



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANA CLÁUDIA MARASSÁ ROZA BOZO

**MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DO USO DE ÁGUA
MAGNETIZADA NA IRRIGAÇÃO DO RABANETE UTILIZANDO O SISTEMA MAMDANI**

Botucatu

2018

ANA CLÁUDIA MARASSA ROZA BOSO

MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DO USO DE ÁGUA
MAGNETIZADA NA IRRIGAÇÃO DO RABANETE UTILIZANDO O SISTEMA MAMDANI

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a 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)

B744m Boso, Ana Cláudia Marassa Roza, 1987-
Modelagem matemática e computacional na avaliação do uso de água magnetizada na irrigação do rabanete utilizando o sistema Mamdani / Ana Cláudia Marassa Roza Boso.
- Botucatu: [s.n.], 2018
106 p.: ils. color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2018
Orientador: Camila Pires Cremasco Gabriel
Inclui bibliografia

1. Rabanete - Produtividade. 2. Rabanete - Irrigação. 3. Lógica difusa. 4. Modelos matemáticos. I. Gabriel, Camila Pires Cremasco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. 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

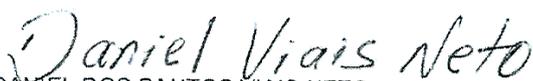
Título: **“MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL NA AVALIAÇÃO DO USO DE ÁGUA MAGNETIZADA NA IRRIGAÇÃO DO RABANETE UTILIZANDO O SISTEMA MAMDANI”**

AUTORA: ANA CLAUDIA MARASSÁ ROZA BOSO
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
Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biosistemas / 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 ANDRÉS MARTINEZ URIBE
Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - UNESP - Tupã/SP

Botucatu, 28 de setembro de 2018.

Dedico,

Aos meus pais, Ana Maria e Juraci, ao meu irmão, Rodolfo, ao meu marido, Renato, e ao meu filho Miguel pelo apoio, paciência e incentivo de realizar esse desafio.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à DEUS, por permitir realizar essa etapa acadêmica tão grandiosa em minha vida e por colocar pessoas especiais ao meu lado durante esse processo.

Aos meus pais, Ana Maria e Juraci, pelo carinho e auxílio na concretização desse desafio. Sempre acreditando em minha capacidade. Meu infinito agradecimento.

Ao meu querido marido, Renato, por ser tão importante em minha vida. Sempre incentivando os meus sonhos e acreditando em meu potencial. Seu companheirismo, amizade, apoio, paciência, alegria e amor, permitiram a efetivação desse trabalho.

Ao meu Irmão Rodolfo, que sempre me incentivou a prosseguir nas escolhas da minha vida.

A minha sogra, Maria de Fátima e ao meu sogro Manoel, pelo apoio e suporte na realização desse sonho.

Aos meus amigos e orientadores Prof.^a Dr. Camila Pires Cremasco Gabriel e Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, por acreditar na minha capacidade e por me orientar, incentivar e inserir no meio acadêmico, no decorrer da formulação da dissertação e de redações científicas.

Aos meus amigos professores, funcionários e Diretores da E. E. Prof. Altino Arantes e E. E. Aristides Rodrigues Simões, por se tornarem minha segunda família, demonstrando apoio, compreensão, convívio e companheirismo durante o desenvolvimento da pesquisa de Mestrado.

Aos meus alunos, pela amizade, apoio, paciência e alegria, que possibilitaram eu atingir a conclusão desse trabalho e etapa da minha vida.

Em especial, a minha amiga Ana Estela, que me incentivou e auxiliou na formulação do presente trabalho.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar a produtividade da cultura do Rabanete, irrigada com dois tipos de tratamento: água convencional (AC) e água tratada magneticamente (ATM), utilizando modelos *Fuzzy* e estatísticos. Para isso, o estudo foi dividido em dois capítulos: o primeiro descreve os resultados obtidos com a produtividade da cultura do rabanete, utilizando água convencional e água tratada magneticamente para irrigação. Houve a comparação entre os modelos *Fuzzy* (triangular e gaussiano) com o modelo estatístico, conforme a variável de produtividade fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), e a comparação entre os resultados obtidos com o tipo de tratamento irrigado. O coeficiente de determinação indicam que os modelos *Fuzzy* demonstraram melhores resultados da produtividade da cultura, sendo que o modelo *Fuzzy* gaussiano demonstrou a realidade agrônômica com maior eficiência. A utilização da ATM (Água Tratada Magneticamente) permite obter melhores resultados da produtividade da cultura, quando analisada a variável FFRT e a eficiência dos modelos *Fuzzy*, em apresentar os dados de forma agrônômica, principalmente o modelo *Fuzzy* gaussiano. O segundo capítulo apresenta os resultados alcançados com o desenvolvimento das variáveis biométricas da cultura do Rabanete, quando irrigada com água convencional e magnetizada. Para isso foi utilizada a modelagem *Fuzzy* e a modelagem estatística, para explicar o comportamento das variáveis biômetras. Em seguida foi realizada a comparação dos modelos desenvolvidos, e verificou-se que o modelo *Fuzzy* apresentou maior eficiência quanto ao comportamento agrônômico da planta. Posteriormente, foi realizado a comparação dos resultados obtidos, nas variáveis biométrica, com tratamento AC (água convencional) e ATM. Ao realizar tal comparação, verificou-se a eficácia de se utilizar a ATM para obtenção da produtividade da cultura do Rabanete. De modo geral a confecção dos modelos *Fuzzy* demonstram que as variáveis biométricas da cultura e a produtividade do rabanete alcançaram resultado satisfatórios, bem como a utilização da água tratada magneticamente na irrigação de culturas. Além disso, as modelagens matemática confeccionadas no presente trabalho, podem ser empregadas em análises de diversas culturas.

Palavras – chave: Produtividade. Lógica difusa. Variáveis biométricas. Modelos matemáticos.

ABSTRACT

The current study aimed to study the productivity of the Radish culture, irrigated with two types of treatment: conventional water (AC) and magnetically treated water (ATM), by means of *Fuzzy's* and statistical models. For this, the study was divided in two chapters: the first one describes the results obtained with the productivity of the radish culture, using conventional water and magnetically treated water for irrigation. The *Fuzzy's* (triangular and Gaussian) models were compared with the statistical model, according to the biometric fresh tuberous root biomass (FFRT), and the comparison between the results obtained with the type of irrigated treatment. The coefficient of determination indicates that the *Fuzzy's* models showed better results of the crop productivity, and the Gaussian *Fuzzy's* model showed the agronomic reality with greater efficiency. The use of ATM (Magnetically Treated Water) allows better results of crop productivity, when FFRT variable and *Fuzzy's* models efficiency, to present the data in agronomic form, mainly the Gaussian *Fuzzy's* model. The second chapter presents the results obtained with the development of the biometric variables of the culture of the Radish, when irrigated with conventional and magnetized water. *Fuzzy's* modeling and statistical modeling were used to explain the behavior of biometric variables. Afterwards, a comparison of the developed models was performed, and verified that the *Fuzzy's* model presented with greater efficiency the agronomic behavior of the plant. Afterwards, the results obtained were compared in the biometric variables, with AC and ATM treatment. In making such a comparison, it was verified the effectiveness of using ATM to obtain productivity of the Radish culture. In general, the preparation of the *Fuzzy's* models shows that the biometric variables of the crop and the productivity of the radish reached satisfactory results, as well as the using of magnetically treated water in crop's irrigation. Besides that, the math modeling presented in this paper can be used in analyses of different crops

Keywords: productivity; diffuse logic; biometric variables; mathematical models.

LISTADE TABELAS

Tabela 1 – Análise química de macronutrientes e micronutrientes, para o solo do experimento realizado nas dependência da Fazenda Lageado – Botucatu/SP	29
Tabela 2 – Parâmetros climáticos durante o período do experimento do cultivo da cultura do Rabanete, para região de Botucatu-SP.....	30
Tabela 3 – Delimitadores das variáveis de entrada triangulares.....	37
Tabela 4 – Delimitadores das variáveis de entrada Gaussianas	38
Tabela 5 – Características dos delimitadores para a variável de saída do sistema baseado em regra <i>Fuzzy</i> , com funções de pertinência triangular e Gaussiana	38
Tabela 6 – Características dos Conjuntos <i>fuzzy</i> , entrada e saída, com pontos de grau de pertinência 1,00.....	39
Tabela 7 – Delimitadores das funções de pertinência de saída, para a variável FFRT, da cultura do Rabanete, irrigado com AC.	47
Tabela 8 – Base de regra para os modelos <i>Fuzzy</i> , com funções de pertinência triangular e Gaussiana.	47
Tabela 9 – Síntese da validação do modelo <i>fuzzy</i> nas funções triangulares e Gaussianas.	48
Tabela 10 – Delimitadores das funções de pertinência de saída, para a variável FFRT, da cultura do Rabanete, irrigado com ATM.....	50
Tabela 11 – Base de regra para os modelos <i>Fuzzy</i> , com funções de pertinência triangular e Gaussiana.	51
Tabela 12 – Síntese da validação do modelo <i>Fuzzy</i> nas funções triangulares e gaussianas.	51
Tabela 13 – Delimitadores das variáveis de entrada triangulares.....	68
Tabela 14 – Delimitadores das variáveis de entrada Gaussianas	68
Tabela 15 – Características dos delimitadores para a variável de saída do sistema baseado em regra <i>Fuzzy</i> , com funções de pertinência triangular e Gaussiana	69
Tabela 16 .Delimitadores das funções de pertinência de saída, tipo triangular, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com AC	77
Tabela 17 – Base de regra do SBRF, para a cultura do Rabanete, irrigado com água convencional	77
Tabela 18 – Validação do modelo <i>Fuzzy</i> para as variáveis de saída da cultura do Rabanete, irrigado com água convencional.	78

Tabela 19 – Delimitadores das funções de pertinência de saída, tipo triangular, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com ATM	85
Tabela 20 – Base de regra do SBRF da cultura do Rabanete, irrigada com água tratada magneticamente	86
Tabela 21 – Validação dos modelo Fuzzy para as variáveis de saída da cultura do Rabanete, irrigado com ATM.	87
Tabela 22 – Correlações entre as variáveis de saída da cultura do Rabanete, tratada com água convencional.	91
Tabela 23 – Correlações entre as variáveis biométrica cultura do Rabanete irrigada com ATM	92
Tabela 24 – Análise de agrupamento das variáveis biométricas de saída do Rabanete	94
Tabela 25 – Análise de agrupamento das variáveis biométricas da cultura do Rabanete irrigada com ATM.....	96
Tabela 26 – Análises das médias das variáveis biométricas do Rabanete para os diferentes tipos de água.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características de uma função de pertinência triangular.....	33
Figura 2 – Características da função de pertinência Gaussiana	34
Figura 3 – SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC), com funções de pertinência triangulares.....	34
Figura 4 – SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC), com funções de pertinência gaussiana.	34
Figura 5 – SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM), com funções de pertinência triangulares.....	35
Figura 6 – SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM), com funções de pertinência gaussiana.	35
Figura 7 – Funções de pertinência triangulares das variáveis de entrada da cultura do Rabanete.....	36
Figura 8 – Funções de pertinência Gaussianas das variáveis de entrada desenvolvida para cultura do Rabanete	36
Figura 9 – Método de inferência de Mamdani	40
Figura 10 – Funções de pertinência triangulares para a variável de saída (fitomassa fresca da raiz tuberosa), para o tratamento com irrigação com tipo de água convencional.	47
Figura 11 – Comparação entre as função resposta (Triangulares/Gaussianas), para o cultivo do Rabanete, irrigado com água convencional, sobre a variável FFRT.	49
Figura 12 – Função de pertinência triangular para a variável FFRT da cultura do Rabanete irrigada com ATM.....	50
Figura 13 – Comparação entre as funções de resposta (Triangulares/Gaussianas) para modelo <i>Fuzzy</i> , na produtividade da cultura do rabanete, irrigado com ATM.....	52
Figura 14 – SBRF de avaliação das variáveis biométricas da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC).	66
Figura 15 – SBRF de avaliação das variáveis biométricas da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM).	66
Figura 16 – Funções de pertinência das variáveis de entrada (lâmina de irrigação), para a cultura do Rabanete, no tratamento ATM e AC	67
Figura 17 – Funções de pertinência de saída para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, para o tratamento AC.....	74

Figura 18 – Comparação entre os modelos da função resposta para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com água convencional.....	80
Figura 19 – Funções de pertinência de saída para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, para o tratamento AC	83
Figura 20 – Comparação da função resposta, dos modelos propostos, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com ATM	88
Figura 21 – Dendograma das variáveis biométrica de saída cultura do Rabanete, com tratamento convencional.....	93
Figura 22 – Dendograma das variáveis biométricas da cultura do Rabanete irrigada com ATM.	95

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	19
CAPÍTULO 1 - MODELAGEM MATEMÁTICA DA PRODUTIVIDADE DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO SISTEMA BASEADO EM REGRAS <i>FUZZY</i> TIPO MAMDANI	23
1.1 INTRODUÇÃO.....	25
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	29
1.2.1 Descrição do experimento	29
1.2.2 Método de Modelagem <i>fuzzy</i>	32
1.2.2.1 Método de construção dos conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis de entrada.....	36
1.2.2.2 Método de construção dos conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis de saída	38
1.2.2.3 Método de elaboração da base de regras	39
1.2.2.4 Método de Inferência de Mamdani e defuzzificação.....	40
1.2.3 <i>Softwares</i> utilizados.....	42
1.2.4 Análise de Regressão.....	43
1.2.5 Teste de ajustamento de modelos.....	44
1.2.5.1 Teste Qui-Quadrado (χ^2)	44
1.2.5.2 Coeficiente de determinação (R²)	45
1.2.5.3 Desvio do quadrado médio da raiz (RMSE).....	45
1.2.5.4 Erro quadrado médio da raiz (MAE).....	46
1.3.1 Sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i> da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água convencional aos 35 DAT.....	47
1.3.2 Sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i> da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente aos 35 DAT	50
1.4 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS.....	54
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM <i>FUZZY</i> NA AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO RABANETE UTILIZANDO TRATAMENTO COM ÁGUA CONVENCIONAL E MAGNETIZADA	60
2.1 INTRODUÇÃO.....	61

2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	65
2.2.1	Método de modelagem <i>Fuzzy</i>	65
2.2.1.1	Método de construção dos conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis de entrada	67
2.2.1.2	Método de construção dos conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis de saída.....	69
2.2.1.3	Método de elaboração da base de regras.....	69
2.2.2	Método de determinação de coeficiente de correlação	70
2.2.3	Método de análise de agrupamentos de dados	71
2.2.4	Método de análise de variância.....	72
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
2.3.2	Sistema baseado em regras <i>Fuzzy</i> das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente aos 35 DAT	82
2.3.3	Análise das relações entre as variáveis biométricas e de produtividade	90
2.3.3.1	Análise de correlação entre as variáveis biométricas	90
2.3.3.2	Análise de agrupamento de variáveis	92
2.3.3.3	Análise de variância (ANOVA)	96
2.4	CONCLUSÃO	98
	REFERÊNCIAS	98
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	REFERÊNCIAS	105

INTRODUÇÃO GERAL

Além de mitigar a fome, as hortaliças têm um papel importante na reposição de nutrientes essenciais para o funcionamento do nosso organismo. Cada hortaliça tem sua peculiaridade, beneficiando conforme seu modo de consumo (EMBRAPA, 2012). Dessa forma, as hortaliças são classificadas e definidas em tuberosas, herbáceas, frutos, ou simplesmente em legumes e verduras.

As tuberosas são hortaliças cuja as partes consumidas são desenvolvidas dentro do solo, as herbáceas são aquelas onde as partes aproveitadas se desenvolvem acima do solo, e as hortaliças, definidas como fruto, tem como aproveitamento o fruto fresco ou maduro, como por exemplo a: melancia, ervilha, quiabo, entre outras (BEVILACQUA, 2006).

Apesar das hortaliças serem consumidas em grande quantidade e terem grande importância nutricional, algumas não são conhecidas e nem fazem parte do cardápio de boa parte da população, exemplo disso é o Rabanete, que é fonte de vitaminas B6 e C, ácido fólico e potássio, apresentando baixo teor calórico (SILVA et al., 2012).

Segundo a Embrapa (2012), o Rabanete é uma raiz que se origina da região do mediterrâneo e pertence à família das brássicas, como o repolho, por exemplo. Seu formato pode ser oval, redondo ou alongado. Ainda segundo o autor, a polpa do Rabanete pode ser branca, avermelhada ou de ambas as cores, além de variar entre 2 e 5 cm de diâmetro. Sua folha é da cor verde bem intenso, o que é essencial para absorção de nutrientes.

Apesar de apresentar alto teor nutricional, o Rabanete pode ser considerado um grande aliado para as pessoas que necessitam perder peso e no tratamento de diversas doenças severas, como o câncer, problemas cardiovasculares e respiratórios (RODRIGUES et al., 2013). No entanto, apesar de seus inúmeros benefícios, o Rabanete não é consumido em grande escala no território brasileiro, quando comparado ao consumo em outros países.

Por ser uma planta de ciclo rápido, 25 a 35 dias aproximadamente, essa hortaliça pode ser produzida durante todo ano, demonstrando uma grande rentabilidade para o produtor (SILVA et al., 2015; COSTA et al., 2006). Apesar de seu cultivo necessitar de grande quantidade de água, busca-se, porém, uma forma de

causar pouco estresse hídrico ao solo. Neste caso o auxílio de técnicas agrícolas, como a irrigação, torna – se um fator importante no manejo da água.

A utilização da irrigação agrícola é um elemento relevante no abastecimento de água para o cultivos de culturas, quando o volume de chuva esperado ou qualquer outra fonte natural não são capazes de fornecer as necessidades hídrica da planta (PEREIRA et al., 2010). A qualidades de água utilizada na irrigação é de grande relevância para que a planta obtenha o seu desenvolvimento máximo e sua produtividade em grande potencial (GUEDES et al., 2015).

De acordo com Pires et al. (2008), o manejo de irrigação tem como obrigação atender todas as necessidades fisiológicas da planta, com a utilização adequado e sustentável da água, da energia utilizada para alimentação do sistema e dos custos direcionados com a mão-de-obra. Para Alvarenga (2004), a ineficiência da utilização da água na irrigação permite que a planta não atinge seu potencial máximo de produtividade, influenciando na qualidade dos frutos e no aumento de anomalias fisiológicas.

Visando a importância da irrigação na produção e desenvolvimento dos cultivos, é justificável a busca por pesquisas que aperfeiçoem e otimizem o aproveitamento do uso da água destinada à irrigação (PUTTI et al., 2014). Nesse seguimento, estudos envolvendo a magnetização da água e suas aplicabilidades na área da irrigação, vêm sendo desenvolvidos constantemente, uma vez que ainda segundo o autor, a produtividade e qualidade da cultura aumentam, quando ela é exposta à irrigação de água induzida magneticamente. Exemplo disso foi observado quando a utilização da água magnetizada na produção de alface demonstrou um aumento relevante quanto ao desenvolvimento e produtividade da cultura em relação ao tratamento convencional (PUTTI, 2014).

Outro exemplo de utilização desse recurso, podem ser verificados em Gabriel Filho (2011), com animais de produção tratados com água magnetizada. O autor verificou o aumento da produtividade e desenvolvimento geral dos animais analisados.

Observando a importância da utilização da água tratada magneticamente para a obtenção da melhor produtividade, faz se necessário, então, estudos e aplicações computacionais e estatísticas que permitam a validação e comprovação de tais resultados.

Como auxílio para as análises de dados relacionados com produtividade em geral, a Teoria *Fuzzy* vem obtendo um papel importante para os produtores em geral,

como nos estudos que demonstram a qualidade do bem-estar de galinhas que foram expostas à energia elétrica em galpões destinados à produção de ovos (CREMASCO, 2008), na qualidade do rebanho para o abate (GABRIEL FILHO, 2011), e em aplicações destinadas à área da irrigação na agronomia, ou ainda, os estudos realizados por Valente et al. (2012), também demonstraram a importância da utilização da Lógica *Fuzzy* para determinar a melhor área de manejo na produção de café de acordo com a condutividade elétrica encontrada no solo.

Visando os benefícios da Teoria *Fuzzy* em análise de dados, o tratamento da água magnetizada e as condições atuais da cultura do Rabanete, como a pouca comercialização no território brasileiro e sua vulnerabilidade nas condições de déficit hídrico, o presente trabalho justifica-se por aprofundar e produzir conhecimentos técnicos científicos que envolvam as práticas do produtor na irrigação com água tratada magneticamente, na produção e desenvolvimento da cultura do Rabanete, permitindo ampla divulgação, em meios acadêmicos e sociais, dos resultados obtidos pela pesquisa.

Tendo em vista a busca por resultados em diversas condições não realizadas em experimentos, propõe-se, como objetivo principal, a utilização da Teoria *Fuzzy* na análise da produtividade da cultura do Rabanete, em diferentes vertentes da irrigação com água convencional e magnetizada, nas variáveis biométricas fitomassa seca e fitomassa fresca da cultura.

