baixos no segundo modelo e ainda mostrando valores eficientes quando comparado as lâminas medidas.

Os fatores biométricos dos tratamentos irrigados com água tratada magneticamente, apresentaram resultados mais satisfatórios, em relação a produtividade e desenvolvimento do rabanete, comparado aos tratamentos com água convencional em todos fatores analisados.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- ALVES, M. C.; Pozzab, E. A.; Costa, J. C. B.; Carvalho, L. G.; Alves, L. S. Adaptive neuro fuzzy inference systems for epidemiological analysis of soybean rust. *Environmental Modeling & Software*, v.26, p.1-8, 2011.
- BENINI, L. C. Modelagem neuro-fuzzy com apoio do matlab. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) UNESP/FCA, Botucatu, 2007.

BRANDES, D.; MAESTRI, M.; VIEIRA, C.; GOMES, F.R. 1973. Efeitos da população de plantas e da época de plantio no crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). II. Análise de crescimento. *Experientiae*, v. 15, p. 1-21.

BREGONCI, I. S.; ALMEIDA G. D.; BRUM, V. J.; ZINI JÚNIOR, A.; REIS, E. F., Desenvolvimento do sistema radicular do rabanete em condição de estresse hídrico. *IDESIA* (Chile) Vol. 26, Nº 1; 33-38, 2008.

COSTA, C.C.; OLIVEIRA, C.D.; SILVA, C.J.; TIMOSSI, P.C.; LEITE, I.C. Crescimento, produtividade e qualidade de raízes de rabanete cultivadas sob diferentes fontes e doses de adubos orgânicos. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 118-122, 2006.

CREMASCO, C. P.; Gabriel Filho, L. R. A. ; PUTTI, F. F. ; LUDWIG, R. ; SILVA JUNIOR, J.F. . Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), São Pedro-SP. v. 54. p. 1-9, 2015.

CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; CATANEO, A. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores fuzzy para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura. *Revista Energia na Agricultura*, v. 25, p. 21-39, 2010.

CALDEIRA, A.M.; MACHADO, M.A.S.; SOUZA, R.C.; TANSCHKEIT, R. OLIVEIRA JUNIOR, A.H (Coord.). 2007; Inteligência computacional aplicada à administração, economia e engenharia em Matlab®. São Paulo: Tomson Learning, 2007.

COSTA, C.C.; OLIVEIRA, C.D.; SILVA, C.J.; TIMOSSI, P.C.; LEITE, I.C. Crescimento, produtividade e qualidade de raízes de rabanete cultivadas sob diferentes fontes e doses de adubos orgânicos. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 118-122, 2006.

CHAVES, L. E. Modelos computacionais *fuzzy* e *neuro-fuzzy* para avaliarem os efeitos da poluição do ar. Guaratinguetá, 2013. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

CHIU, S.L. Selecting input variables for fuzzy models. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, v.4, n.4, 243-256, 1996.

FILGUEIRA, F.A.R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290, 2003.

FILGUEIRA, F.A.R. 1982. Manual de olericultura: Cultura e comercialização de hortaliças. São Paulo: CERES, v. 2, p. 62-65.

FILGUEIRA, F.A.R. 2003. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290.

FULLÉR, R. *Neural Fuzzy Systems*. Abdo Akademi University, 1995.

GABRIEL FILHO, L. R. A. *Sistemas Fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias*. 2015. 258p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional) - FCE/UNESP, Tupã, 2015.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; LOURENZANI, A. E. B. S. ; PIGATTO, G. A. S. . Fuzzy rule-based system for evaluation of uncertainty transaction in cassava chain. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 350-367, 2015.

HUANG, Y.; LAN, Y.; THOMSON S. J.; FANG A.; HOFFMANN W. C.; LACEY, R. E. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. *Computers and Eletronics in Agriculture*, v.71, p.107-127, 2010.

JANG, J.S.R. ANFIS: Adaptive-Network-Based *Fuzzy* Inference System. Department of Eletrictal Engineering and Computer Science University of California, Berkeley, CA 94720. *IEEE Trans on Systems, Man and Cyberneticcs*, vol 23, n. 23, p. 665-685,1993.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. 1995. *Water relations of plants and soils*. San Diego: cademic, 495 p.