Constituem-se objetivos específicos desta proposta desenvolver os quatro seguintes modelos utilizando sistema baseado em regras *Fuzzy* tipo Mamdani:

- (1º) Modelo matemático da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água convencional;
- (2º) Modelo matemático das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água convencional;
- (3º) Modelo matemático da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente;
- (4º) Modelo matemático das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente;

Para obtenção dos objetivos apresentados, a dissertação foi dividida em dois capítulos. O primeiro, buscando atender o 1º e 3º objetivos específicos, é intitulado

“Modelagem matemática da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente utilizando sistema baseado em regras fuzzy tipo Mamdani”; enquanto que o segundo, atendendo os objetivos específicos 2º e 4º, intitula-se: *“Modelagem matemática das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente utilizando sistema baseado em regras fuzzy tipo Mamdani”*

CAPÍTULO 1

MODELAGEM MATEMÁTICA DA PRODUTIVIDADE DO RABANETE SOB DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO COM ÁGUA TRATADA MAGNETICAMENTE UTILIZANDO SISTEMA BASEADO EM REGRAS *FUZZY* TIPO MAMDANI

Ana Cláudia Marassá Roza Boso

Camila Pires Cremasco Gabriel

RESUMO

A produtividade de uma cultura está relacionada com a demanda de água inserida em seu desenvolvimento. A mensuração da água influencia diretamente nos custos finais da produção da cultura para os produtores agrícolas. Neste sentido, pesquisas científicas são desenvolvidas na intenção de otimizar o uso consciente de água, principalmente na área da irrigação. Com a finalidade de proporcionar maior produtividade da cultura, com o menor uso hídrico, o presente trabalho teve por objetivo analisar e avaliar os efeitos gerados pela utilização da água convencional e magnetizada, na produtividade da cultura do Rabanete em diferentes níveis de lâminas de irrigação (25%, 50%, 75%, 100% e 1225%), baseado na evapotranspiração da cultura, com aplicação da Lógica *Fuzzy*. Deste modo foi realizado um experimento no Departamento de Engenharia Rural da UNESP – Faculdade de Ciências Agrônomicas em Botucatu/SP, onde foi cultivado a cultura do Rabanete, com avaliações da variável fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), que descreve a produtividade da cultura analisada. Para comprovação dos resultados experimentais e demonstração da produtividade da cultura, foram adotadas duas metodologias de análises: a primeira foi desenvolvida por meio de um sistema baseado em Lógica *Fuzzy*, composta por variáveis de entrada (*Lâminas de irrigação*) e variável de saída (FFRT), no ponto de colheitas (no 35 *DAS* – Dias após a semeadura); a segunda metodologia foi confeccionada com a utilização de um modelo estatístico, baseado na análise de regressão. Analisando os resultados obtidos, com os dois modelos confeccionados, pode-se inferir que a modelagem *Fuzzy* apresentou melhor ajuste dos dados, com redução do erro quadrado médio e maior coeficiente de correlação,

quando comparado com o modelo estatístico desenvolvido. Também se observou que a modelagem *Fuzzy* possibilitou demonstrar, de forma mais eficiente, a produção real da cultura, e que o emprego da água tratada magneticamente (ATM) na irrigação, beneficiou a qualidade e a produtividade da cultura analisada, em níveis de lâminas inferiores a 100% da ET_c (Evapotranspiração de Cultura).

Palavras-chave: Eficiência. Lógica *Fuzzy*. Irrigação; Análise estatística.

ABSTRACT

The productivity of a crop is related to the demand of water inserted in its development. Measuring water directly influences the final costs of agricultural production for farmers. In this sense, scientific research is developed with the purpose of optimizing the conscious use of water, especially in the area of irrigation. The objective of this work was to analyze and evaluate the effects generated by the use of conventional and magnetized water on radish crop productivity in different irrigation slides (25%, 50%, 75%, 100% and 125%), based on evapotranspiration of the crop, with application of the *fuzzy's* Logic. An experiment was carried out in the Department of Rural Engineering of UNESP - Faculty of Agronomic Sciences of Botucatu / SP, where the culture of radish was cultivated, with evaluation of the fresh tuberous root phytomass (FFRT), which describes the productivity of the analyzed crop. In order to prove the experimental results and to demonstrate the crop productivity, two methodologies were used: the first one was developed through a system based on *Fuzzy's* Logic, composed of input variables (irrigation blades) and output variable (FFRT), at the point of harvest (at 35 DAS - Days after sowing); the second methodology was done using a statistical model, based on regression analysis. Analyzing the obtained results, with the two models, it can be inferred that the *Fuzzy's* model presented a better adjustment of the data, with reduction of the mean square error and higher coefficient of correlation, when compared with the statistical model developed. It was also observed that the *Fuzzy's* modeling allowed a more efficient demonstration of the actual production of the crop, and that the use of the magnetically treated water (ATM) in the irrigation, benefited the quality and productivity of the analyzed crop, in lower levels of leaves to 100 % ET_c (Evapotranspiration of Culture).

Keywords: Efficiency. *Fuzzy's* logic. Irrigation. Statistical analysis.

1.1 INTRODUÇÃO

O Rabanete (*Raphanus Sativus L.*) é uma hortaliça que pertence à família das Brassicaceae, como a couve-flor, a rúcula, o repolho, entre outras (DANTAS, 2015). De acordo com Cortez (2009), há uma controvérsia sobre a origem do Rabanete, pois há registros de seu cultivo na China, Europa, oeste asiático e na região do Mediterrâneo.

Como características pode-se perceber raízes tuberosas comestíveis, de forma oval, redonda e alongada, de cores avermelhadas, branca ou vermelha, branca, preta e roxa (EMBRAPA, 2012). Seu diâmetro varia entre 2 a 5 centímetro, com polpa de cor branca, satisfazendo o gosto do consumidor (RODRIGUES, 2013). Com sabor picante, o Rabanete pode ser consumido de diferentes maneiras, na forma crua como saladas, conservas, cozidas, sopas ou molhos (EMBRAPA, 2012; LOPES, 2008). Rico em vitaminas A, B1, B2, cálcio, potássio, enxofre e fósforo, o Rabanete é também um grande aliado no tratamento medicinal, pois age como um expectorante natural, estimulante para o sistema digestivo e apresenta benefícios para o tratamento de sinusite e bronquite (GOUVEIA, 2016; SILVA, 2015).

Conforme (CARDOSO; HIRAKI, 2001), o Rabanete é uma hortaliça que não tem grande importância em relação a área plantada, mas é cultivada em grande escala em propriedades pequenas em diversas regiões. Seu ciclo é considerado curto, podendo ser realizada a colheita entre os dias 25 e 35 após a semeadura (DUTRA et al., 2014). Já de acordo com Lucchesi et al. (1976), o plantio pode ser realizado em regiões de clima ameno, durante o ano todo, em sulcos de culturas de ciclos longos. Ainda segundo o autor, em regiões onde o verão é chuvoso e quente, o plantio deve ser realizado de abril a junho.

Sua semeadura pode ser realizada em sulcos com distâncias entre 20 a 30 centímetros e com profundidade de 1 a 2 centímetros, com o cobrimento total das sementes. Seu desenvolvimento obtém melhor eficiência entre 8°C e 20°C, sendo que o calor influencia favoravelmente para o florescimento (MAKISHIMA, 2004). Por ser uma cultura sensível ao transplante, sua semeadura é realizada diretamente na área

definitiva, com necessidades de nutrientes em grandes quantidades em curto período de tempo, principalmente de nitrogênio e potássio (GOUVEIA, 2016).

Para Lollato (2001), a produtividade de uma cultura está direcionada com a época da cultura, a escolha da variedade, o uso por sementes saudáveis, o tratamento de sementes, a rotação de culturas no trato do solo e espaçamento entre as linhas de plantio. Segundo o autor, os fatores mencionados influenciam diretamente na proliferação de doenças, nos custos com aplicações de defensivos e nos custos com a utilização de fertilizantes.

Outro fator que está relacionado com a produtividade é a quantidade de água disponíveis para o desenvolvimento da cultura. Conforme Bregonci et al. (2008), o estresse hídrico afeta diretamente e de forma negativa, o diâmetro da raiz tuberosa e as raízes do Rabanete. Em seu estudo o autor verificou uma diminuição do diâmetro da raiz tuberosa do Rabanete em 33% sobre a testemunha e efeitos no comprimento das raízes, quando submetido ao déficit hídrico.

Para Klar et al. (2015), a utilização de 100% da ETc (Evapotranspiração da Cultura) não é necessária para obter ótimos resultados na produtividade do Rabanete na região de Botucatu, sendo necessário uma reposição de água em apenas 60% a 80% da ETc. De acordo com Figueira (2007), a produtividade e qualidade do Rabanete reduz-se de acordo com o estresse hídrico do solo, obtendo rachaduras e aspectos esponjosos em suas raízes.

Segundo Santos et al. (2014), o desenvolvimento do Rabanete é influenciado também pela quantidade de lâmina utilizada em seu manejo. A utilização de 100% da lâmina de irrigação proporcionou, em seu estudo, o melhor rendimento de produtividade em relação sobre o diâmetro do Rabanete. No mesmo estudo os autores verificaram que a utilização de 125% da lâmina de irrigação obteve maior quantidade de folha da cultura e maior comprimento do caule.

Conforme Azevedo e Saad (2012), não há em abundância de pesquisas que dissertem sobre a quantidade e manejo de água para a cultura do Rabanete. Entretanto, o déficit ou excesso hídrico pode provocar distúrbios fisiológicos em sua raiz, como rachaduras, má qualidade e quantidade produzida.

Tendo em vista a necessidade de estudos relacionados com a quantidade hídrica na produtividade das culturas, faz-se necessário um olhar diferenciado no manejo da água para irrigação, uma vez que a qualidade e quantidade de água

utilizada para irrigação são fatores significativos para agricultura, principalmente a quantidade de sais solúveis e salinidade na água (BERNARDO, 1996).

Uma alternativa na busca da produtividade e redução dos prejuízos gerados pelo mau uso dos fertilizantes, e principalmente no desperdícios de água, está na utilização da água magnetizada na irrigação. Diversas pesquisas vem demonstrando a eficiência do magnetismo na irrigação de diversas culturas, podendo substituir inclusive a utilização de fertilizantes (PUTTI, 2014).

De acordo com Cremasco et al. (2015), a utilização da água magnetizada na cultura do Rabanete proporcionou um aumento no comprimento da raiz com apenas 50% da necessidade hídrica da planta. Isso mostra que a utilização da água tratada magneticamente pode substituir a utilização do tratamento convencional, proporcionando redução de água na aplicação e custos em geral.

No estudo de Putti (2014), foi verificado, na cultura da alface, um aumento significativo de 66% na fitomassa fresca na parte superior da cultura, com a utilização da água tratada magneticamente.

Com a utilização da água tratada magneticamente, Mohamed (2013) constatou um crescimento na produtividade do tomate, sobre o número de frutos produzidos por área em hectare, demonstrando lucro ao produtor agrícola. Para Rewal e Maheswari (2011), a utilização da água magnetizada proporcionou uma expansão na fitomassa fresca da ervilha, o que está relacionada com o número de folhas produzidas.

Além da produtividade da cultura, a utilização da água magnetizada pode auxiliar no raio de molhamento na superfície do solo. No estudo realizado por Al-Ogaidi (2017), foi verificado que a utilização da água magnetizada proporcionou um aumento da área molha em superfície de solos homogêneos e aumento da profundidade vertical molhada em solos de camada areia sobre argila.

A experimentação da utilização água tratada magneticamente na agricultura irrigada, requer a implementação de recursos matemáticos e tecnológicos para análises e comprovação dos dados obtidos em campo.

Considerando os efeitos gerados na produtividade da cultura pelo manejo inadequado da mesma e na influência da quantidade da lâmina utilizada na irrigação, a experimentação agrícola vem se tornando uma fator de extrema importância na investigação de novas tecnologias, como na reutilização de resíduos líquidos e sólidos, potencialização de recursos e outros fatores de influência (PUTTI, 2015).

A utilização técnicas mais avançadas permitem a busca de novas estruturas de fundamentação dos dados obtidos em campo, como a ampliação de estudos relacionados com a evolução dos nutrientes que são extraídos do solo e percorrem toda estrutura corporal da planta, a redução de água utilizada para irrigação das culturas e a produtividade das culturas.

A modelagem matemática vem se tornando uma área de grande importância na concretização dos dados obtidos experimentalmente. Porém, há situações de complexidades que requerem modelagens mais específicas e avançadas para solidificação dos resultados (DEYVER, 2016). A Lógica *Fuzzy* permite tal solidificação de forma mais compreensiva nas análises dos dados. (GABRIEL FILHO, 2015).

De acordo com Ross (2010), os conceitos da Lógica *Fuzzy* são aplicados em princípios que a lógica tradicional não permite explicações. Por meio de conjunto, a Teoria *Fuzzy* possibilita realizar raciocínios próximos aos dos seres humanos em ambientes com incertezas e imprecisões (BENINI, 2012).

A Teoria *Fuzzy* proporciona, portanto, uma metodologia que traduz termos linguísticos imprecisos em termos numéricos compreensivos aos seres humanos (MARÇAL; SUSIN, 2005).

Seu sistema consiste na utilização de três operações básicas, fuzzificação, inferência e defuzzificação (ZADEH, 1965). É na fuzzificação que os dados de entradas são modificados em variáveis linguísticas e as funções de penitências são obtidas. A etapa da inferência consiste na determinação das bases de regras e na utilização do controlado *fuzzy*, Mamdani ou Takagi-Sugeno (BARROS; BASSANEZI, 2010).

O controlador Mamdani compara as variáveis antecedentes a regras, por meio de um operador max-min, com objetivo de verificar as similaridades entre elas (SIMÕES; SHAW, 2007). Em seguida cada regra é agregada pelos operadores, gerando um conjunto consequente, que permite a implicação dos resultados. Tais resultados necessitam de uma defuzzificação para transformação dos dados linguísticos em dados reais (BARROS; BASSANEZI, 2010). Os autores explicam que o controlador Takagi-Sugeno opera da mesma forma na fuzzificação do controlador Mamdani sobre as variáveis de antecedentes, modificando apenas a saída das regras, que constituem uma função linear ou constante.

Realizada a defuzzificação, a terceira etapa baseia-se na convenção dos valores *Fuzzy* para números reais. A defuzzificação pode ser realizada por alguns

métodos, como o Centróide, média do máximo, maior dos máximos, entre outros. No entanto o mais utilizado pelo método Mamdani é o defuzzificador Centróide (ZADEH, 1965).

A utilização da Teoria *Fuzzy* pode ser empregada em diversas áreas do conhecimento, como na modelagem dos impactos de lâminas de irrigação no cultivo de beterraba (GABRIEL FILHO, 2015), análise do crescimento e progresso da cultura da alface irrigada com água magnetizada (PUTTI, 2015), na avaliação computacional dos efeitos da utilização de água salina gerados nos estágios dos tomateiros (DEYVER, 2016), entre outras composições envolvendo métodos matemáticos e computacionais que esta lógica é capaz em desenvolver.

Vista ao evidenciado, o presente trabalho teve por objetivo analisar e avaliar os efeitos gerados pela utilização da água convencional e magnetizada, na produtividade da cultura do Rabanete (*Raphanus Sativus L.*), na região de Botucatu/SP, em diferentes porcentagens de lâminas de irrigação, sobre a evapotranspiração de cultura, por meio da modelagem *Fuzzy*.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Descrição do experimento

O experimento com a cultura do Rabanete foi desenvolvido entre os meses de setembro a novembro de 2013, em casa de vegetação no Departamento de Engenharia Rural da UNESP – Faculdade de Ciências Agrônomicas em Botucatu/SP, onde está localizada a 22° 51' S e 48° 26' W, a 786 m acima do nível do mar. O experimento foi analisado estatisticamente em Cremasco et al. (2015).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região, do experimento realizado, é considerado um clima subtropical úmido (Cfa) (KÖPPEN; GEIGER, 1928). O solo da casa de vegetação, onde o experimento foi realizado, também é classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico Latossólico (EMBRAPA, 2006), apresentando uma formação média/argilosa e características químicas descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise química de macronutrientes e micronutrientes, para o solo do experimento realizado nas dependências da Fazenda Lageado – Botucatu/SP

Análise química		
Macronutrientes	V%	85

	CTC	114 mmolc dm-3
	SB	67 mmolc dm-3
	Mg	25 mmolc dm-3
	Ca	68 mmolc dm-3
	K	4,8 mmolc dm-3
	H+Al	17 mmolc dm-3
	PH	5,9
	M.O.	24 g dm-3
	P(resina)	191 mg dm-3
Micronutrientes	Zinco	8 mmolc dm-3
	Cobre	4,8 mmolc dm-3
	Maganês	10,10 mmolc dm-3
	Boro	0,51 mmolc dm-3
	Ferro	20 mmolc dm-3

Fonte: CREMASCO et al. (2015).

Além da análise do solo, houve a verificação e coleta de dados da temperatura e umidade do ar na localidade do experimento. De acordo com a estação meteorológica, pertencente ao local, os dados climáticos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros climáticos durante o período do experimento do cultivo da cultura do Rabanete, para região de Botucatu-SP

	Temperatura (°C)	Umidade (%)
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).

Para obtenção da evapotranspiração de cultura, foi utilizado um tanque classe, instalado no interior do ambiente de experimentação. As medições ocorreram diariamente às 8:00h, com obtenção de 114,2 mm.

Para irrigação da cultura, foram utilizados dois sistemas independentes de irrigação, com uma linha principal e bandas secundárias de gotejamento. A linha principal é de classificação Amandani, confeccionada pela Petroísa Ltda. Os gotejadores das bandas foram separados por 0,30 m, obtendo uma pressão de 10 m. c. a. e uma descarga média de 1,47 L. h⁻¹. O tempo de irrigação foi determinada pela Equação 1 (CREMASCO et al., 2015):

$$Ti = 6.000 \frac{Kc \cdot Kp \cdot Eca \cdot Sl \cdot Sg \cdot TR}{Ei \cdot Vg} \quad (1)$$

onde, Kp é o coeficiente de tanque, Kc é o coeficiente de cultura, Sl é o espaçamento entre laterais (m), Ei é a eficiência de irrigação (%), Eca é a evaporação do tanque

“Classe A” ($mm\ dia^{-1}$), Sg é o espaçamento entre gotejadores (m), Vg é a vazão de gotejadores ($L\ h^{-1}$) e Ti é o tempo de irrigação.

Para determinar a lâmina total de irrigação foi utilizado uma metodologia proposta por Snyder (1992), onde necessita do coeficiente do tanque (Kp) definido conforme a Equação 2:

$$Kp = 0,0482 + 0,024 \ln(B) - 0,00376.V + 0,0045.UR \quad (2)$$

em que B é a bordadura da área de vegetação ao redor do tanque (m), V é a velocidade do vento a 2 m de altura ($m.s^{-1}$), Kp é o coeficiente do tanque e UR é a média da umidade relativa em porcentagem.

Os valores utilizados para o Kc foram obtidos conforme o manual da FAO (1998), em que se usa 0,6 para o início do cultivo, 1,15 para a meia estação e 0,8 para o final do plantio.

A cultura utilizada para o experimento foi da empresa Sakata com a definição: Maçarias - Rabante nº 19. Sua semente foi aplicada diretamente no solo, tendo o início do desbaste aos 14 dias após a sementeira (DAS). As avaliações para a produtividade da cultura no presente trabalho, ocorreram aos 35 dias após a sementeira (DAS). Foi adotado em espaçamento de 25 cm por 5 cm . As parcelas experimentais foram definidas com 5 linhas de plantio em 1,2 m de largura por 3 m de comprimento, obtendo um total de 3,6 m^2 .

O tratamento de magnetização da água, foi realizado com utilização do aparelho magnetizador Sylocymol Rural de formato cilindro, composto por ímãs revestidos por uma proteção de inox. Conforme as informações do fabricante, o aparelho magnetizador tem capacidade de magnetizar 1000 L de água por minuto, tendo a obrigatoriedade de estar submerso em um reservatório de água. Esse aparelho magnetizador foi instalado em um reservatório de água, com capacidade de 500 L , que abastecia o sistema de irrigação.

Para análise das amostras, foram utilizadas apenas as linhas centrais, descartando as linhas laterais devido ao efeito de bordadura. Na avaliação da produtividade da cultura foi analisado o desenvolvimento da fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), nas lâminas de irrigação de 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da evapotranspiração de cultura do Rabanete, com cinco repetições de parcelas

composta por uma planta do Rabanete desbastada ao 35 dias após a semeadura diretamente do solo e com adubação necessária para o desenvolvimento da planta. Os valores correspondentes as porcentagens das lâminas de irrigação foram definidos por: 28,55 mm, 57,1 mm, 85,65 mm, 114,2 mm e 142,75 mm.

Após a colheita, houve a pesagem da fitomassa fresca da raiz tuberosa com uma balança digital, graduada em 0,001 g.

1.2.2 Método de Modelagem *fuzzy*

Os modelos *Fuzzy* desenvolvidos visaram avaliar a produtividade no ponto de colheita aos 35 dias após a semeadura (*DAS*) analisando os efeitos na variável de produtividade fitomassa fresca da raiz tuberosa da cultura do Rabanete.

Os sistemas baseados em regras *Fuzzy* (SBRF) foram desenvolvidos por meio de funções de pertinência que podem ser representadas de forma gráfica ou numérica, com atribuição de valores *Fuzzy* para valores discretos de variáveis em um intervalo numérico (LEITE et al., 2011). As funções de pertinência refletem a intensidade de cada valor em cada termo linguístico.

Para o presente capítulo foi desenvolvido dois tipos de modelos *Fuzzy*. Um SBRF com as funções de pertinências triangulares para as variáveis de entrada e outro SBRF com funções de pertinência gaussiana, também para as variáveis de entrada. Ambos os sistemas foram desenvolvidos com funções de pertinência triangulares para as variáveis de saída.

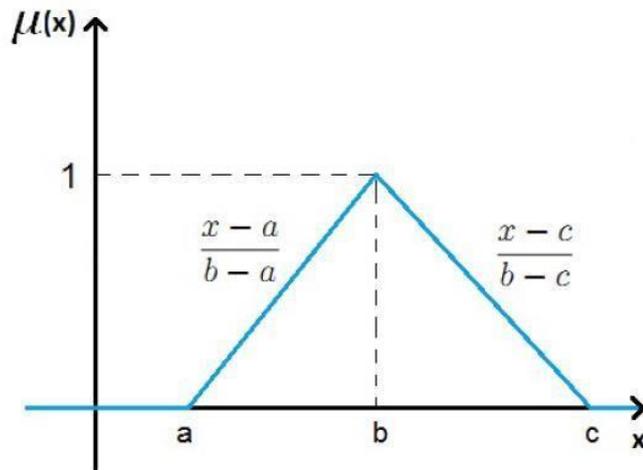
A escolha pela função de pertinência triangular, nas variáveis de entrada, ocorreu devido a suas vantagens dentro do modelo. Suas características permitem que seus pontos coincidam com as médias dos dados analisados, o que proporciona melhores índices de resposta, melhores desempenhos do coeficiente de determinação (R^2) e menores erros de ajuste do modelo Pereira Filho (1999).

Ainda segundo o autor, a utilização da função de pertinência triangular se torna viável devido a velocidade da aquisição dos cálculos das áreas compreendidas na defuzzificação do sistema. A função de pertinência triangular é representada pela Equação 3 (CREMASCO et al., 2010):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x < b, \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{se } b < x < c, \\ 0, & \text{se } x \geq c. \end{cases} \quad (3)$$

A representação gráfica da função de pertinência triangular está demonstrada pela Figura 1.

Figura 1. Características de uma função de pertinência triangular



Fonte: SILVA NETO (2011).

No entanto, a utilização da função de pertinência triangular, de modo agrônomo, não se torna aceitável. Sua apresentação não demonstra de forma suave a realidade do fenômeno ocorrido, além de apresentar grades variações (picos) nos resultados das variáveis de saída, quando ocorrer mudanças nos dados iniciais. Para casos que requerem essa suavidade, a utilização da função de pertinência Gaussiana é mais pertinente.

De acordo com Leite et al. (2011), a utilização da função de pertinência Gaussiana é efetiva devido a facilidade de aquisição dos dados e a suavidade da curva sobre os dados analisados. Para Santos (2015), a curva da função de pertinência gaussiana é diferente de zero em todos os pontos, o que torna sua utilização uma vantagem.

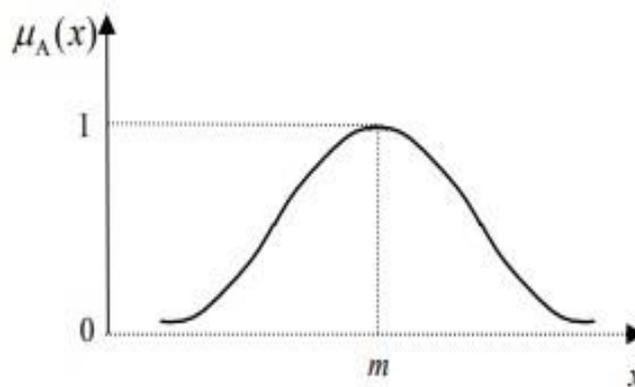
Um número *Fuzzy* de um conjunto A é dito gaussiano se sua função de pertinência for representada pela Equação 4 (PIMENTA, 2009):

$$\mu_A(x) = \exp\left(\frac{-(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

sendo m a média e σ o desvio padrão.

A representação gráfica da função de pertinência Gaussiana está representada pela Figura 2.

Figura 2. Características da função de pertinência Gaussiana



Fonte: BENINI; MENEGUETE JR (2009).

Os sistemas baseados em regras *Fuzzy* desenvolvido, com as funções de pertinências triangular e Gaussiana, estão representados respectivamente pelas Figuras 3 e 4, para a variável de produtividade fitomassa fresca da raiz tuberosa da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC). As Figuras 5 e 6 referem-se à sistemas semelhantes com água tratada magneticamente (ATM).

Figura 3. SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC), com funções de pertinência triangulares

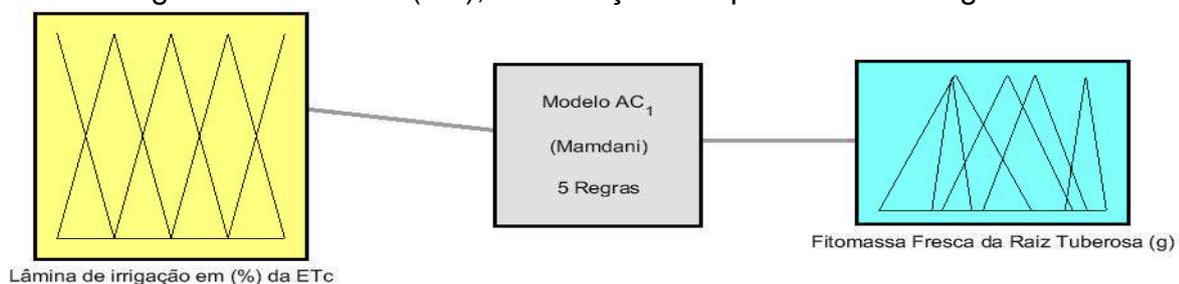


Figura 4. SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC), com funções de pertinência gaussiana

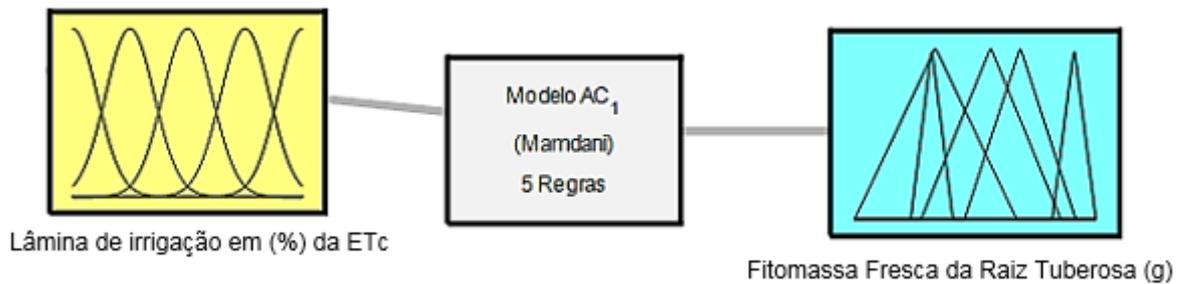


Figura 5. SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM), com funções de pertinência triangulares

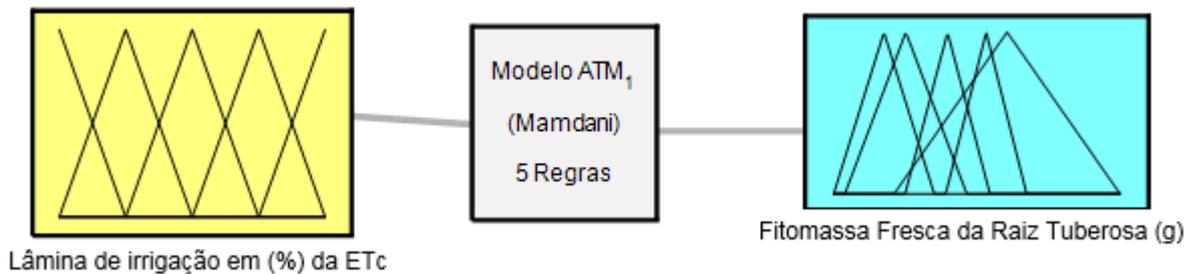
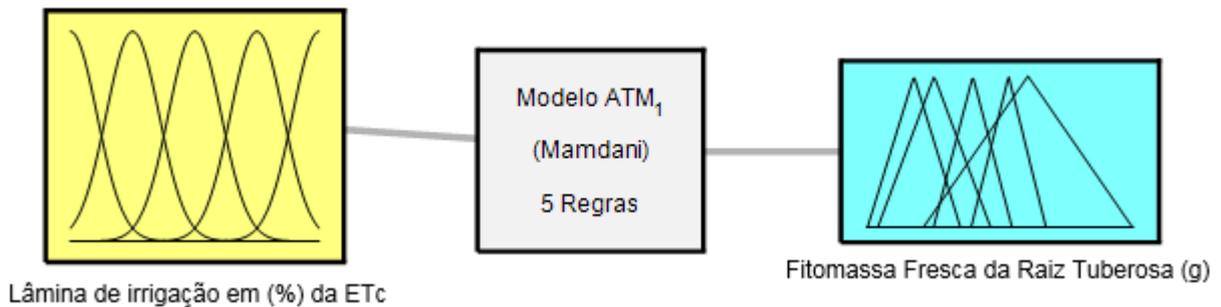


Figura 6. SBRF de avaliação da produtividade da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM), com funções de pertinência gaussiana



Os sistemas são compostos por uma única variável de entrada (Lâminas de irrigação da evapotranspiração de cultura - %), uma variável de saída (variável de produtividade – FFRT) e 5 regras para execução do modelo. As variáveis de entrada e saída são composta por 5 funções de pertinência.

Tais modelos matemáticos são representados por uma função da forma $F: X \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, com $F(x) = y$, onde X é o conjunto domínio, composto pela variável “Lâmina de irrigação da ETc (%)”, em que $X = [25; 125]$; e o contradomínio definido pela variável fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT).

Para confecção do sistema baseado em regras *Fuzzy* (SBRF), considerou-se um fuzzificador, um conjunto de regras, a metodologia Mamdani de inferência *Fuzzy* e um defuzzificador que retorna um valor real de saída.

A base de regras caracteriza os objetivos e a estratégia utilizados por especialistas na área, por meio de um conjunto de regras linguísticas.

A lógica de tomada de decisões, incorporada na estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *Fuzzy* para simular tomada de decisões humanas. Ela gera ações – consequentes – inferidas a partir de um conjunto de condições de entrada - antecedentes.

1.2.2.1 Método de construção dos conjuntos *Fuzzy* das variáveis de entrada

Para formação dos conjuntos *Fuzzy* de entrada foram utilizados dois tipos de funções de pertinência, triangular e Gaussiana, na forma de comparar qual modelo se adapta melhor aos dados do ponto de vista agrônomo.

A Figura 7 apresenta as funções de pertinência que foram adotadas na forma triangular e a Figura 8 demonstra as funções de pertinência de entrada na forma Gaussiana. Ambas as funções no conjunto L_i com o grau de pertinência igual a 1 em seus respectivos conjuntos *Fuzzy*.

Figura 7. Funções de pertinência triangulares das variáveis de entrada da cultura do Rabanete

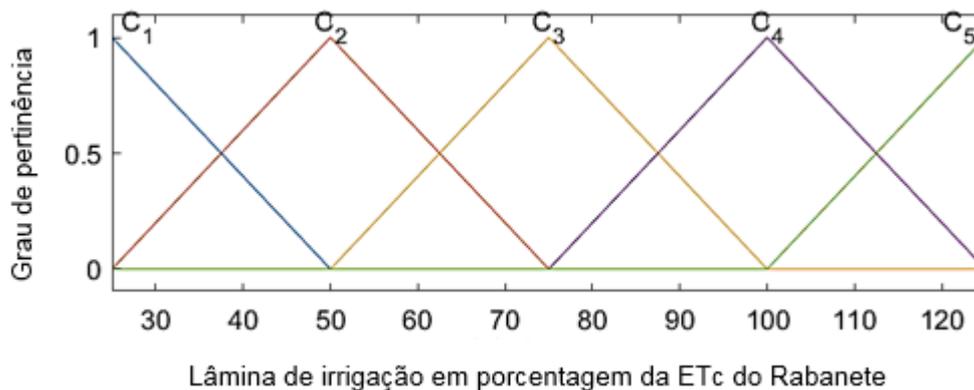
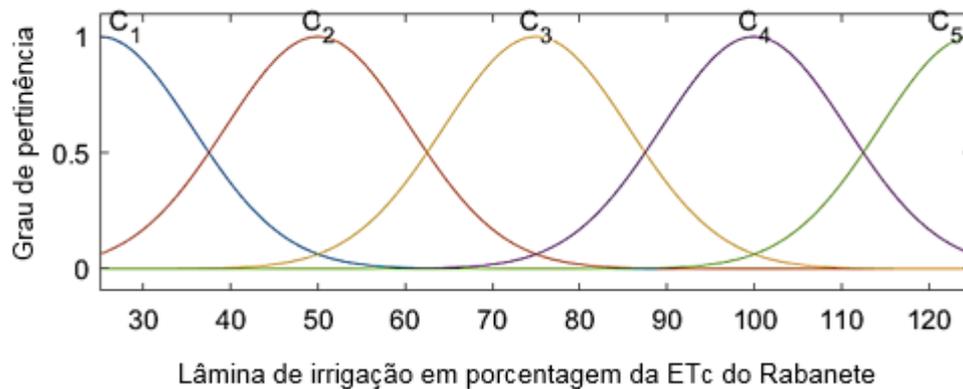


Figura 8. Funções de pertinência Gaussianas das variáveis de entrada desenvolvida para cultura do Rabanete



As variáveis de entrada foram definidas a partir das lâmina de irrigação e dos valores obtidos da produtividade da cultura, no DAS 35. Para constituição da variável de entrada “Lâminas de Irrigação”, foram atribuído cinco conjuntos *Fuzzy* indicado por $L_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$. Essa definição foi estabelecida, de acordo com o experimento realizado, pelas lâminas de irrigação estimadas conforme os níveis da ETc, sendo a evolução de cada lâmina em 25% para $i = 1, 2, 3, 4, 5$.

A Tabela 3 demonstra os conjuntos *Fuzzy* definidos com seus delimitadores para a variável de entrada do tipo triangular.

Tabela 3. Delimitadores das variáveis de entrada triangulares

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
C_1	Triangular	[0 25 50]
C_2	Triangular	[25 50 75]
C_3	Triangular	[50 75 100]
C_4	Triangular	[75 100 125]
C_5	Triangular	[100 125 150]

Para a determinação dos delimitadores, das funções de pertinência do tipo Gaussiana, foi realizada a conversão dos delimitadores triangulares, com parâmetros $[a, b, c]$, para os parâmetros gaussiano $[\sigma, m]$, utilizando os comandos do *software* Matlab e utilizando-se a Equação 5:

$$\sigma = \frac{c-b}{2 \cdot \sqrt{-2 \cdot \log(0,5)}} \quad (5)$$

sendo σ um parâmetro representando um desvio padrão numa distribuição gaussiana e $m = b$, o ponto médio dos dados. A Tabela 4 demonstra os delimitadores do tipo gaussiano, para as funções de pertinência da variável de entrada.

Tabela 4. Delimitadores das variáveis de entrada Gaussianas

Conjunto Fuzzy	Tipo	Delimitadores
C_1	Gaussiana	[14,38 25 35,62]
C_2	Gaussiana	[39,38 50 60,62]
C_3	Gaussiana	[64,38 75 85,62]
C_4	Gaussiana	[89,38 100 110,62]
C_5	Gaussiana	[114,38 125 135,62]

1.2.2.2 Método de construção dos conjuntos *Fuzzy* das variáveis de saída

Os conjuntos *Fuzzy* de saída foram definidos por cinco delimitadores nas funções de pertinência estabelecidas de forma triangular, com o grau de pertinência 1,00.

Conforme Santos (2015), a utilização da função de pertinência Gaussiana obtém desvantagem sobre a função de pertinência triangular. Por apresentar falta de simetria dos dados, a função de pertinência Gaussiana não é aconselhável para aplicação das variáveis de saída. Sendo assim a função proposta para as variáveis de saída foi de forma triangular.

A escolha da função de pertinência triangular para as variáveis de saída ocorreu devido a facilidade computacional na obtenção e manipulação dos dados, além das suas vantagens em alcançar melhores resultados com os menores erros, já que a função passa pela médias dos dados (PEREIRA FILHO, 1999).

Os delimitadores das funções de pertinência foram definidos conforme Choueri (2018), com distância de 1 desvio padrão da média, sobre das lâminas de irrigação estão definidas na Tabela 5.

Tabela 5. Características dos delimitadores para a variável de saída do sistema baseado em regra *Fuzzy*, com funções de pertinência triangular e Gaussiana

Conjunto Fuzzy	Tipo	Delimitadores
C_1	Triangular	$[p_1 - \sigma_1, p_1, p_1 + \sigma_1]$
C_2	Triangular	$[p_2 - \sigma_2, p_2, p_2 + \sigma_2]$
C_3	Triangular	$[p_3 - \sigma_3, p_3, p_3 + \sigma_3]$
C_4	Triangular	$[p_4 - \sigma_4, p_4, p_4 + \sigma_4]$
C_5	Triangular	$[p_5 - \sigma_5, p_5, p_5 + \sigma_5]$

Legenda: σ_i = desvio adotado para a produtividade de cada lâmina; p_i = valores da média da produtividade em cada lâminas aplicadas; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 = representados dos valores de cada lâmina de irrigação, em nível de 25% da ETc..

Além disto, para as médias m_i da variável de saída relacionadas aos conjuntos de entrada C_i , poderiam não serem crescentes, isto é, não necessariamente ocorrer $m_1 \leq m_2 \leq m_3 \leq m_4 \leq m_5$. Logo, buscando-se realizar uma reordenação de tais valores, definiu-se o conjunto ordenado $\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\} = \{m_{k_1}, m_{k_2}, m_{k_3}, m_{k_4}, m_{k_5}\}$, onde $m_{k_1} \leq m_{k_2} \leq m_{k_3} \leq m_{k_4} \leq m_{k_5}$, e $k_i \in \{1,2,3,4,5\}$, $i = 1,2,3,4,5$.

Definições semelhantes da utilização de funções de pertinência foram observadas em estudos desenvolvidos por Cremasco (2008), Cremasco et al. (2010), Gabriel Filho et al. (2011), Gabriel Filho (2015) e Putti et al. (2017).

1.2.2.3 Método de elaboração da base de regras

A partir da seguinte premissa: “Se (antecedente) então (consequente)”, o que implica em “Se Lâmina de irrigação da ETc (%) é C_i então a variável saída é C_{k_i} , $i = 1,2,3,4,5$, foi desenvolvida cinco regras com as variáveis de entrada (Lâmina) e saída (Fitomassa fresca da raiz tuberosa) para os modelos *Fuzzy*.

O desenvolvimento das regras *fuzzy* por meio das combinações de variáveis é relacionada ao grau de pertinência associado aos conjuntos *Fuzzy*. A Tabela 6 descreve os conjuntos *Fuzzy* de entrada e saída desenvolvido para o presente trabalho.

Tabela 6. Características dos Conjuntos *fuzzy*, entrada e saída, com pontos de grau de pertinência 1,00

Conjunto <i>Fuzzy</i> de entrada	Conjunto <i>Fuzzy</i> de saída
C_1	C_{k_1}
C_2	C_{k_2}
C_3	C_{k_3}
C_4	C_{k_5}
C_5	C_{k_5}

Legenda: C_i = conjunto *fuzzy* das variáveis de entrada; C_{k_i} conjunto *fuzzy* das variáveis de saída.

O conjunto de saída foi confeccionado com a média dos dados de cada lâmina de irrigação da ETc, em ordem crescente, onde $C_{k_1} < C_{k_2} < C_{k_3} < C_{k_4} < C_{k_5}$.

1.2.2.4 Método de Inferência de Mamdani e defuzzificação

Para a inferência do sistema, foi utilizado o método Mamdani apresentado por Mamdani e Assilian (1975) e de acordo com Sizilio (2012) e Massad et al. (2004) é o método mais utilizado no período da inferência, por sua eficiência e simplicidade em adaptar-se aos controladores, e por se apresentar adequado com as intuições humanas.

O método Mamdani consiste em agregar as regras, definidas em Se-Então, por operadores lógicos máximo (OU) e mínimo (E). A relação *Fuzzy R*, que modela a base de regra é um subconjunto *Fuzzy*, onde é definida em uma função de pertinência e expressa pela próxima Equação 6:

$$\varphi R(x, u) = \max_{i \leq i \leq r} (\varphi R_i(x, u)) = \max_{i \leq i \leq r} [(\varphi A_i(x) \wedge \varphi B_i(u))] \quad (6)$$

onde u representa o controle, x representa o estado, r a quantidade de regras que está composta na base de regras, os subconjuntos A_i e B_i (MAMDANI; ASSILIAN, 1975). Os valores de $\varphi A_i(x)$ e $\varphi B_i(u)$ são o grau de pertinência que x e u estão, respectivamente, nos subconjuntos *Fuzzy* A_i e B_i .

Para ilustrar o método, será utilizado a seguir duas regras genéricas, cada uma com duas entradas e uma saída, tal como ilustrado em Peixoto (2005) (

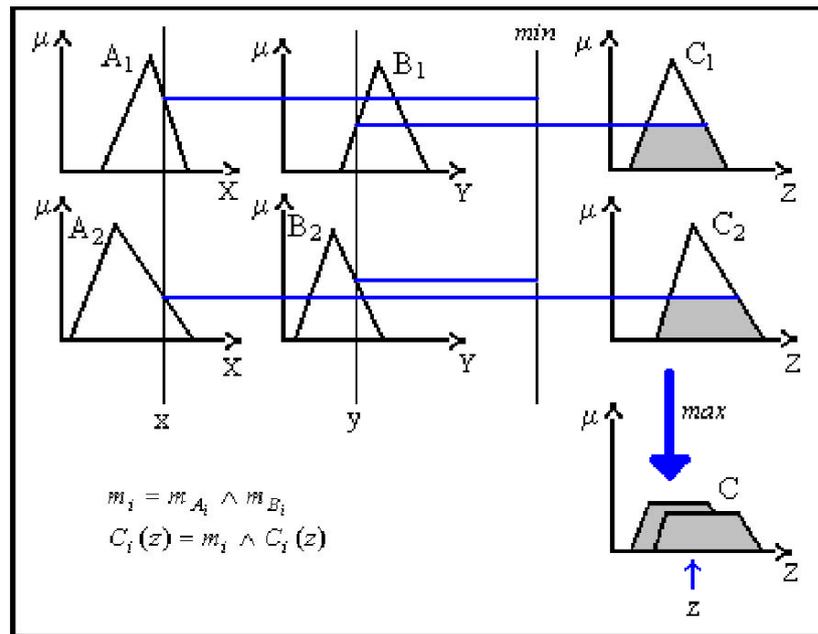
Figura 9), dadas por:

R_1 : SE x é A_1 E y é B_1 ENTÃO z é C_1 .

R_2 : SE x é A_2 E y é B_2 ENTÃO z é C_2 .

onde A_i, B_i, C_i são conjuntos fuzzy.

Figura 9. Método de inferência de Mamdani



Fonte: PEIXOTO (2005).

Também segundo a mesma autora, o primeiro passo do método consiste basicamente na utilização do operador “E”. Os números de entrada *Fuzzy* (isto é, conjuntos de pertinência) A_i e B_i são combinados usando o operador mínimo que corresponde ao conectivo *E* de acordo com as regras de intersecção *Fuzzy*. Esta operação é chamada agregação.

Escolhidos os valores de entrada para x e y no eixo horizontal e considerando-se a regra R_1 , determinam-se retas verticais interceptando os valores de entrada e conseqüentemente as funções $\mu_{A_1}(x)$ e $\mu_{B_1}(y)$. Determinam-se agora retas horizontais passando a primeira por $\mu_{A_1}(x)$ e $\mu_{B_1}(y)$.

Usando o conectivo *E*, é necessário obter o menor valor e projetar uma linha horizontal sobre o conjunto *Fuzzy* conseqüente C_1 , e isto é feito em $w_{C_1} = \min\{\mu_{A_1}(x), \mu_{B_1}(y)\}$. Isto gera um truncamento no conjunto C_1 e desta forma, é possível criar novo conjunto C'_1 , cuja função de pertinência é dada por $\mu_{C'_1}(z) = \min\{w_{C_1}, \mu_{C_1}(z)\}$, para todo z . Considerações análogas são feitas para a regra R_2 . As operações acima estão representadas na

Figura 9 e o conjunto *Fuzzy* conseqüente da regra R_2 é C_2 .