MATHWORKS The student edition of MatLab: version 4 user's guide. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. 834 p.

PEREIRA, A.J.; BLANK, A.F.; SOUZA, J.R. OLIVEIRA, P.M.; LIMA, L.A.. Efeito dos níveis de reposição e frequência de irrigação sobre a produção e qualidade do rabanete. *Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 1, p. 117-120, 1999.

PUTTI, F. F. ; KUMMER, A. C. B. ; GRASSI FILHO, H. ; GABRIEL FILHO, L. R. A. ; CREMASCO, C. P. Fuzzy modeling on wheat productivity under different doses of sludge and sewage effluent. *Engenharia Agrícola*, v. 37, p. 1103-1115, 2017.

REZENDE, O. L. T. O uso da lógica *fuzzy* no controle das temperaturas de um conjunto gaseificador/combustor de biomassas. 2012. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - UFV. Viçosa, 2012.

RODRÍGUEZ, E.; PECHE, R.; GARBISU, C.; GOROSTIZA, I.; EPELDE, L.; ARTETXE, U.; IRIZAR, A.; SOTO, M.; BECERRIL, J. M.; ETXEBARRIA, J. Dynamic Quality Index for agricultural soils based on *fuzzy* logic. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 678-692, 2016.

SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; FILHO, M.C. M.T.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180–187, 2014.

SILVA, I. N.; SPATTI, S. H.; FLAUZINO R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 2010. 399p.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversion. Journal of Irrigation and Drainage. Engineering of ASCE, v.118, n.6, p.977-980, 1992.

STONE, L.F.; PORTES, T.A.; MOREIRA, J.A.A. 1988. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro. II. Crescimento. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 23, p. 503-510.

VIAIS NETO, D. S. Modelagem *fuzzy* para avaliação do desenvolvimento do tomate em tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2016.

YILMAZ I.; KAYNAR O. Multiple regression, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potencial of clayey soils. Expert systems with applications, v.38, p.5958-5966, 2011.

Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v.8, p.338- 353, 1965.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho obteve os objetivos propostos, a elaboração dos modelos matemáticos, com sistema de interferência neuro *fuzzy*, para estimativa da produtividade do rabanete nos pontos das lâminas de irrigação do experimento, bem como na previsão entre as lâminas estudadas. Também foi elaborado e validado os modelos dos fatores biométricos, nas condições distintas de lâminas de irrigação e tipos de tratamentos de água. Pode-se concluir através destes modelos, que a modelagem matemática ANFIS, é capaz de estimar a produção e o desenvolvimento de planta do rabanete, submetidos a diferentes tratamentos, não amostrados com precisão.

O modelo neuro *fuzzy*, apresentou melhor desempenho, quando comparado as duas outras modelagens matemáticas regressão quadrática e mandani (lógica *fuzzy*).

A técnica neuro *fuzzy* é uma técnica eficiente para generalização dos dados.

O uso da água magnetizada para irrigação do rabanete atinge produtividade mais elevada, quando comparado a irrigação com água convencional, encontrando-se uma economia de 40% de água, e ainda apresenta resultados satisfatórios quanto aos fatores biométricos da cultura.

REFERÊNCIAS

- BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. Tópicos de lógica *fuzzy* e biomatemática. 2ª ed. UNICAMP/IMECC. Campinas, 2010.
- BENINI, L. C. Estimação da densidade de solos utilizando sistemas de inferência fuzzy. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura). – UNESP/FCA, Botucatu, 2007.
- BENINI, L. C.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Uma abordagem para modelagem de dados com o uso de sistemas neuro-fuzzy: aplicações geoespaciais. In: BARBELOS, C.A. Z.; ANDRADE, E. X. L.; BOAVENTURA, M. (Ed.). XXXII CNMAC. SBMAC. São Carlos, 2009.
- COSTA, C.C.; OLIVEIRA, C.D.; SILVA, C.J.; TIMOSSI, P.C.; LEITE, I.C. Crescimento, produtividade e qualidade de raízes de rabanete cultivadas sob diferentes fontes e doses de adubos orgânicos. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 118-122, 2006.
- COSTA, D.; SILVA, L. C. S.; SALES, F. H. S. Efeitos da Água Tratada Magneticamente em Sementes de Mamona (Ricinius Commus L.). Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas-TO, 2012.
- FILGUEIRA, F.A.R. Novo manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa-MG: UFV, p. 289-290, 2003.
- FONCECA, L. P M. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Uma revisión. *Agronomia Colombiana*, Bogotá, v. 27, n. 2, p. 179-191, 2009.
- GIUSTI, E.; MARSILI-LIBELLI, S. A *fuzzy* decision support system for irrigation and water conservation in agriculture. *Environmental Modelling & Software*, v. 63, p. 73-86, 2015.
- GRACIOSO, A. C. N. R.; SOUZA FILHO, R. A. M.; GONZAGA, A.; FERNANDEZ, F.J.R. Sistema computacional para auxílio ao diagnóstico em exames de tuberculose animal. *Arquivo Brasileiro Medicina Veterinária e Zootecnia.*, v.65, n.2, p.622-626, 2013.
- JALOTA SK; SOOD AGBS; CHAHAL BU. Crop water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) – wheat (*Triticum aestivum* L.) system as influenced by deficit irrigation, soil texture and precipitation. *Agricultural Water Management* 84: 137-146, 2006.
- KARATAS BS; AKKUZU E; UNAL HB; ASIK S; AVCI M. Using satellite remote sensing to asses irrigation performance in water user associations in the Lower Gediz Basin, Turkey. *Agricultural Water Management* 96: 982-990, 2009.
- KERBAUY, G.B. Fisiologia Vegetal, 2º ed, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013, 431 p.

LÓPEZ-MATA E; TARJUELLO JM; JUAN JA; BALLESTEROS R; DOMÍNGUEZ A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. *Agricultural Water Management* 98: 190-198, 2010.

MAHMOOD, S.;USMAN, M. Consequences of Magnetized Water Application on Maize Seed Emergence in Sand Culture. *Journal Agr. Sci. Tech.* v. 16. p47-55. 2014.

MALAMAN, C. S. *Aplicação de lógica fuzzy na elaboração de planta de valores genéricos*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas). FCT/UNESP. Presidente Prudente, 2014.

MOHAMED, A. I.; EBEAD, B. M. Effect of irrigation with magnetically treated water on faba bean growth and composition.. *International Journal of Agricultural Policy and Research*. p. 24-40. 2013.

OLIVEIRA, A. M.; DIAS, N. S.; FREITAS, K. K. C.; SILVA, M. K. B. Cultivo de rabanete irrigado com água salina. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.7, n.4, p.01-05, 2012.

PEREIRA LS; PAREDES P; EHOLPANKULOV ED; INCHEKNOVA OP; TEODORO PR; HORST MG. Irrigation scheduling strategies for cotton to cope with water scarcity in the Fergana Valley, Central Asia. *Agricultural Water Management* 96: 723-735, 2009.

PETKOVIĆ, D.; ČOJBAŠIĆ, Ž.; NIKOLIĆ, V. Adaptive neuro-fuzzy approach for Wind turbine power coefficient estimation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v.28, pp.191-195, 2013.

PUTTI, F. F. Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2014.

PUTTI, F. F. Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2015.

SANDRI D; MATSURA EE; TESTEZLAF R. Desenvolvimento da alface Elisa em diferentes sistemas de irrigação com água residuária. *Engenharia Agrícola e Ambiental* 11: 17-29, 2007.

SILVA, A. A. V.; SILVA, I. A. F.; FILHO, M.C. M.T.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA, M. C. M. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro fuzzy. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.2, p.180–187, 2014.

SILVA, I. N.; SPATTI, S. H.; FLAUZINO R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas. São Paulo: Artliber, 2010. 399p.

VIAIS NETO, D. S. Modelagem *fuzzy* para avaliação do desenvolvimento do tomate em tensões de água no solo e doses de salinidade na irrigação. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – UNESP/FCA, Botucatu, 2016.

ZADEH L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, v.8, p.338- 353, 1965.