O segundo passo do método de inferência de Mamdani consiste na utilização do operador “E”. Nesta operação, chamada composição, os conjuntos *Fuzzy* correspondentes a C'_1 e C'_2 são combinados usando o operador máximo, que

corresponde ao conectivo *OU* de acordo com as regras da união *Fuzzy*. O operador máximo cria o contorno comum aos dois conjuntos *Fuzzy C* da

Figura 9. Para um sistema com n regras, o procedimento é análogo, com contribuição de cada regra individualmente de forma a se obter a saída.

Na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras fuzzy é traduzida num valor real. O objetivo é obter-se um único número real que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos da variável linguística de saída. Para seleccionar o método apropriado pode-se utilizar um enfoque baseado no centroide ou nos valores máximos que ocorrem na função de pertinência resultante.

Para a defuzzificação do sistema foi utilizado o método do Centro de Gravidade (G(B)), conhecido como Centroide ou Centro de Área. De acordo com Barros (2010), esse método de defuzzificação se assemelha à uma média aritmética para a distribuição de frequências das variáveis do sistema, com peso dos valores $\varphi B(u_i)$ indicando a compatibilidades dos dados de u_i em relação aos princípios formulados pelo conjunto *Fuzzy*. Seu cálculo é definido pelas Equações 7 e 8 nos casos discreto e contínuo, respectivamente:

$$\bar{z} = \frac{\sum_x \mu_A(x)x}{\sum_x \mu_A(x)} \quad (7)$$

e

$$\bar{z} = \frac{\int \mu_A(x)x dx}{\int \mu_A(x) dx} \quad (8)$$

Para a realização das simulações numéricas do controlador fuzzy desenvolvido utilizou-se o software MATLAB através do *Fuzzy Logic Toolbox*.

1.2.3 Softwares utilizados

Para confecção do modelo *Fuzzy*, o sistema baseado em regras *Fuzzy*, determinação das funções de pertinências, gráficos e mapas das superfícies de contorno do sistema, foram utilizados planilhas eletrônicas, disponível no *software* Excel 2016, e uma ferramenta com denominação *Fuzzy Logic Toolbox* presente no *software* Matlab®.

Para realização das análises de regressão e testes do ajuste do modelo, foi empregado o *software* Minitab na versão 17.0 (2014). Todos os *softwares* utilizados estão licenciados pela Faculdade de Ciência e Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus de Tupã.

1.2.4 Análise de Regressão

O modelo de regressão utilizado nas análises dos dados foi de grau 2, onde seu objetivo consiste em demonstrar a relação de uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes, por meio de um modelo matemático baseado em n observações (TOLEDO, 2015).

A relação entre as variáveis x (dependente ou explicativa) e y (independente ou explicativa), em regressão de grau dois representada pela Equação 9 a seguir:

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \beta x_i^2 + \varepsilon_i \quad (9)$$

onde: α é o coeficiente linear (intercepto); β é o coeficiente angular (inclinação); ε_i é o erro da regressão; Y_i é a variável aleatória e x_i é a variável observável, supostamente sem erro (CASSELA, 2010).

No entanto, dependendo da situação, uma das variáveis pode ser determinada sem ocorrência de erro, ou seja, $E\varepsilon_i = 0$, expressa pela Equação 10 a seguir:

$$EY_i = \alpha + \beta x_i \quad (10)$$

onde EY_i é a média das funções de variáveis dependentes e $E\varepsilon_i$ a média do erro (TRIOLA, 2008).

Em alguns casos a relação entre as variáveis analisadas podem não ser forma linear, necessitando outro tipo de função para a sua realidade. Uma forma mais encontrada de representação dessas variáveis não lineares está na formação de parábolas. A obtenção dos parâmetros de uma parábola é realizada por meio da aplicação do método dos mínimos quadrados (GUJARATI, 2011).

Ainda segundo o autor, método dos mínimos quadrados consiste em encontrar o melhor ajuste para o conjunto estudado, de tal forma a minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores estimados. Sua Expressão 11 é dada por:

$$\sum(\varepsilon_i^2) = \sum(y - \hat{y})^2 \quad (11)$$

com $y = a + bx + cx^2$ ou $y = a + bx + cx^2 + dx^3$; e $\hat{y} = b_0 + b_1x$ (equação da reta ajustada (HAIR et al., 2009).

Para explicar o poder da regressão e do ajuste do modelo desenvolvido pelo método dos mínimos quadrados utiliza-se o coeficiente de determinação (R^2), onde será definido nas próximas seções.

1.2.5 Teste de ajustamento de modelos

A partir do sistema baseado em regras *Fuzzy*, relacionada ao modelo de regressão de grau 2, foi possível a verificação e análise da intensidade de associação por meio de aplicações de alguns testes e cálculos de índices. O conceito dos testes estatísticos utilizados pelo presente estudos estão descritos à seguir.

1.2.5.1 Teste Qui-Quadrado (χ^2)

Com objetivo de verificar a existência da independência entre duas variáveis em uma mesma medida de unidade experimental, o teste Qui-Quadrado é utilizado como teste de aderência que não necessita de parâmetros populacionais, médias ou variâncias (BEIGUELMAN, 1996).

A estatística do teste é obtida por meio da comparação entre frequências observadas e frequências esperada na Expressão 12 a seguir:

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

onde y_k é o valor aferido experimentalmente e \hat{y}_k é o valor estimado pelo modelo (PESTANA; GAGEIRO, 2014).

Seu procedimento está na realização após a obtenção do cálculo do p-valor, considerando $n - 1$ em grau de liberdade. Na ocorrência de $p > 0,05$, constata-se que não há diferenças significativas entre os dados obtidos experimentalmente e o valores obtidos pelo modelo analisado, sendo assim a obtenção do modelo adequado (VIEIRA, 2008).

1.2.5.2 Coeficiente de determinação (R^2)

A utilização do coeficiente de determinação (R^2) consiste na busca da avaliação da qualidade do ajuste do modelo em uma variação entre 0 e 1, indicado em porcentagem, permitindo analisar quanto o modelo foi capaz em explicar os dados coletados experimentalmente (BRUNI, 2008; HOFFMANN, 2015). A Equação 13 está expressa abaixo:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (13)$$

com y_k é o valor verificado do experimento, \bar{y} é a média dos valores obtidos experimentalmente e \hat{y}_k é o valor estimado pelo modelo (OSTERTAGOVÁ, 2012). O coeficiente de determinação é adquirida por meio da regressão simples, com elevação do coeficiente de correlação de Person. Sua medida será sempre positiva.

1.2.5.3 Desvio do quadrado médio da raiz ($RMSE$)

Para analisar a incerteza do modelo, foi realizado o desvio do quadrado médio da raiz ($RMSE$), que de acordo Willmott (1981), é uma medida de incerteza do modelo. Ao ser utilizado, ele indica o tamanho do erro gerado pelo modelo. Quanto melhor o ajuste do modelo, menor é o erro. Sua utilização está na diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores reais que está sendo modelados. Essa diferença pode ser definida também como resíduo e sua fórmula é expressa pela Equação 14 da seguinte maneira:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (14)$$

com \hat{y}_i sendo os valores previstos, y_i os valores observados e n o tamanho da amostra (SANTOS et al., 2014). No entanto, conforme Willmott (1985), o *RMSE* tende ser mais afetado por grandes resíduos, pois se utiliza do quadrado dos resíduos em sua base de cálculo.

1.2.5.4 Erro quadrado médio da raiz (*MAE*)

Outra medida utilizada para analisar a magnitude média do erro do modelo, foi o erro absoluto médio (*MAE*). Ele é utilizado para resolver problemas com grande quantidade de resíduos em um conjunto de previsões. Para Fox (1981), o *MAE* é uma média sobre os dados de testes entre a diferença absoluta das previsões e os valores reais observados, com as diferenças individuais com pesos iguais. Sua expressão é dada pela Expressão 15 a seguir:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|}{n} \quad (15)$$

com n é o número total de repetições, \hat{y}_i é o valor estimado pelo modelo associado à x_i e y_i é o valor aferido experimentalmente das repetições associada à x_i (MESKINI-VISHKAEE; DAVATGAR, 2018).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento da cultura está ligado diretamente com o manejo adequado da irrigação. De acordo com Lacerda et al. (2017), o estresse hídrico pode comprometer o desenvolvimento do Rabanete, promovendo alterações nos componentes fisiológicos, morfológicos e biológicos na cultura. Para Slomp et al. (2011), os níveis de irrigação afetam diretamente a produtividade e qualidade da cultura.

Conforme o experimento realizado por Cremasco et al. (2015), a produtividade do Rabanete ocorreu no 35 *DAS* e nesse contexto, a presente secção demonstra os resultados direcionados com a produtividade da cultura do Rabanete, sobre a variável fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), com as lâminas de

25%, 50%, 75%, 100% e 125% e o tipo de água utilizada na irrigação, que neste caso utilizou-se água convencional e magnetizada.

1.3.1 Sistema baseado em regras Fuzzy da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água convencional aos 35 DAT

A Figura 10 demonstra as funções de pertinências triangulares de saída, confeccionadas para os modelos *Fuzzy*, na avaliação da variável FFRT, no tratamento AC. Já a Tabela 7 apresenta os delimitadores das funções de pertinência de saída.

Figura 10. Funções de pertinência triangulares para a variável de saída (fitomassa fresca da raiz tuberosa), para o tratamento com irrigação com tipo de água convencional

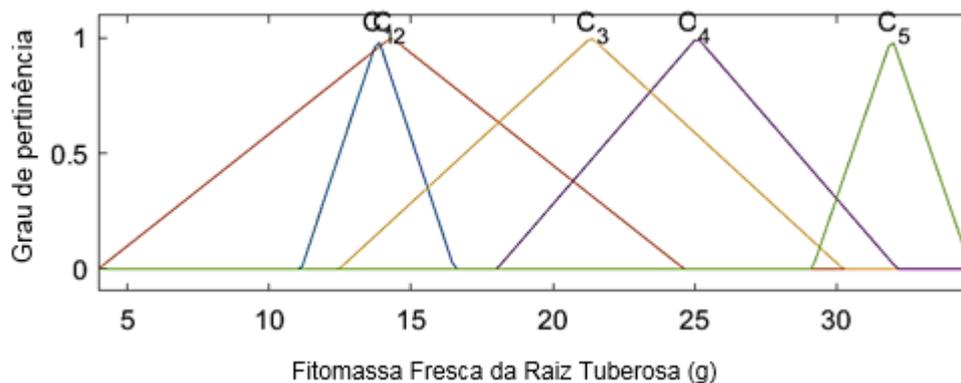


Tabela 7. Delimitadores das funções de pertinência de saída, para a variável FFRT, da cultura do Rabanete, irrigado com AC

Conjunto Fuzzy	Tipo	Delimitadores
		Água Convencional
C_1	Triangular	[11,133 13,83 16,528]
C_2	Triangular	[3,973 14,301 24,629]
C_3	Triangular	[12,465 21,349 30,233]
C_4	Triangular	[18,023 25,085 32,147]
C_5	Triangular	[29,145 31,947 34,75]

A Tabela 8 apresenta a base de regra para os modelos *fuzzy*, na variável fitomassa fresca da raiz tuberosa, no tratamento com água convencional.

Tabela 8. Base de regra para os modelos *Fuzzy*, com funções de pertinência triangular e Gaussiana

Regra	Conjunto de Entrada	Conjunto de Saída
		Água Convencional
1	1	3

2	2	1
3	3	4
4	4	5
5	5	2

A validação dos modelos *Fuzzy*, por meio da regressão polinomial de grau 2 e apresentação dos testes de ajustamento dos modelos, está descrita na Tabela 9. Seu objetivo está em comparar qual modelo *Fuzzy* se adapta melhor, de forma agrônômica, na produtividade do Rabanete no *DAS* 35 e no tipo de tratamento.

Tabela 9. Síntese da validação do modelo *fuzzy* nas funções triangulares e Gaussianas

Tratamento	Índices	Modelo <i>Fuzzy</i> triangular	Modelo <i>Fuzzy</i> Gaussiana	Regressão polinomial
				$y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
AC	χ^2	57.277 (p=0.0002)	67.489 (p=0)	125.262 (p=0)
	R^2	0.537 (p=0)	0.504 (p=0.0001)	0.104 (p=0.116)
	<i>RMSE</i>	6.332	6.898	8.808
	<i>MAE</i>	5.135	5.943	7.831

Legenda: χ^2 = Teste Qui-Quadrado; R^2 = Coeficiente de determinação; *RMSE* = Desvio do quadrado médio da raiz; *MAE* = Erro quadrado médio da raiz; AC = Água convencional; ATM = Água tratada magneticamente.

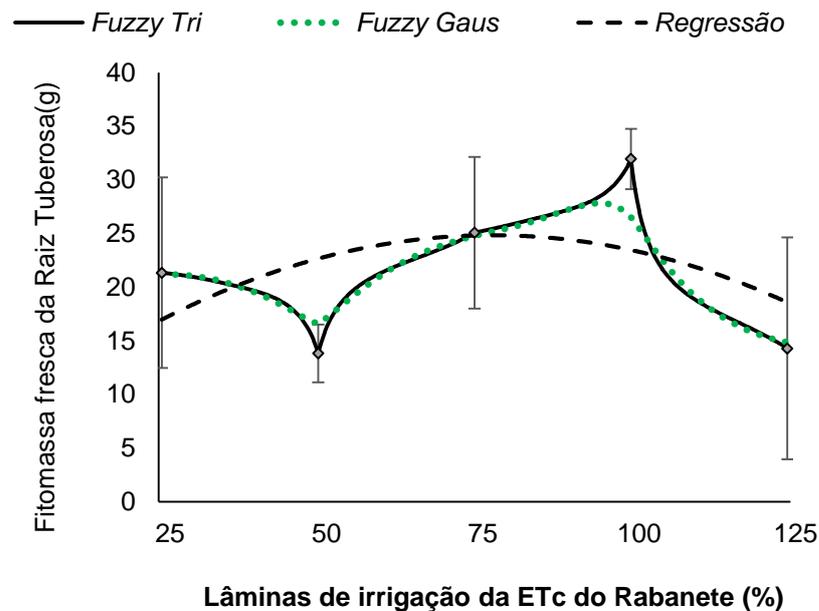
Para o tratamento AC, constatou-se significância entres os modelos *Fuzzy* e o modelo de regressão, para o R^2 e χ^2 . No entanto o ajuste foi muito pequeno para esses coeficientes. Assim verifica-se que os modelos *Fuzzy* foram superiores em relação ao modelo de regressão, apresentando menores erros.

Estudos comprovando a eficiência da lógica *Fuzzy* sobre análise de regressão polinomial e na interpretação de dados, vem obtendo grande espaço no meio acadêmico. Isso pode ser visto em Sousa, Duarte e Pereira (2006), onde verificaram a superioridade da lógica *Fuzzy* em demonstrar a indicação de exames cintilográfico para detecção do hipertireoidismo; e em Putti (2015) na verificação da produtividade da cultura da alface, quando submetida a irrigação com água magnetizada.

Realizando a comparação entre os modelos *Fuzzy*, constata-se que o modelo *Fuzzy* triangular demonstrou melhor ajuste e menores erros sobre o modelo *Fuzzy* gaussiano. No entanto o modelo *Fuzzy* triangular, não demonstra de forma suave a realidade do fenômeno agrônômico, sobre a variável fitomassa fresca da raiz

tuberosa. Isso pode ser observado, na função reposta dos modelos desenvolvidos Figura 11.

Figura 11. Comparação entre as função resposta (Triangulares/Gaussianas), para o cultivo do Rabanete, irrigado com água convencional, sobre a variável FFRT



Analisando a função de reposta, verifica que boa produtividade da cultura foi obtida no modelo *Fuzzy* triangular e gaussiano, na lâmina de 100% da ETC (31,9 g). Já o modelo estatístico apresentou produtividade na lâmina de 75%, (25,1 g) sendo este inferior a produção média adquirida pelo modelo *Fuzzy*.

Resultados similares podem ser constatados nos estudos desenvolvidos por Silva et al. (2013), na observação da boa produtividade da beterraba na lâmina de 100%, quando aplicada a lógica *Fuzzy*.

Ao analisar o comportamento do desenvolvimento da cultura, observa-se que o excesso ou a falta hídrica, nas lâminas 50% e 125% da ETC, produziram a redução da produtividade, sendo inferior quando observada pelo modelo *Fuzzy*. Essa redução pode ser vista no estudo desenvolvido por Bregonci et al. (2008), com a cultura do Rabanete. Em seu estudo o autor verificou que o estresse hídrico aplicado em todas as fases do desenvolvimento da cultura, provocou a diminuição do diâmetro fresca da raiz tuberosa, promovendo baixa produtividade.

Comparando de forma agrônômica o desempenho dos modelos *Fuzzy* confeccionados, pode-se verificar que a curva do modelo *Fuzzy* com funções de pertinência Gaussiana apresentou melhor descrição da produtividade da cultura do Rabanete. A suavidade da curva descreve, de forma homogênea, os efeitos na produtividade da cultura irrigada com água convencional. Isso ocorre devido a influência das funções de pertinência das variáveis de entrada no sistema *Fuzzy*.

Apesar da função de pertinência Gaussiana não alcançar todos os pontos médios, entre as lâminas de irrigação analisadas, está tendendo a obter pouca variação dos resultados, quando alterações drásticas são observadas nos dados iniciais. No entanto isso não pode ser observado nas funções de pertinência triangulares, pois qualquer alteração inicial, pode promover picos de dados que não demonstram, de forma real, o fenômeno agrônômico estudado.

1.3.2 Sistema baseado em regras *Fuzzy* da produtividade do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente aos 35 DAT

Para a irrigação da cultura do Rabanete com água tratada magneticamente, também foi desenvolvido uma modelagem *Fuzzy* na interpretação dos dados relacionados com a produtividade da cultura. As funções de pertinência dos conjuntos de saída, para o SBRF com água magnetizada, estão representadas na Figura 12, enquanto que seus delimitadores estão descritos na Tabela 10.

Figura 12. Função de pertinência triangular para a variável FFRT da cultura do Rabanete irrigada com ATM

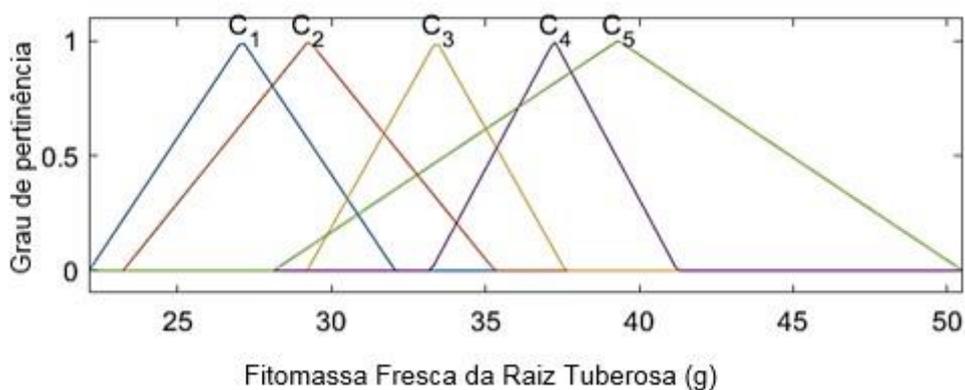


Tabela 10. Delimitadores das funções de pertinência de saída, para a variável FFRT, da cultura do Rabanete, irrigado com ATM

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
		Água Magnetizada
C_1	Triangular	[22,128 27,104 32,08]
C_2	Triangular	[23,232 29,271 35,31]
C_3	Triangular	[29,207 33,407 37,607]
C_4	Triangular	[33,235 37,238 41,241]
C_5	Triangular	[28,116 39,311 50,506]

Conforme descrito na metodologia, a Tabela 11 exibe base de regra confeccionada para os modelos *Fuzzy* triangular e gaussiano, na variável FFRT, com água tratada magneticamente.

Tabela 11. Base de regra para os modelos *Fuzzy*, com funções de pertinência triangular e Gaussiana

Regra	Conjunto de Entrada	Conjunto de Saída
		Água Tratada Magneticamente
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	4	4
5	5	5

A validação dos modelos *Fuzzy* e estatísticos, utilizando a regressão polinomial de grau 2 e demonstração dos resultados dos testes de ajustamentos dos modelos, pode ser observados na Tabela 12.

Tabela 12. Síntese da validação do modelo *Fuzzy* nas funções triangulares e gaussianas.

Tratamento	Índices	Modelo <i>Fuzzy</i> triangular	Modelo <i>Fuzzy</i> gaussiana	Regressão polinomial
				$y = 0.x^2 + 0.138.x + 23.306$
ATM	χ^2	27.361 (p=0.2879)	27.564 (p=0.2788)	27.906 (p=0.264)
	R^2	0.376 (p=0.0011)	0.375 (p=0.0011)	0.371 (p=0.0012)
	RMSE	5.936	5.944	5.959
	MAE	4.591	4.572	4.691

Legenda: χ^2 = Teste Qui-Quadrado; R^2 = Coeficiente de determinação; RMSE = Desvio do quadrado médio da raiz; MAE = Erro quadrado médio da raiz; AC = Água convencional; ATM = Água tratada magneticamente.

De acordo com o coeficiente de determinação R^2 dos modelos desenvolvidos, verifica-se que o modelo *Fuzzy* demonstrou, com menores erros e maior nível de significância, melhor ajuste dos dados da produtividade da cultura.

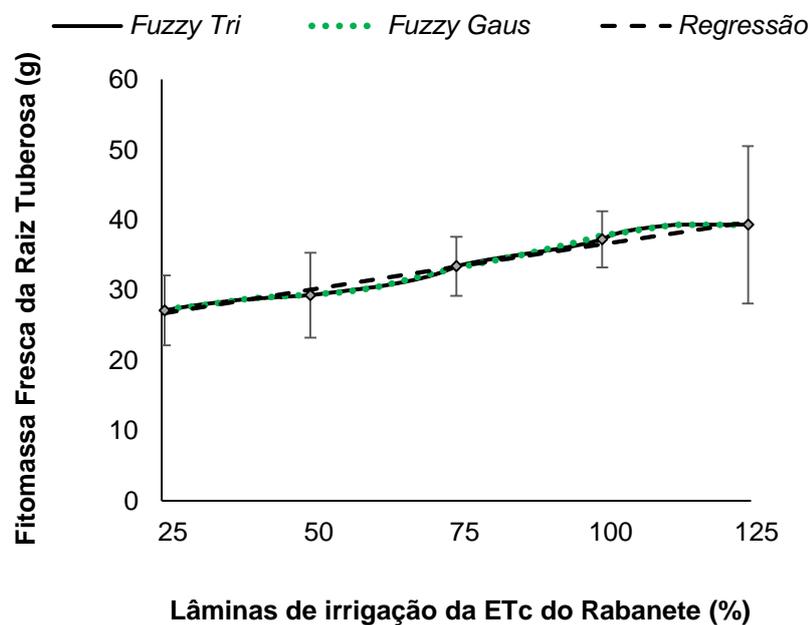
Comparando os dados obtidos com a utilização da água tratada magneticamente (ATM), com água convencional, constata-se que os dados obtidos com a utilização da água ATM, demonstraram menores erros dos modelos *Fuzzy* e polinomial.

Analisando o modelo *Fuzzy*, com funções de pertinência triangular, verifica que o erro *RMSE* obtido pelos tratamentos AC e ATM, foram de 6.332 e 5.936, respectivamente, corroborando a eficiência do modelo *Fuzzy*.

Destaca-se que o modelo *Fuzzy* com ATM alcançou os menores erros sobre o modelo polinomial desenvolvido, sendo 5,936 e 5959 do *RMSE*, respectivamente. Isso reforça o uso da modelagem *Fuzzy* na representação dos dados e da utilização da ATM na produtividade da cultura.

Para estudo dos efeitos gerados à cultura do rabanete, pela irrigação as ATM, a Figura 13 apresenta a função de resposta dos modelos *Fuzzy* e de regressão.

Figura 13. Comparação entre as funções de resposta (Triangulares/Gaussianas) para modelo *Fuzzy*, na produtividade da cultura do rabanete, irrigado com ATM



A função de resposta mostra que a variável fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT) alcançou boa produtividade a partir da lâmina de irrigação de 100% da ETc, com a utilização do modelo *Fuzzy*. No entanto não houve alterações significativas entre os modelos *Fuzzy*, na demonstração da produtividade. Em alguns pontos da

curvatura, o modelo *Fuzzy* com funções de pertinência Gaussiana foi superior, se comparado com o modelo *Fuzzy* com funções triangulares.

A utilização do modelo *Fuzzy* com funções Gaussianas torna um grande auxiliar na tomada, no ponto de vista agrônomo, pois o modelo com funções triangulares tende a apresentar picos de oscilações dos dados analisados. Tais picos não são recomendados para representação de fenômenos naturais, sendo assim necessário o descarte da sua utilização.

Analisando a utilização dos dois tipos de água, a lâmina de irrigação de 100% é eficiente para a variável FFRT. No entanto, a média de produtividade da lâmina de 100%, nos dois tipos de tratamento, demonstra diferença significativa. O desenvolvimento, com tratamento AC, a produtividade foi de 31,9 g, contra 37,2 g produzidos pela utilização da ATM. Esse aumento de produtividade está relacionado com a reorganização das moléculas da água, quando exposta ao campo magnético

Destaca-se ainda que a lâmina de 125% foi superior à lâmina de 100%, corroborando com os resultados apresentados em Putti et al. (2014) na aplicação da ATM no cultivo da cenoura. Os autores verificaram um aumento no incremento da raiz tuberosa de 22% e 14%, na utilização das lâminas de 50% e 125%, respectivamente, da utilização da ATM, quando comparado à eficiência do tratamento convencional

1.4 CONCLUSÃO

As modelagens *Fuzzy* desenvolvidas foram capazes de apresentar o crescimento e estimar a produtividade da cultura, relacionada com a variável fitomassa fresca da raiz tuberosa, com maior eficiência quando realizada a comparação com o modelo estatístico confeccionado.

Embora a modelagem *Fuzzy*, com funções de pertinência triangulares, tenha apresentado melhores resultados na validação do modelo, a modelagem *Fuzzy*, com função de pertinência Gaussiana, demonstrou ser mais eficiente na representação da realidade agrônoma.

Verificado o desempenho da modelagem *Fuzzy* na interpretação e na estimativa dos dados, justifica-se sua recomendação para os produtores agrícolas, nas tomadas de decisões.

A lâmina de 100% demonstrou sua eficiência nos dois tratamentos de irrigação, no entanto a utilização da água magnetizada apresentou melhor efetividade no incremento da variável FFRT, em relação ao tipo de tratamento de irrigação utilizado. Com isso recomenda-se a incorporação da ATM na irrigação de culturas.

REFERÊNCIAS

AL-OGAIDI, A. A. M. et al. The influence of magnetized water on soil water dynamics under drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, Palmerston North, MW, v. 180, part A, p. 70-77, jan 2017.

AZEVEDO, L. P.; SAAD, J. C. C. Uso de dois espaçamentos entre gotejadores na mesma linha lateral e seus efeitos sobre a formação do bulbo molhado no solo e parâmetros físicos de rabanete. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 148-167, 2012.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. 2. ed. Campinas: UNICAM/IMECC, 2010.

BEIGUELMAN, B. **Curso de bioestatística básica**. 4. ed. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1996.

BENINI, L. C. Uma introdução à teoria dos conjuntos *fuzzy*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas *fuzzy*, 2., 2012, Natal. **Anais...**, São Carlos: SBMAC, 2012.

BENINI, L. C.; MENEGUETE JR, M. Uma abordagem para modelagem de dados com o uso de sistemas *Neuro-fuzzy*: aplicações geoespaciais. **Notas em matemática aplicada**, São Carlos, v. 43, p. 88, 2009. Disponível em <<http://www.sbmac.org.br/boletim/arquivos2009/Volume-43.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2017.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, 1996. 596 p.

BREGONCI, I. S. et al. Desenvolvimento do sistema radicular do rabanete em condição de estresse hídrico. **IDESIA (Chile)**, Arica, v. 26, n. 1, p. 33-38, jan./abr. 2008.

BRUNI A. L. **Estatística aplicada à gestão empresarial**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

CARDOSO, A. I. I.; HIRAKI, H. Avaliação de doses e épocas de aplicação de nitrato de cálcio em cobertura na cultura do rabanete. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 19, p. 328-331, 2001.

CASSELLA, G. **Inferência estatística**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

CORTEZ, J. W. M. **Esterco de bovino e nitrogênio na cultura de rabanete**. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

CHOUERI, M. **Modelagem fuzzy para avaliação do desenvolvimento da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente sem estresse hídrico**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento)-Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2018.

CREMASCO, C. P. et al. Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 44., 2015, São Pedro. **Anais...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2015. p. 1-9.

CREMASCO, C. P. et al. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores *fuzzy* para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 21-39, 2010.

CREMASCO, C. P. **Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

DANTAS, A. E. A. et al. Produção de rabanete (*Raphanus Sativus L.*) sob diferentes níveis e fontes de fertilizantes orgânicos. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2015, Fortaleza, **Anais...** Jaboticabal, SP: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2015. p. 1-9.

DEYVER, B. **Plataforma computacional fuzzy para avaliação nos estágios do tomateiro dos efeitos da irrigação e salinidade da água**. 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento)-Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2016.

DUTRA, M. et al. Avaliação produtiva de rabanete *Raphanus Sativus L.* submetido a preparados homeopáticos de tiririca *Cyperus rotundus*. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Fortaleza, v. 9, n. 2, p. 151-159, set. 2014.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Produção de informação, 2006. 286 p.

EMBRAPA. **Hortaliças em revista: importância nutricional das hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa hortaliças, 2012. 16 p.

FAO. **Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 56 p.

FILGEUIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2007. 421 p.

- FOX, D. G. Judging Air Quality Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 62, p. 599-609, 1981.
- GABRIEL FILHO, L. R. A. **Sistemas fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias**. 2015. 258 p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional)-Faculdade de Ciência e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2015.
- GABRIEL FILHO, L. R. A. et al. Application of *fuzzy* logic for the evaluation of livestock slaughtering. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 813-825, jul./ago. 2011.
- GOUVEIA, A. M. S. **Adubação potássica na produção e qualidade pós-colheita do rabanete**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2011. 924 p.
- HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. São Paulo: Bookman, 2009. 688 p.
- HOFFMANN, R. **Análise de regressão: uma introdução à econometria**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2015. Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/48616/REGRESS.pdf?sequencia=5>>. Acesso em: 14 jan. 2018.
- KLAR, A. E. et. al. The effects of different irrigation depths on radish crops. **Irriga**, Botucatu, p. 150-159, 2015. Edição Especial 20 anos Irriga + 50 anos FCA.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928.
- LACERDA, V. R. et al. Características morfológicas e produtivas do rabanete so diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 1127-1134, jan./fev. 2017.
- LEITE, D.F. et al. Modelagem evolutiva granular *fuzzy*. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 5, 2011, São João del-Rei. **Anais...**, Brasília, DF, 2011. p. 81 – 86.
- LOLLATO, M. A. Produtividade na lavoura. **Revista Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, v. 3, n. 27, p. 32-34, abr. 2001. Disponível em: <<https://www.grupocultivar.com.br/artigos/produtividade-na-lavoura>> Acesso em: 25 set. 2017.
- LOPES, M. A. J. B. M. **Incorporação de lodo de esgoto e seus efeitos sobre alguns atributos do solo cultivado com rabanete (*Raphanus sativa* L)**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento em Processos Ambientais) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2008.

LUCCHESI, A. A. et al. Produtividade do rabanete (*Raphanus Sativus L.*) relacionado com a densidade de população. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, Piracicaba, v. 33, p. 577-83, 1976.

MAKISHIMA, N. O. **O cultivo das hortaliças**. 7. ed. São Paulo: Texto novo, 2004.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a *fuzzy* Logic Controller. **International Journal Man-Machine Studies**, Reino Unido v. 7, p. 1-13, 1975.

MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. O emprego da inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial. In: Seminário Catarinense de manutenção, 3, Joinville, **Anais...** Joinville: ABRAMAN, 2005.

MASSAD, E. et al. **Métodos quantitativos em Medicina**. 1. ed. Barueri: Manole Ltda, 2004.

MESKINI-VISHKAEI, F.; DAVATGAR, N. Evaluation of Different Predictor Models for Detailed Soil Particle-Size Distribution. **Pedosphere**, Beijing, v.28, n. 1, p.157–164, fev. 2018.

MOHAMED, A. I. Effects of magnetized low quality water on some soil properties and plant growth. **International Journal of Research in Chemistry and Environment**, Indore, v. 3, n. 2, p. 140-147, abr. 2013.

OSTERTAGOVÁ, E. Modelling using polynomial regression. **Procedia Engineering**, Reino Unido, v. 48, p. 500-506, nov. 2012.

PEIXOTO, M. S. **Sistemas Dinâmicos e Controladores fuzzy: um Estudo da Dispersão da Morte Súbita dos Citros em São Paulo**, Tese de Doutorado, IMECC-Unicamp, 2005

PEREIRA FILHO, R. D. **Desenvolvimento e implementação de controladores nebulosos em uma coluna piloto de destilação em batelada**. 1999. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de dados para ciências sociais: a complementariedade do SPSS**. 6. ed. Lisboa: Sílabo, 2014.

PIMENTA, A. H. M. **Geração genética de classificador fuzzy intervalar do tipo 2**. 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)-Universidade de São Carlos, São Carlos, 2009.

PUTTI, F. F. et al. A *fuzzy* mathematical model to estimate the effects of global warming on the vitality of *Laelia purpurata* orchids. **Mathematical Biosciences**, Nova York, v. 288, p. 124-129, 2017.

PUTTI, F. F. **Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa L.*) irrigada com água tratada magneticamente utilizando**

modelagem fuzzy. 2015. 205 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

PUTTI, F. F. et al. Resposta da cultura da cenoura irrigada com água tratada magneticamente e normal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 43., 2014, Campo Grande. **Anais...** Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2014. Disponível em: <<http://www.oportunidadeatodos.com.br/mkt/timol/estudo-cientifico-cenoura.pdf>>. Acesso em: 14 maio 2018.

PUTTI, F. F. **Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

REWAL, H. S.; MAHESHWARI, B. L. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings. **Bioelectromagnetics**, New York, v. 32, n. 1, p. 58-65, jan. 2011.

RODRIGUES, R. R. et al. Produção de rabanete em diferentes disponibilidades de água no solo. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 9, n. 17, p. 2121-2130. 2013.

ROSS, T. J. **fuzzy logic with engineering applications**. 2. ed. England: Wiley, 2010. 607 p.

SANTOS, J. C. C. et al. 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, jan./mar. 2014.

SANTOS, J. F. **Sistema inteligente fuzzy para auxílio ao diagnóstico de níveis de risco da gestação integrado à plataforma de telemedicina preneonatal**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)-Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SANTOS, W. O. et al. Variabilidade espacial e temporal das precipitações para a Microrregião de Pau dos Ferros-RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 3, p. 434-441, 2014.

SILVA, E. M. B. et al. Características produtiva do rabanete submetido a doses de cinza vegetal. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 241. 2015.

SILVA, J. M. et al. Cultivo do tomateiro em ambiente protegido sob diferentes taxas de reposição da evapotranspiração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 40-46, 2013.

SILVA NETO, G. C. **Um método para solução de problemas de otimização multiobjetivo em ambiente fuzzy**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Matemática)-Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher: FAPESP, 2007.

SIZILIO, G. R. M. A. **Método fuzzy para auxílio ao diagnóstico de câncer de mama em ambiente inteligente de telediagnóstico colaborativo para apoio à tomada de decisões**. 2012. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)– Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SLOMP, J. J. et al. Efeitos de diferentes níveis de irrigação baseados em frações do tanque classe "A" sobre a produção de rabanete (*Raphanus Sativus L.*) variedade "Crimson Giant". **Perspectiva**, Erechim, v. 35, n. 107, p. 99-107, set. 2011.

SOUSA, C. A.; DUARTE, P. S.; PEREIRA, J. C. R. Lógica fuzzy e regressão logística na decisão para prática de cintilografia das paratiróides. **Revista Saúde Pública**, São Paulo, v. 40, n. 5, p.898-906, 2006.

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

TOLEDO, G. L. **Estatística básica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2015. 464 p.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

VIEIRA, S. **Introdução à bioestatística**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995- 9005, 1985.

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

CAPÍTULO 2

MODELAGEM *FUZZY* NA AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS DO RABANETE UTILIZANDO TRATAMENTO COM ÁGUA CONVENCIONAL E MAGNETIZADA

Ana Cláudia Marassá Roza Boso

Camila Pires Cremasco Gabriel

RESUMO

O objetivo do presente capítulo é desenvolver um modelo matemático que permite avaliar as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, sobre diferentes níveis de lâminas de irrigação, utilizando água convencional e magnetizada. Para isso foi realizado, experimentalmente, o cultivo da cultura do Rabanete no Departamento de Engenharia Rural da UNESP – Faculdade de Ciências Agronômicas em Botucatu/SP, com utilização da água convencional na irrigação e lâminas de 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da evapotranspiração da cultura. Os dados adquiridos foram no ponto de colheita. Com os dados experimentais, houve a confecção de uma modelagem *Fuzzy*, baseada em regras *Fuzzy* e funções de pertinências, as quais permitiram avaliar e analisar o crescimento de cada variável biométrica da cultura estuda. Também foi desenvolvida uma exploração estática, com análise de regressão polinomial, de forma a comprovar os resultados obtidos e compará-los com o modelo *Fuzzy* elaborado. Averiguando os resultados obtidos, verificou-se que a modelagem *Fuzzy* apresentou de forma clara, a veracidade do desenvolvimento da cultura, sobre a influência das lâminas de irrigação. Com os menores erros do quadrado médio e melhores ajustes dos dados analisados. A o modelo *Fuzzy* demonstrou que a utilização da água magnetizada aumentou o crescimento produtividade da cultura, em relação a todas as variáveis biométricas, com redução de níveis de lâminas de irrigação, além de apresentar superioridade em relação ao modelo estatístico de regressão polinomial. Isso demonstra a importância da implementação da água tratada magneticamente na área da irrigação.

Palavras-chave: Elementos da cultura. Lógica *fuzzy*. Lâminas de irrigação. Regressão polinomial.

ABSTRACT

The objective of this chapter is to develop a mathematical model that allows the evaluation of the biometric variables of the radish culture on different levels of irrigation plates using conventional and magnetized water. For this purpose, the cultivation of two cycles of the Radish culture in the Department of Rural Engineering of UNESP - Faculty of Agronomic Sciences in Botucatu / SP, using conventional irrigation water and slides of 25%, 50%, 75 %, 100% and 125% of crop evapotranspiration. The data acquired were at the point of harvest. With the experimental data, a *Fuzzy's* modeling was developed, based on *Fuzzy's* rules and pertinence functions, which allowed to evaluate and analyze the growth of each biometric variable of the studied culture. It was also developed a static exploration, with polynomial regression analysis, in order to prove the results obtained and to compare them with the elaborated *Fuzzy's* model. As a result of the results obtained, it was verified that the *Fuzzy's* modeling presented, in a clear way, the veracity of the development of the culture, on the influence of the irrigation blades. With the smaller errors of the middle square and better adjustments of the analyzed data. The *Fuzzy's* model showed that the use of magnetized water increased the crop productivity growth, in relation to all biometric variables, with reduction of levels of irrigation slides, besides presenting superiority in relation to the statistical model of polynomial regression. This demonstrates the importance of the implementation of magnetically treated water in the irrigation area.

Keywords: Elements of culture. *Fuzzy's* logic. Irrigation glass slide. Polynomial regression.

2.1 INTRODUÇÃO

A estrutura de uma planta é composta pela raiz, caule, flor, folhas, semente e frutos. Cada componente exerce uma função específica para o seu crescimento, como a raiz, que tem a capacidade de fixação da planta e absorção dos nutrientes do solo para planta; o caule, que conduz os nutrientes da raiz para a parte superior da planta;

a flor, que representa a reprodução da planta, os frutos, que são a proteção das sementes; as folhas, as quais realizam a fotossíntese e a transpiração da planta; e as sementes, que são a proliferação da espécie (PIMENTEL, 2004).

De acordo com Marouelli (2008), o crescimento de uma planta é definido por várias fenológicas, divididas em: germinação das sementes, crescimento vegetativo, florescimento, frutificação, formação das sementes e senescência. Já no decorrer das fases fenológicas, os órgãos da planta crescem sincronizados, mantendo a proporção do seu desenvolvimento. Ainda segundo o autor o crescimento de um vegetal sofre influência de diversos fatores, como as condições climáticas, as condições ambientais do solo, o manejo adequado da cultura, além das interferências sofridas pelo homem e as condições hídricas no plantio. Essas influências são fatores importantes para a qualidade da produtividade de uma cultura.

A qualidade e desenvolvimento de uma cultura ao longo de seu cultivo está relacionada com o uso de sementes adequadas, a variedade escolhida, o dimensionamento do plantio e o manejo correto dos nutrientes para o crescimento da mesma. Caso esses fatores não forem seguidos corretamente, pode ocorrer influência no custo total do plantio, nas aplicações de defensivos, bem como na utilização de fertilizantes e na proliferação de doenças (LOLLATO, 2001).

Outro fator importante que deve ser considerado é a utilização da lâmina de água em seu turno de rega. O manejo incorreto desses fatores pode acarretar modificações drásticas nas variáveis biométricas das plantas, como o comprimento e diâmetro da cultura, quantidade e tamanhos dos frutos e das folhas (PIMENTEL, 2004). São essas variáveis biométricas que definem a qualidade e a produtividade do vegetal para o produtor.

A redução na lâmina de irrigação da cultura da cenoura promoveu alterações no desenvolvimento e produtividade da cultura. Com o déficit hídrico severo e moderado (30% e 60 % da ECA), houve a diminuição do comprimento da raiz tuberosa e do diâmetro da cultura aos 110 dias após a semeadura (SILVA et al., 2011).

Já no cultivo da batata-doce, a influência das lâminas de água é significativa sobre a produtividade da cultura. O incremento da raiz tuberosa decresceu em relação ao aumento da lâmina de água, nos estudos realizados por Delazari et al. (2017).

O Rabanete (*Raphanus Sativus L.*), cultura utilizada no presente estudo, é um exemplo de hortaliça que apresenta grande influência dos fatores externo em suas variáveis biométricas. Pertencente à família das Brassicaceae, as características do

Rabanete se definem pela coifa, raízes tuberosas comestíveis, colo, caule e folhas (EMBRAPA, 2012). Sua raiz tuberosa pode ser encontrada de diversas formas, podendo ter formato ovalado, alongado ou redondo; nas cores brancas, roxa, avermelhadas ou preta; com polpa na cor branca; e diâmetro variando entre 2 a 5 centímetros (DANTAS, 2015).

A partir dos estudos de Filgueira (2007), a má qualidade e produtividade do Rabanete está relacionada com o estresse hídrico e a temperatura do solo, podendo obter aspectos esponjosos da raiz e até rachaduras da mesma. A influência do estresse hídrico pode ser notada em diferentes casos na cultura do Rabanete. Em estudo realizado por BREGONCI et al. (2008), foi observado a redução do diâmetro e comprimento das raízes no cultivo da cultura.

Para Pereira et al. (1999) o Rabanete necessita de uma quantidade significativa de água disponível no solo durante todo o seu ciclo, ao limite de 100% da ETc. No entanto, o estresse hídrico pode provocar alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas da cultura. Segundo Filgueira (2003) as variações de concentração da taxa hídrica no solo podem afetar as variáveis biométricas do Rabanete, como rachaduras nas raízes tuberosas da planta.

Observando os efeitos provedores na produtividade da cultura do Rabanete, geradas pelo manejo impróprio da mesma e interferência da utilização de água, os experimentos agrícolas vem ocupando grandes espaços na busca de tecnologias que permitem a obtenção da produtividade e qualidade das culturas, como a reutilização de resíduos sólidos e líquidos, melhoramento de recursos agrícolas, redução da quantidade de água utilizada na irrigação, entre outros fatores de influência (PUTTI, 2015).

A composição da água é definida pelos elementos oxigênio e hidrogênio, em que esses, quando associados a novas tecnologias, permitem aumentar a qualidade e produtividade de uma cultura (REBOLÇAS, 2008). Uma alternativa é a utilização da água magnetizada na irrigação de culturas, uma vez que quando expostas ao campo magnético, as moléculas da água são distribuídas de forma homogênea, eliminando o acúmulo de moléculas e deixando-a mais leve quimicamente. A organização das moléculas da água após a magnetização, permite o aproveitamento dos nutrientes e minerais contidos na água, por parte das plantas (LOPES et al., 2007).

Análises desenvolvidas com aplicação de água magnetizada, demonstram ótimos resultados no crescimento nas variáveis biométricas da planta, como por

exemplo o aumento do número de folhas, a produtividade da planta e qualidade dos frutos, sem a necessidade de introduzir fertilizantes no processo. Em estudos envolvendo a cultura da cenoura, foi observado um aumento no diâmetro da raiz tuberosa, quando utilizada a água tratada magneticamente em diferentes doses de lâminas, em relação a irrigação com água convencional (PUTTI, 2014).

Em busca de novas estruturas para comprovar as informações promovidas pelo campo, permite-se a utilização de técnicas mais avançadas. Uma opção está na introdução da modelagem matemática, pois a mesma permite, em processos mais avanços, solidificar resultados obtidos experimentalmente (DEYVER, 2016).

De acordo com Gabriel Filho (2015), a Lógica *Fuzzy* permite tais solidificações de forma mais abrangentes, pois ela é aplicada em conceitos vagos onde não se pode permitir a manipulação pela lógica tradicional. Por utilizar conjuntos, a Teoria *Fuzzy* realiza seus conceitos próximos aos raciocínios humanos em locais de imprecisões (BENINI, 2012). Por essa facilidade, a Teoria *Fuzzy* utiliza-se de uma metodologia que converte os termos vagos linguísticos em termos compreensivos para os seres humanos (MARÇAL; SUSIN, 2005).

Para realização do seu sistema são necessário o desenvolvimento de três etapa básicas, fuzzificação, inferência e defuzzificação (ZADEH, 1965). Na fuzzificação as variáveis de entrada são convertidas em variáveis linguísticas e as funções de pertinências são desenvolvidas por especialistas. A base de regra é gerada pela inferência e utilizada pelo controlador *Fuzzy*, que pode ser definido entre Mamdani ou Takagi-Sugeno (BARROS; BASSANEZI, 2010). A última etapa é gerada pela defuzzificação, onde a mesma converte os valores *Fuzzy* em valores numéricos reais. A defuzzificação pode ser realizada por vários métodos, como critério máximo e Centroide (ZADEH, 1965).

A utilização dessa ferramenta pode ser empregada em diversas áreas da agricultura, como nos estudos envolvendo os impactos gerados pela lâminas de irrigação na cultura da beterraba (GABRIEL FILHO, 2015), em análises envolvendo o crescimento da cultura do alface irrigada com água magnetizada (PUTTI, 2015), nos efeitos gerados no estágios dos tomateiros pela utilização de água salina (DEYVER, 2016), entre outros estudos que necessitam do envolvimento computacional e matemático para concretizar seus resultados.

Tendo em vista a importância da lógica *Fuzzy* na interpretação de dados experimentais e da magnitude do poder da água magnetizada para a irrigação, o

vigente trabalho objetiva analisar e avaliar os seguimentos promovidos pela utilização da água convencional e magnetizada, na qualidade e produtividade da cultura do Rabanete, nas diversas variáveis biométricas e em diferentes porcentagens de lâminas de irrigação da evapotranspiração da cultura, por meio da modelagem *fuzzy*.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta presente seção estão descritos demais especificações experimentais necessárias para a elaboração dos modelos matemáticos propostos, bem como as metodologias para a sua elaboração.

Os métodos de aplicação da análise de regressão, bem como os teste de ajustamento de modelos adotados (Qui-Quadrado, desvio do quadrado médio da raiz, erro quadrado médio da raiz) são análogos aos descritos na Seções 1.2.4 e 1.2.5, respectivamente.

A descrição do experimento foi realizada na Secção 1.2.1 Adicionalmente, foram analisadas as variáveis biométricas: comprimento da raiz (CR); comprimento da raiz tuberosa (CRT); fitomassa seca da raiz (FSR); Fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT); número de folhas (NF); fitomassa seca da folha (FSF); diâmetro da raiz tuberosa (DRT); fitomassa fresca da raiz (FFR); fitomassa fresca da folha (FFF) e fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT), nas lâminas de irrigação 25%, 50%, 75%, 100% e 125% da evapotranspiração de cultura, no *DAS* 35.

2.2.1 Método de modelagem *Fuzzy*

Os modelos *Fuzzy* desenvolvidos visaram avaliar a produtividade no ponto de colheita aos 35 dias após a semeadura (*DAS*) analisando os efeitos das variáveis biométricas da cultura do Rabanete: número de folha (NF), comprimento da raiz (CR), diâmetro da raiz tuberosa (DRT), fitomassa fresca da raiz (FFR), fitomassa fresca da folha (FFF), fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), fitomassa seca da raiz (FSR), fitomassa seca da folha (FSF) e fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT).

Os sistemas, um para cada tipo de tratamento (AC e ATM), são compostos por uma única variável de entrada (Lâminas de irrigação da evapotranspiração de cultura - %), e 10 (dez) variáveis de saída (variáveis biométricas) e 5 regras para cada variável

de saída para a execução do modelo. As variáveis de entrada e saída são composta por 5 funções de pertinência.

Cada modelo matemático é representado por uma função da forma $F: X \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{10}$, com $F(x) = (y_1, \dots, y_{10})$, onde X é o conjunto domínio, composto pela variável “Lâmina de irrigação da ETc (%)”, em que $X = [25, 125]$; e o contradomínio definido pelas 10 variáveis biométricas analisadas.

A confecção do sistema baseado em regras Fuzzy (SBRF), utilizou de um fuzzificador, um conjunto de regras desenvolvido para o sistema, uma inferência Fuzzy e um defuzzificador que transforma os valores Fuzzy em valores reais de saída.

Os métodos de inferência e defuzzificação adotados foram, respectivamente, o de Mamdani e o centro de massa, ambos descritos na Secção **Erro! Fonte de eferência não encontrada.**

As Figura 14 e Figura 15 ilustram os modelos da cultura do rabanete irrigada com água convencional e com a tratada magneticamente, respectivamente.

Figura 14. SBRF de avaliação das variáveis biométricas da cultura do rabanete irrigado com água convencional (AC)

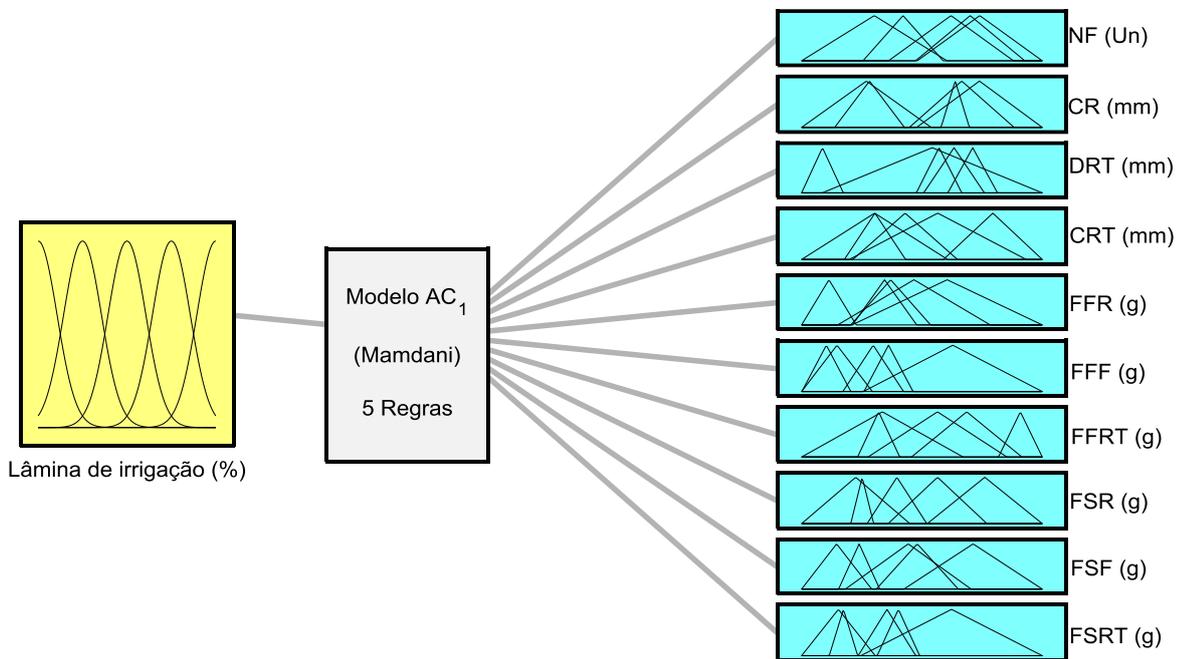
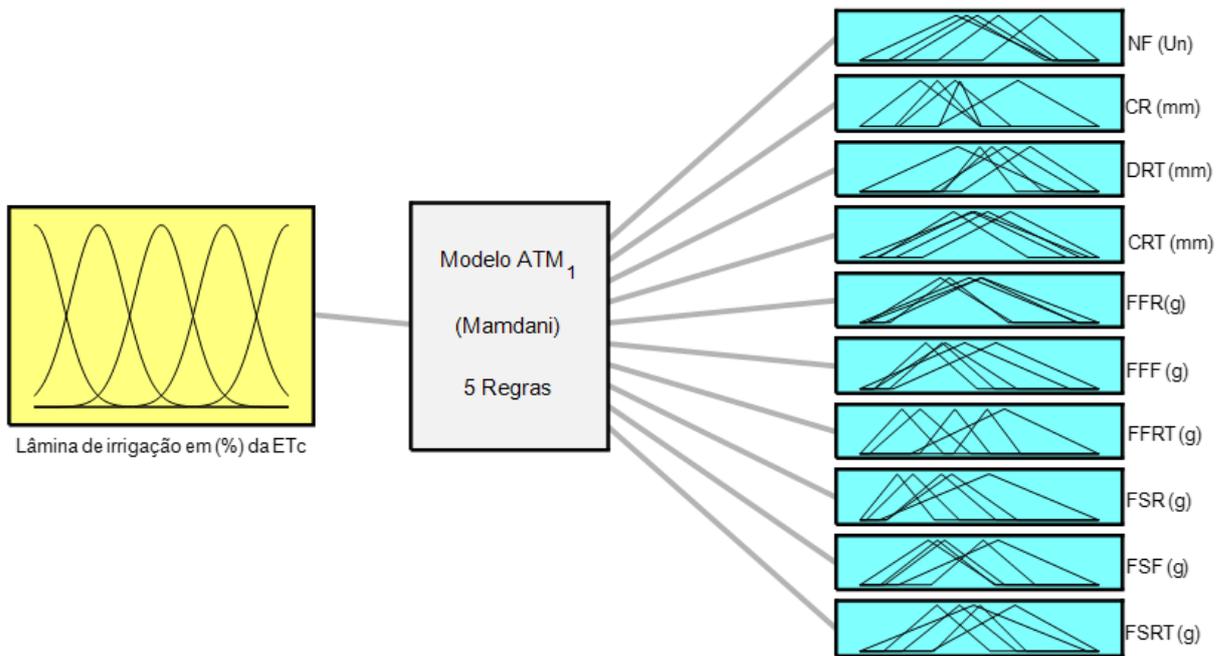


Figura 15. SBRF de avaliação das variáveis biométricas da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente (ATM)

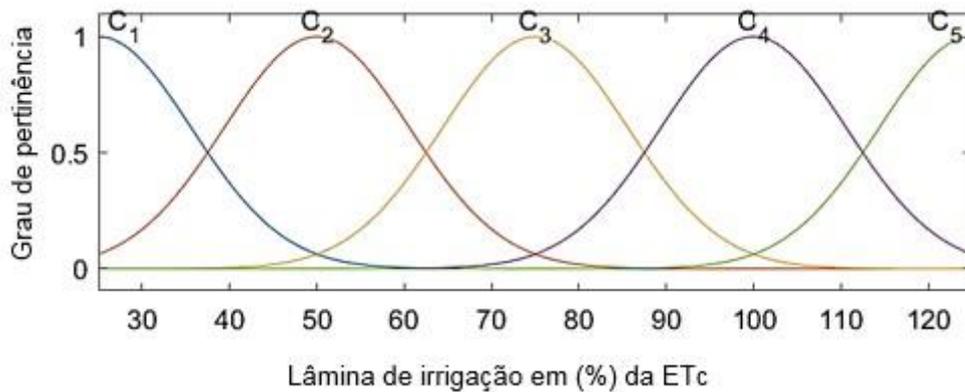


2.2.1.1 Método de construção dos conjuntos *Fuzzy* das variáveis de entrada

Para as variáveis de entrada foram utilizadas as lâmina de irrigação e os valores obtidos da produtividade da cultura no *DAS* 35. A variável de entrada “Lâminas de Irrigação” foi desenvolvida por cinco conjuntos *Fuzzy* indicado por $L_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$. Essa definição foi realizada conforme o experimento realizado, onde as lâminas de irrigação foram estimadas pelos níveis da ETc, tendo uma evolução de 25% para cada lâmina.

A Figura 16 demonstra as funções de pertinência adotadas para o SBRF, onde foi utilizada a forma Gaussiana nos conjuntos L_i , com o grau de pertinência igual a 1 em seus respectivos conjunto *Fuzzy*. Essa metodologia foi empregada para os tratamento AC e ATM.

Figura 16. Funções de pertinência das variáveis de entrada (lâmina de irrigação), para a cultura do Rabanete, no tratamento ATM e AC



O dominador de um sistema *Fuzzy* é definido pelo conjunto dos dados de entrada e suas funções de pertinência. Neste sentido, a escolha da função de pertinência Gaussiana, para as variáveis de entrada, ocorreu devido às suas características de resposta.

De acordo com Pimenta (2009), a função de pertinência Gaussiana permite demonstrar de forma suave a realidade do fenômeno agrônomo ocorrido. No entanto, a função de pertinência Gaussiana perde para a função de pertinência triangular, pois a função Gaussiana não consegue passar por todos os pontos médios dos valores analisados.

Entretanto, a sua função resposta consegue demonstrar, de forma suave, curvas dos resultados sem grandes oscilações, ao contrário da função de pertinência triangular, que em sua função resposta apresenta picos de variações em grande escala, não demonstrando a veracidade dos dados.

Os delimitadores utilizados para as variáveis de entrada, com função de pertinência Gaussiana e triangulares, estão representados nas Tabelas Tabela 13 e Tabela 14, que também estão definidos e descritos na Seção 1.2.2.1

Tabela 13. Delimitadores das variáveis de entrada triangulares

Conjunto Fuzzy	Tipo	Delimitadores
C_1	Triangular	[0 25 50]
C_2	Triangular	[25 50 75]
C_3	Triangular	[50 75 100]
C_4	Triangular	[75 100 125]
C_5	Triangular	[100 125 150]

Tabela 14. Delimitadores das variáveis de entrada Gaussianas

Conjunto Fuzzy	Tipo	Delimitadores
C_1	Gaussiana	[14,38 25 35,62]
C_2	Gaussiana	[39,38 50 60,62]

C_3	Gaussiana	[64,38 75 85,62]
C_4	Gaussiana	[89,38 100 110,62]
C_5	Gaussiana	[114,38 125 135,62]

A conversão dos delimitadores triangulares, com parâmetros $[a, b, c]$, para os parâmetros gaussiano $[\sigma, m]$, foi realizada pelos comandos do *software* Matlab, com a utilização da Expressão 1 a seguir:

$$\sigma = \frac{c-b}{2 \cdot \sqrt{-2 \cdot \log(0,5)}} \quad (1)$$

com σ o desvio padrão e $m = b$, o ponto médio dos dados.

2.2.1.2 Método de construção dos conjuntos *Fuzzy* das variáveis de saída

O conjunto *Fuzzy* de saída foi definido por cinco delimitadores nas funções de pertinência triangulares, com o grau de pertinência 1,00. A escolha pela utilização da função de pertinência triangular, para as variáveis de saída, ocorreu pela propriedades apresentadas por esta função. Para Pereira Filho (1999), função de pertinência triangular apresenta facilidade computacional e permite que seus pontos coincidem com os pontos médios dos dados estudados.

Para definir os delimitadores das funções de pertinência, foi utilizado a metodologia encontrada em Choueri (2018), onde a distância da média das lâminas de irrigação é definida em 01 de desvio padrão. Os de limitadores utilizados para o presente capítulo estão descritos na Tabela 15, como apresentados no capítulo 1.

Tabela 15. Características dos delimitadores para a variável de saída do sistema baseado em regra *Fuzzy*, com funções de pertinência triangular e Gaussiana

Conjunto <i>Fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
C_1	Triangular	$[p_1 - \sigma_1, p_1, p_1 + \sigma_1]$
C_2	Triangular	$[p_2 - \sigma_2, p_2, p_2 + \sigma_2]$
C_3	Triangular	$[p_3 - \sigma_3, p_3, p_3 + \sigma_3]$
C_4	Triangular	$[p_4 - \sigma_4, p_4, p_4 + \sigma_4]$
C_5	Triangular	$[p_5 - \sigma_5, p_5, p_5 + \sigma_5]$

Legenda: σ_i = desvio adotado para a produtividade de cada lâmina; p_i = valores da média da produtividade em cada lâminas aplicadas; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 = representados dos valores de cada lâmina de irrigação, em nível de 25% da ETC..

2.2.1.3 Método de elaboração da base de regras

A base de regra é desenvolvida a partir do argumento: “Se *Lâmina* é C_i então a *variável saída* é C_{k_i} , $i = 1,2,3,4,5$, onde a variável de entrada é o antecedente e a variável de saída é o consequente.

Foram criadas cinco regras com as variáveis de entrada (*Lâminas de água*) e saída (*variáveis biométricas*: $FFRT, FSRT, FFF, FSF, DRT, CR, FFRT, FSRT, NF$ e CRT) para o modelo *Fuzzy* que compõe este capítulo.

A construção das regras *Fuzzy* foi realizada a partir das combinações das variáveis biométricas de saída, do conjunto *Fuzzy* de saída (C_{k_i}), com a variável lâmina de irrigação dos conjuntos *Fuzzy* de entrada (C_i), de acordo com o grau de pertinência que estão associadas. O conjunto de saída é composto pelas médias dos dados de cada variável biométrica, pertencente aos conjuntos de saída, de forma crescente.

2.2.2 Método de determinação de coeficiente de correlação

Duas variáveis quantitativas estão correlacionadas quando existe uma associação linear entre si. Essa associação é expressa por um coeficiente de correlação, de forma numérica, por nuvens de pontos em um diagrama de dispersão (MARTINS; RODRIGUES, 2014).

O coeficiente de correlação de Person indica o grau de associação linear entre as duas variáveis e sua medida de direção. Seu cálculo é expresso pela Equação 2 abaixo:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{Cov(x,y)}{S_x \times S_y} \quad (2)$$

com $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ e $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$. Portanto o coeficiente de correlação é o quociente entre a covariância e o produto do desvio padrão das variáveis x e y (OSTERTAGOVÁ, 2012).

O coeficiente de correlação tem valores compreendidos entre -1 e 1, onde o negativo demonstra que as variáveis são inversas e o valor positivo demonstram que as variáveis são diretas. Quanto maior o coeficiente, maior será o grau de associação das variáveis analisadas (RAPOSO JR. et al., 2007).

2.2.3 Método de análise de agrupamentos de dados

A utilização da metodologia do agrupamento de dados em trabalhos acadêmicos, permite verificar as características semelhantes entre os dados analisados e separá-los em grupos de similaridades. Neste sentido, o presente trabalho utilizou-se dessa técnica para verificar a semelhança entre as variáveis biométricas, da produtividade da cultura do Rabanete.

De acordo com Gouvêa, Prearo e Romeiro (2012), essa técnica permite o agrupamento dos dados, com apenas uma característica semelhante, e a verificação da homogeneidade dos grupos formados. A homogeneidade é processada pela distância entre as variáveis de cada grupo e a diferença, máxima e mínima, entre os grupos formados (ALVES; BELDERRAIN; SCARPEL, 2007). Quanto maior a distância entre as variáveis analisadas, menor é a sua similaridade.

A formação dos grupos ocorre pela confecção da matriz simétrica de distâncias, $D = (d_{ij})$, de ordem n e d_{ij} a distância entre os dados i e j . Sua representação é expressa pela Equação 3:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

com $d_{11} = d_{22} = \cdots = d_{nn} = 0$ (VICINI, 2005).

A Expressão 4 representa a fórmula da Distância Euclidiana, utilizada no desenvolvimento da matriz de distância e a mais utilizada na determinação das distâncias (DONI, 2004).

$$D(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

Uma forma gráfica de representar a similaridade das variáveis associadas e dos grupos formados está na confecção do dendograma, cuja estrutura é desenvolvida em formato de árvore, que representa a junção ou divisões dos grupos providos da matriz de distâncias. Por não existir uma técnica da utilização e

quantidades dos grupos a serem utilizados para interpretados, cabe ao pesquisador realizar essa função (FREI, 2006).

2.2.4 Método de análise de variância

A utilização do teste de análise de variância - ANOVA, teve como objetivo verificar a semelhanças entre duas ou mais populações, por meio da igualdade entre as medias das variáveis observadas (GIRDEN,1992). Sua aplicação requer alguns critérios, com a obrigatoriedade da homocedasticidade dos dados analisados, as amostras devem ser adquiridas de forma aleatória e com no mínimo duas amostras independentes de tamanho superior a três (RUTHERFORD, 2001).

O cálculo da análise de variância requer uma avaliação dos resíduos e do tratamento dos dados, onde a residual verifica a divergência dos dados sobre a média dos grupos, em que a avaliação do tratamento avalia a discrepância entre as médias dos grupos. A análise de variância é encontrada pela Equação 5 a seguir:

$$SQT = SQE + SQF = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 + \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 \quad (5)$$

com:

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_k;$$

$(X_{ij} - \bar{X}_i)$ o resíduo;

$(\bar{X}_i - \bar{X})$ o tratamento;

SQT a soma total dos quadrados;

SQE a soma dos quadrados dos erros;

SQF a soma dos quadrados dos fatores;

X_{ij} a medida de j da amostra i; e

\bar{X}_i a média de i e \bar{X} a média global (SHAUGHNESSY; ZECHMEISTER; ZECHMEISTER, 2012).

Para mensurar a diferença entres as médias populacionais do experimento, faz-se a necessidade de utilizar o teste F. Sua interpretação consiste na existência dessa diferença, onde a mesma é comprovada quando o valor de F for superior a 1. Seu calculo é expresso pela seguinte Equação 6:

$$F = \frac{QMF}{QME} = \frac{\frac{SQE}{n-k}}{\frac{SQF}{k-1}} \quad (6)$$

O teste de hipótese na ANOVA, verifica a igualdade ou desigualdade das médias (RUTHERFORD, 2001). Estipula-se H_0 para presença da igualdade e o H_1 para a diferença entre as médias. Se $F > F$ tabelado e $p - valor < \alpha$, rejeita-se H_0 . Se $F < F$ tabelado e $p - valor > \alpha$, não rejeita H_0 .

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O manejo adequado da utilização da água é um fator de extrema importância para o desenvolvimento fenológico da planta.

Conforme SILVA et al. (2012), as etapas fenológicas das hortaliças são divididas em cinco fases. A primeira fase é definida pela germinação da planta (0 - 7 dias). A segunda fase é composta pelo crescimento das primeiras folhas da planta (7 - 14 dias). A terceira fase define o desenvolvimento da raiz tuberosa (14 - 21 dias). A quarta fase é marcada pela ampliação da área foliar (21 - 28 dias). A quinta fase e última fase, marcada pela formação final da raiz tuberosa para a colheita da cultura (28 - 35 dias).

Neste contexto, é nas duas primeiras fases fenológicas que a planta necessita de maior concentração de água em seu desenvolvimento, uma vez que a falta de água poderá acarretar, nas fases finais, o não desenvolvimento da cultura.

2.3.1 Sistema baseado em regras *Fuzzy* das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água convencional aos 35 DAT

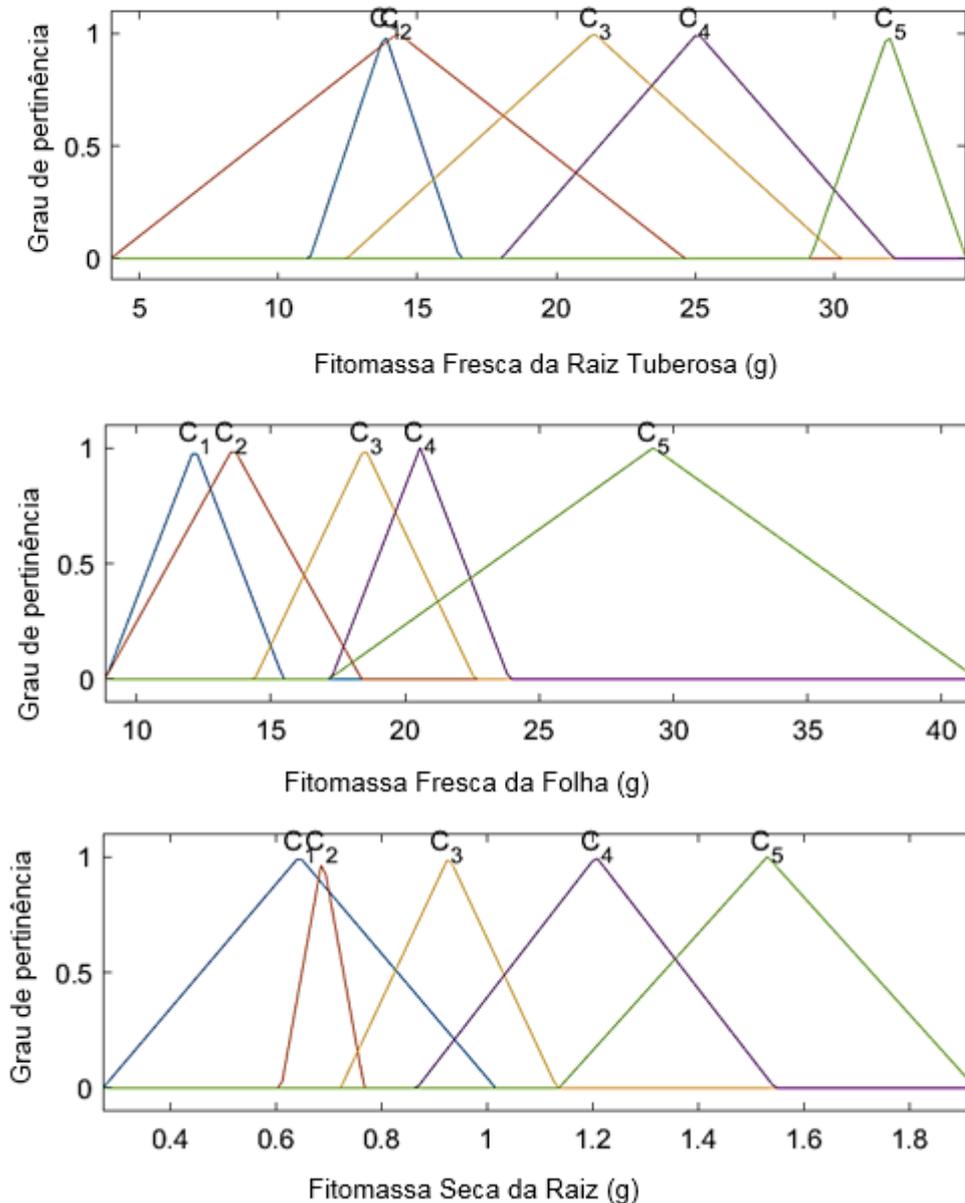
De acordo com o experimento realizado por Cremasco et al. (2015), a verificação da produtividade do Rabanete ocorreu no DAS 35, esta seção apresenta o sistema baseado em regras *Fuzzy* para a produtividade da cultura do Rabanete, relacionada com as variáveis biométricas no DAS 35 e irrigado com água convencional. Em seguida será demonstrada as validações dos modelos estatísticos e *Fuzzy* para as variáveis analisadas.

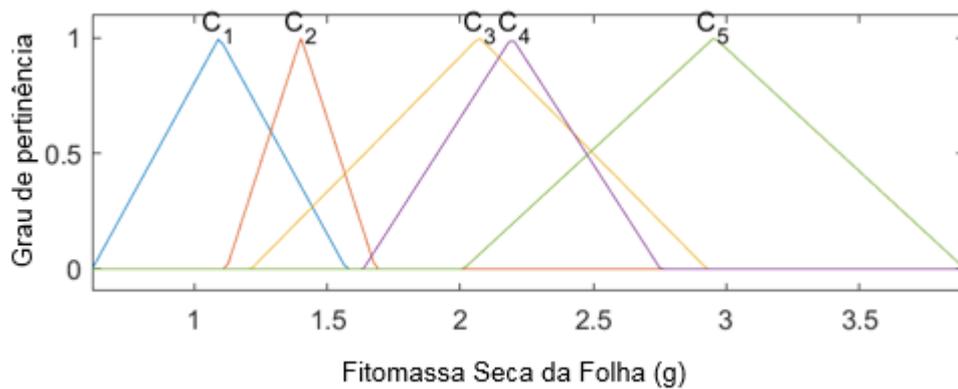
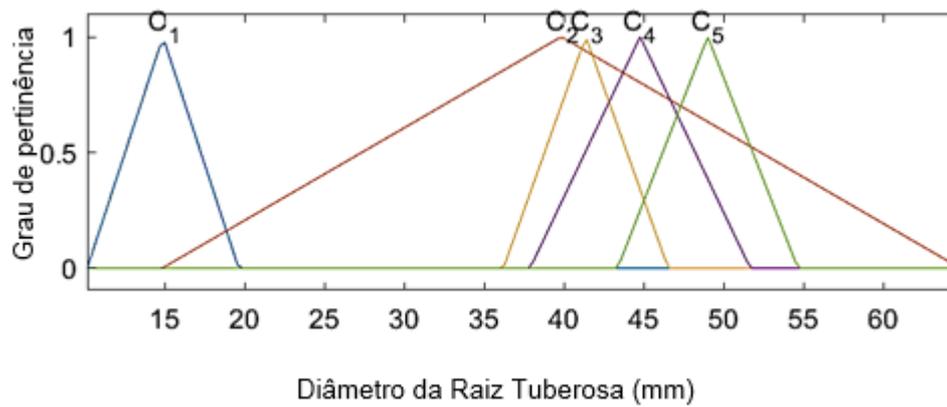
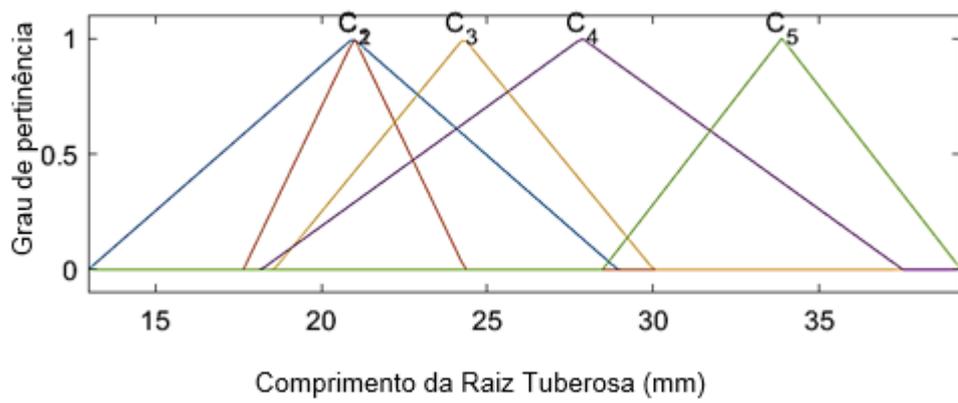
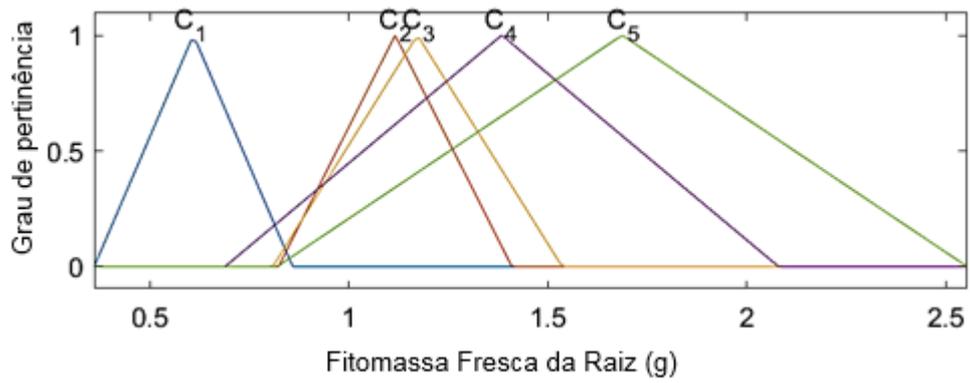
O sistema *Fuzzy* foi desenvolvido com funções de pertinência gaussiana para as variáveis de entrada e funções de pertinência triangulares para as variáveis de

saída. A escolha das funções de pertinência de entrada procedeu devido a função gaussiana apresentar melhor suavidade da curva e melhor apresentação do fenómeno, no ponto de vista agrônomo.

Por permitir que os pontos da função coincide com as médias dos dados avaliados e os melhores resultados com menores erros, foi utilizada a função de pertinência triangular para as variáveis biométricas de saída. As funções de pertinência triangulares de saída estão demonstradas nas Figura 17 para irrigação com AC, e os delimitadores das funções de pertinência para cada variável biométrica analisada da cultura do Rabanete, estão descritos na Tabela 16 para tratamento AC.

Figura 17. Funções de pertinência de saída para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, para o tratamento AC





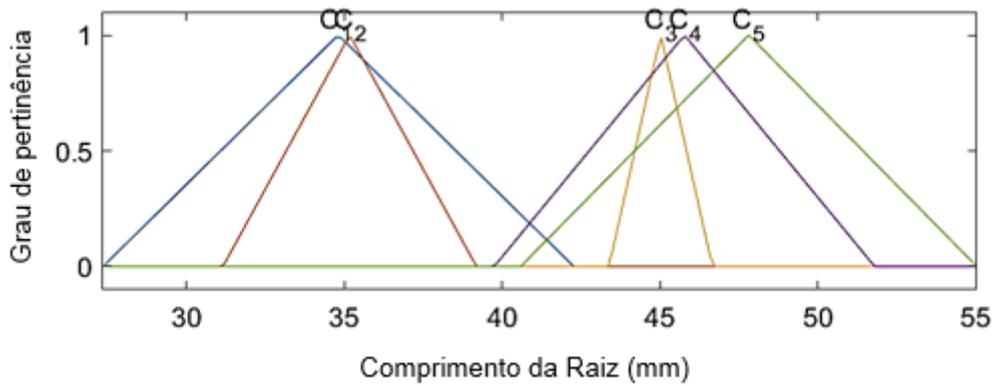
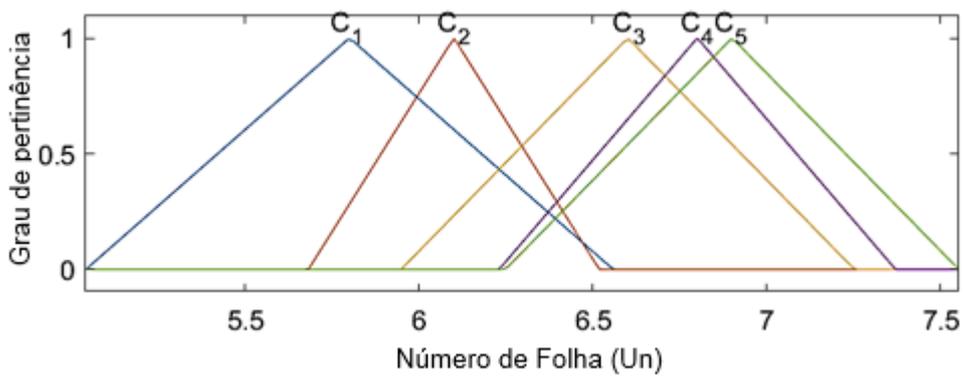
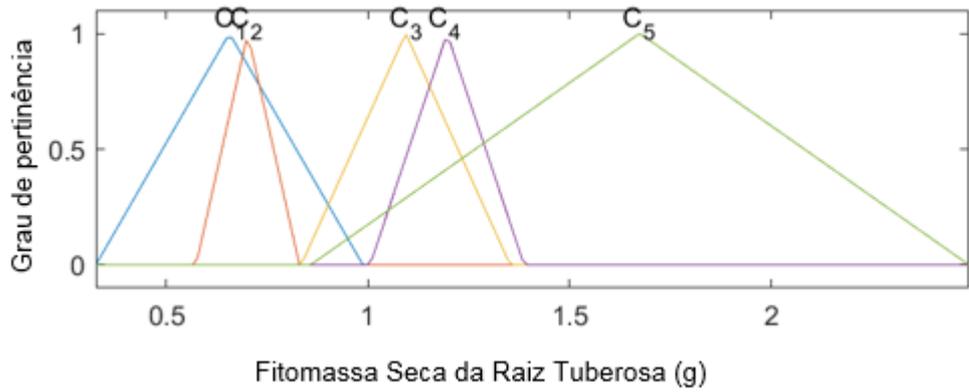


Tabela 16. Delimitadores das funções de pertinência de saída, tipo triangular, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com AC

		Funções de Pertinência														
		C1			C2			C3			C4			C5		
Variáveis de Saída	NC	[5,042 5,8 6,558]			[5,682 6,1 6,518]			[5,948 6,6 7,252]			[6,23 6,8 7,37]			[6,248 6,9 7,552]		
	CR	[27,366 34,814 42,262]			[31,163 35,174 39,185]			[43,382 45,016 46,65]			[39,746 45,766 51,786]			[40,584 47,803 55,022]		
	DRT	[10,147 14,888 19,629]			[14,836 39,824 64,812]			[36,201 41,363 46,525]			[37,876 44,767 51,658]			[43,358 49 54,642]		
	CRT	[12,974 20,957 28,94]			[17,65 20,996 24,342]			[18,573 24,296 30,019]			[18,182 27,858 37,534]			[28,475 33,882 39,289]		
	FFR	[0,361 0,61 0,859]			[0,823 1,117 1,41]			[0,809 1,173 1,536]			[0,689 1,385 2,08]			[0,82 1,687 2,554]		
	FFF	[8,843 12,156 15,469]			[8,811 13,597 18,382]			[14,389 18,494 22,598]			[17,241 20,561 23,881]			[17,154 29,252 41,349]		
	FFRT	[11,133 13,83 16,528]			[3,973 14,301 24,629]			[12,465 21,349 30,233]			[18,023 25,085 32,147]			[29,145 31,947 34,75]		
	FSR	[0,272 0,644 1,017]			[0,61 0,689 0,767]			[0,722 0,928 1,133]			[0,867 1,207 1,546]			[1,136 1,531 1,927]		
	FSF	[0,616 1,094 1,572]			[1,121 1,401 1,682]			[1,214 2,071 2,928]			[1,635 2,194 2,753]			[2,012 2,956 3,899]		
	FSRT	[0,326 0,657 0,988]			[0,574 0,702 0,83]			[0,835 1,094 1,353]			[1,005 1,196 1,387]			[0,858 1,674 2,489]		

Legenda: CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca a raiz tuberosa); C1, C2, C3, C4 e C5 são funções de pertinência.

A Tabela 17 descreve a combinação das variáveis de entrada e saída para a formação da base de regra do SBRF com água convencional, onde o conjunto de entrada representa as lâminas de irrigação em porcentagem sobre a evapotranspiração de cultura e o conjunto de saída representa as variáveis biométricas.

Tabela 17. Base de regra do SBRF, para a cultura do Rabanete, irrigado com água convencional

Regra	Conjunto de Entrada	Conjunto de Saída									
		NC	CR	DRT	CRT	FFR	FFF	FFRT	FSR	FSF	FSRT
1	1	5	4	2	4	5	4	3	4	5	4
2	2	4	3	5	3	3	3	1	5	4	3
3	3	3	5	4	1	4	5	4	3	3	5

4	4	2	2	3	2	2	1	5	2	2	2
5	5	1	1	1	5	1	2	2	1	1	1

Legenda: CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca da raiz tuberosa).

Após a confecção das funções de pertinência de saída, foi verificada a validação dos modelos para cada variável biométrica, por meio de testes estáticos. A Tabela 18 demonstra os resultados estatísticos obtidos para a validação do modelo, com irrigação de água convencional no DAS 35.

Tabela 18. Validação do modelo Fuzzy para as variáveis de saída da cultura do Rabanete, irrigado com água convencional

Variável	Índices	Modelo Fuzzy	Regressão polinomial	Equação Regressão
NF	χ^2	1.275 (p=1)	1.291 (p=1)	y = -0.00009.x ² + 0.002.x + 6.96
	R^2	0.367 (p=0.0013)	0.36 (p=0.0015)	
	RMSE	0.555	0.559	
	MAE	0.481	0.485	
CR	χ^2	16.601 (p=0.8652)	19.996 (p=0.697)	y = -0.002.x ² + 0.124.x + 43.92
	R^2	0.53 (p=0)	0.408 (p=0.0006)	
	RMSE	5.204	5.81	
	MAE	4.111	4.438	
DRT	χ^2	72.712 (p=0)	69.781 (p=0)	y = -0.008.x ² + 0.978.x + 19.985
	R^2	0.536 (p=0)	0.52 (p=0)	
	RMSE	11.211	11.246	
	MAE	7.07	7.438	

CRT	χ^2	39.155 (p=0.0263)	41.271 (p=0.0156)	$y = 0.004.x^2 + -0.587.x + 41.11$
	R^2	0.383 (p=0.001)	0.336 (p=0.0024)	
	<i>RMSE</i>	6.142	6.339	
	<i>MAE</i>	4.808	5.022	
FFR	χ^2	4.334 (p=1)	4.475 (p=1)	$y = -0.00005.x^2 + -0.0009.x + 1.625$
	R^2	0.336 (p=0.0024)	0.274 (p=0.0073)	
	<i>RMSE</i>	0.496	0.517	
	<i>MAE</i>	0.385	0.369	
FFF	χ^2	56.084 (p=0.0002)	64.702 (p=0)	$y = -0.002.x^2 + 0.276.x + 14.474$
	R^2	0.458 (p=0.0002)	0.206 (p=0.0227)	
	<i>RMSE</i>	6.368	7.457	
	<i>MAE</i>	4.745	5.187	
FFRT	χ^2	67.489 (p=0)	125.262 (p=0)	$y = -0.003.x^2 + 0.439.x + 7.772$
	R^2	0.504 (p=0.0001)	0.104 (p=0.116)	
	<i>RMSE</i>	6.898	8.808	
	<i>MAE</i>	5.943	7.831	
FSR	χ^2	2.04 (p=1)	2.383 (p=1)	$y = -0.00004.x^2 + -0.001.x + 1.403$
	R^2	0.59 (p=0)	0.431 (p=0.0004)	
	<i>RMSE</i>	0.276	0.324	
	<i>MAE</i>	0.231	0.244	
FSF	χ^2	4.151 (p=1)	3.986 (p=1)	$y = 0.00004.x^2 + -0.024.x + 3.479$
	R^2	0.537 (p=0)	0.523 (p=0)	
	<i>RMSE</i>	0.604	0.611	
	<i>MAE</i>	0.48	0.474	
FSRT	χ^2	4.417 (p=1)	3.877 (p=1)	$y = -0.0002.x^2 + 0.019.x + 0.787$
	R^2	0.405 (p=0.0006)	0.259 (p=0.0093)	
	<i>RMSE</i>	0.422	0.456	
	<i>MAE</i>	0.32	0.313	

Legenda: χ^2 = Teste Qui-Quadrado; R^2 = Coeficiente de determinação; *RMSE* = Desvio do quadrado médio da raiz; *MAE* = Erro quadrado médio da raiz. CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca da raiz tuberosa).

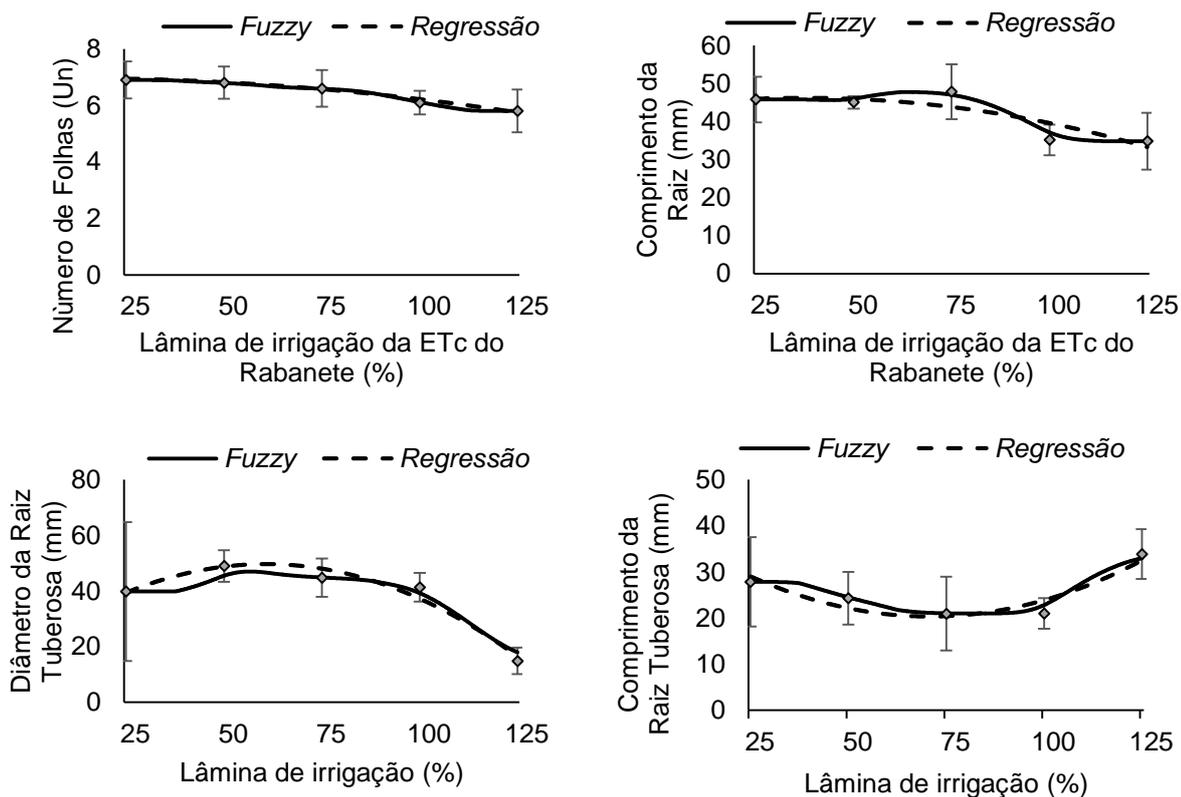
Observando a validação dos modelos confeccionados, sobre as variáveis biométricas na produtividade da cultura do Rabanete, verifica-se que o modelo *Fuzzy* se destacou em todas as variáveis, quando comparado aos modelos de regressão polinomial proposto, uma vez que alcançou os menores erros (*RMSE* e *MAE*) e os melhores coeficientes de determinação (R^2), comprovando, sua eficiência quanto a determinação e demonstração da produtividade da cultura. A eficiência do modelo

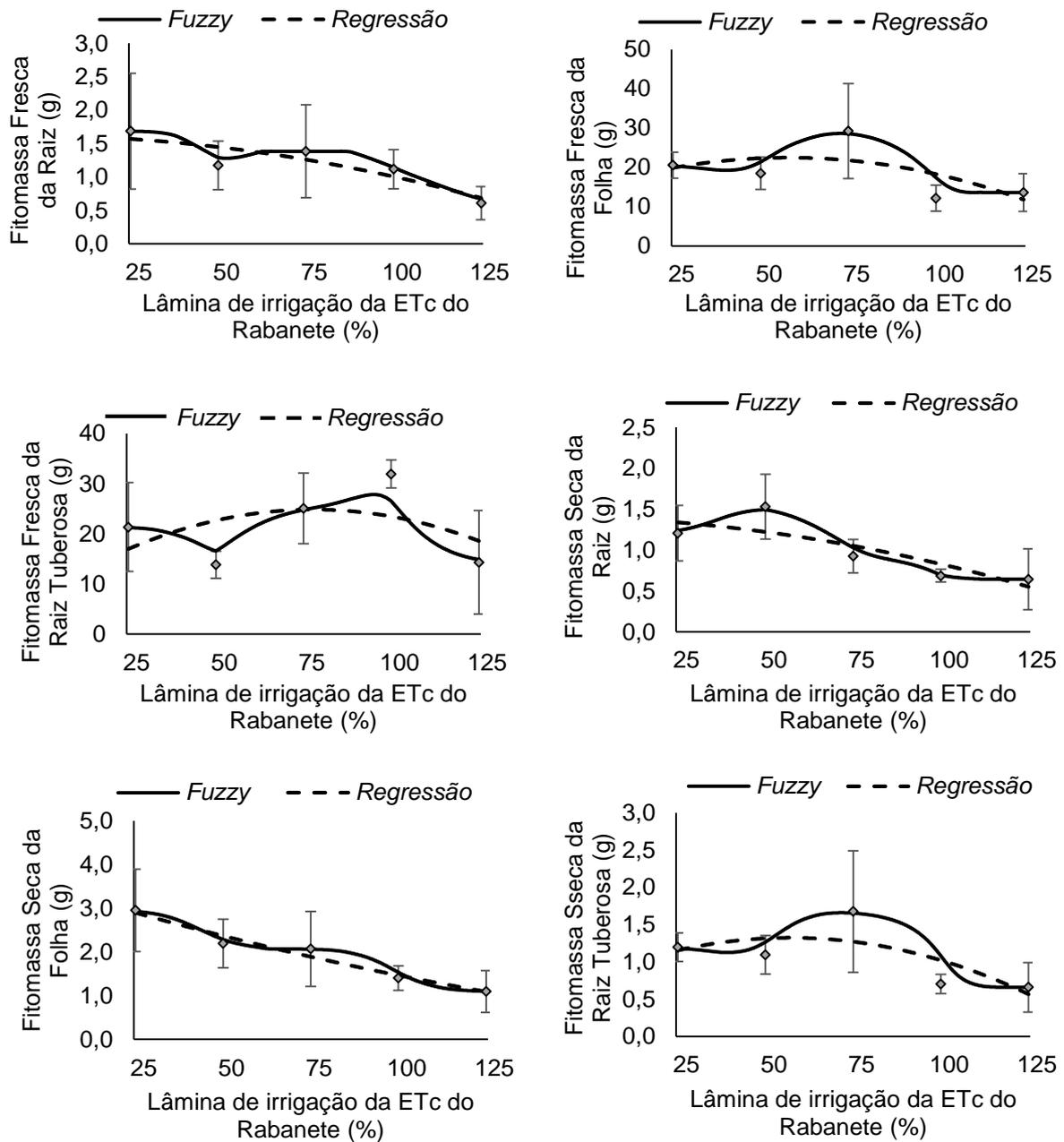
Fuzzy sobre a regressão polinomial pode ser vista no capítulo 1, sobre a produtividade da cultura, na variável fitomassa fresca da raiz tuberosa.

Essa superioridade da lógica *Fuzzy* sobre a regressão polinomial de grau dois, relacionada com *RMSE*, pode ser vista em Silva et al. (2014), na análise da produtividade do trigo com adubação nitrogenada, e em Putti (2015), na análise do desenvolvimento da cultura da alface, irrigada com água magnetizada.

Como representação da comparação do modelo desenvolvido, para cada variável biométrica, Figura 18 demonstra graficamente a comparação entre o modelo *Fuzzy* e o modelo estatístico, destacando a eficiência de cada modelo, para o tratamento AC.

Figura 18. Comparação entre os modelos da função resposta para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com água convencional





Observando a função de resposta das variáveis biométricas, verifica-se que a variável número de folhas (NF) apresentou pouca diferença entre o modelo *Fuzzy* proposto e o modelo estatístico. No entanto, quando se analisa a validação dos modelos nesta variável, constata-se que o modelo *Fuzzy* foi superior. Esta mesma variável também apresentou pouca diferença entre as lâminas de irrigação analisada, indicando pouca relevância a discriminação dos níveis de lâminas de irrigação aplicados para o cultivo da cultura do Rabanete, na região de Botucatu/SP.

Em relação a variável comprimento da raiz (CR), verifica-se que a variável obteve bom comprimento na lâmina de 75%, com a utilização do modelo *Fuzzy* para representação dos dados. De acordo com Wan e Kang (2006), um sistema radicular

com maior crescimento pode estar relacionado com a baixa disponibilidade de água contida no solo para cultura, uma vez que a mesma tende a procurar caminhos que permitem repor suas necessidades. O mesmo comportamento poder visto nas variáveis fitomassa fresca da raiz (FFR) e fitomassa seca da raiz (FSR).

A variável diâmetro da raiz tuberosa apresentou boa estimativa na lâmina de 75% nos dois modelos analisados. Com resultado similar, Klar et al. (2015) apresenta maiores diâmetros da raiz tuberosa, para a cultura do Rabanete, nas lâminas de 85% e 72%. No entanto observa-se que houve uma redução do diâmetro da raiz tuberosa sobre as lâminas de irrigação 25% e 125%. O mesmo ocorreu no estudo desenvolvido por Bregonci et al. (2008), onde foi constatado a redução do diâmetro da raiz tuberosa do Rabanete, quando submetido ao estresse hídrico. O déficit hídrico faz com que a tensão do solo aumente, aumento a retenção da água no solo e dificultando sua retirada pela planta. Já o excesso hídrico faz com que a planta tenha dificuldade em absorver o oxigênio contido no solo, permitindo pouco desenvolvimento (LACERDA, 2007). Resultados similares podem ser vistos em Rodrigues et al. (2013), Minchinton et al. (2013) e Balkhair et al. (2014).

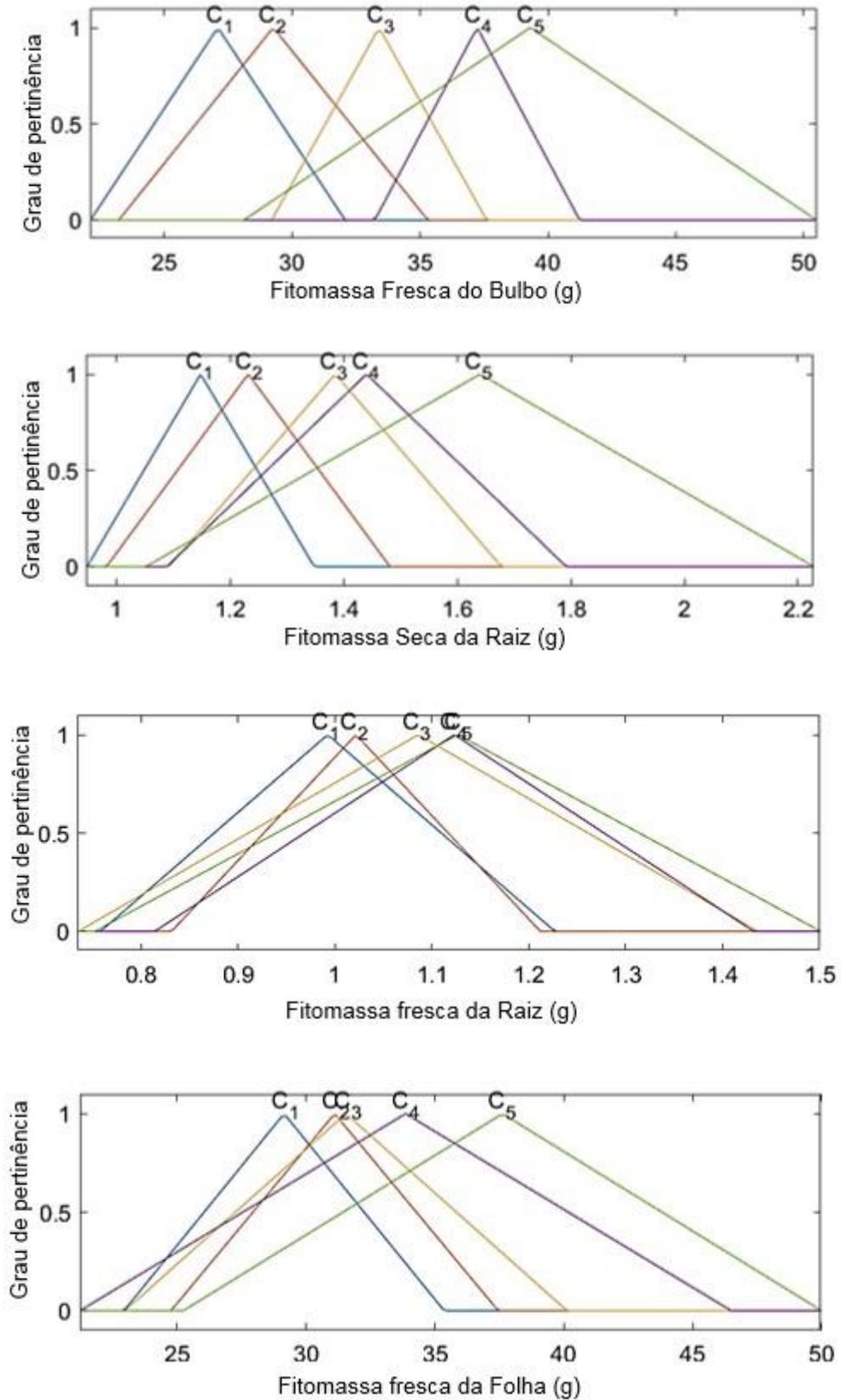
Isso pode ser vista também nas variáveis fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT) e fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), onde tiveram baixos resultados com as lâminas de irrigação de 25% e 125%, sendo (1,2 e 21,3) e (0,7 e 14,3) respectivamente.

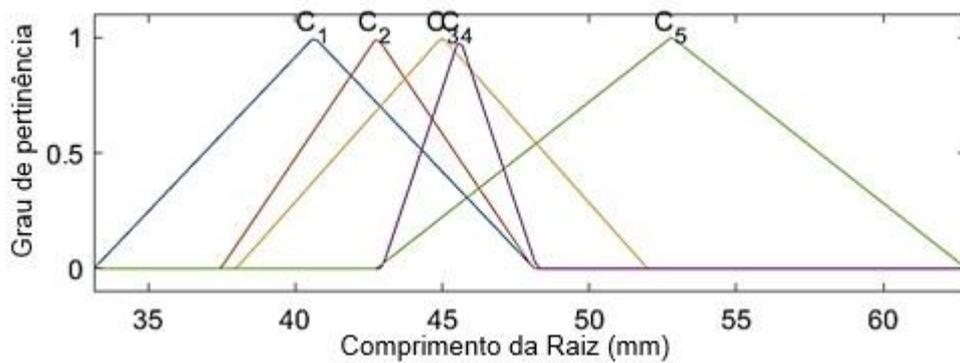
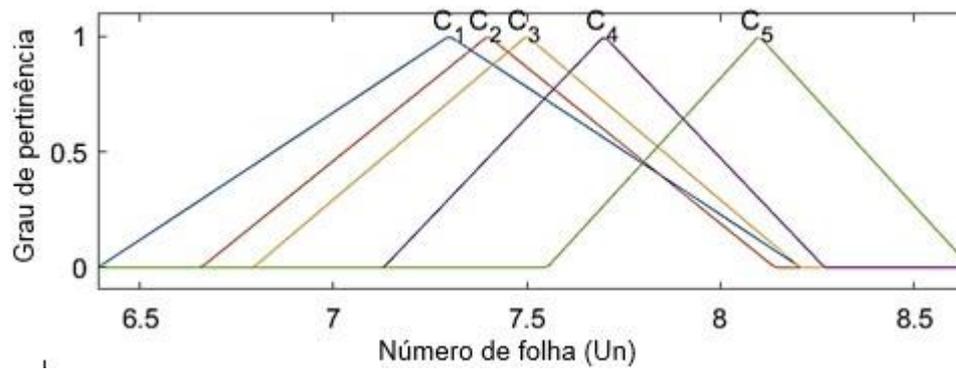
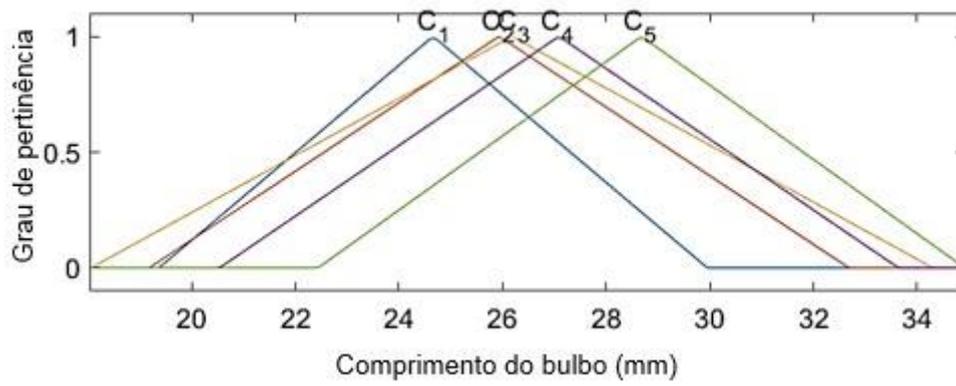
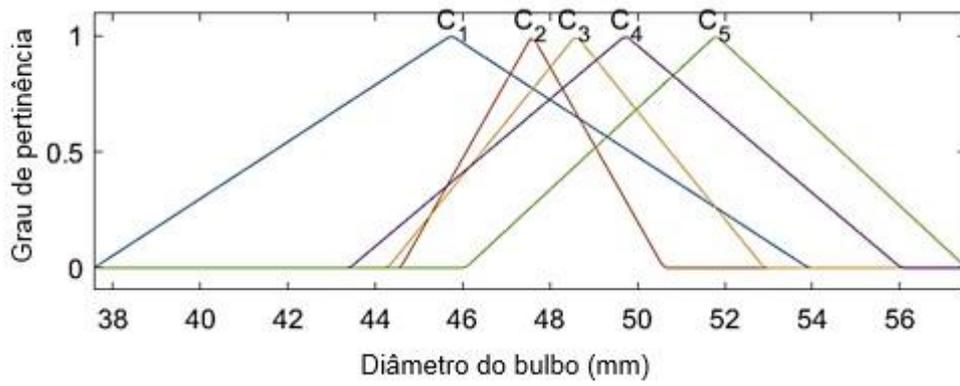
Já a variável comprimento da raiz tuberosa (CRT), alcançou boa produtividade na lâmina de 125% (34 mm), com aproximação de seu valor na lâmina 25% (28 mm), quando observado pela modelagem *Fuzzy*. A mesma ocorrência pode ser constatada em Lacerda et al. (2017), onde a lâmina de irrigação de 125% provocou um aumento na matéria seca do rabanete.

2.3.2 Sistema baseado em regras *Fuzzy* das variáveis biométricas do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente aos 35 DAT

As funções de pertinências triangulares para as variáveis de saída, do SBRF para irrigação ATM, estão demonstrados na Figura 19 e seus delimitadores na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**Tabela 19.

Figura 19. Funções de pertinência de saída para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, para o tratamento AC





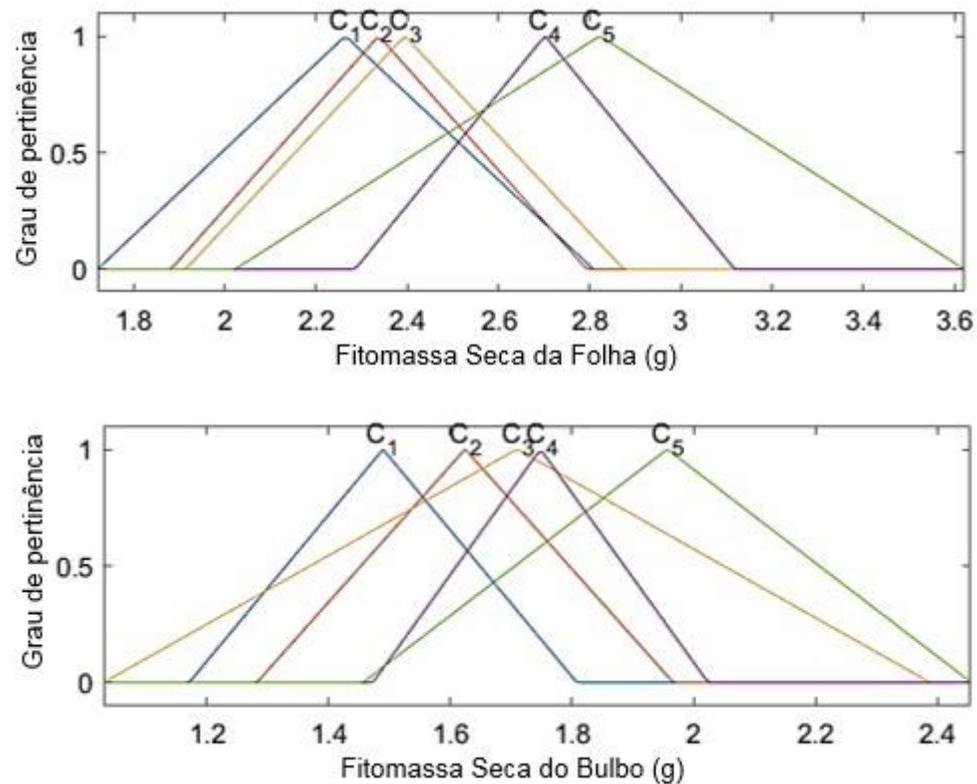


Tabela 19. Delimitadores das funções de pertinência de saída, tipo triangular, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com ATM

		Funções de Pertinência				
		1	2	3	4	5
Variáveis de Saída	NC	[6,392 7,3 8,208]	[6,658 7,4 8,142]	[6,793 7,5 8,207]	[7,13 7,7 8,27]	[7,552 8,1 8,648]
	CR	[33,159 40,651 48,143]	[37,467 42,785 48,103]	[37,99 44,988 51,986]	[42,955 45,592 48,229]	[42,763 52,799 62,835]
	DRT	[37,563 45,739 53,915]	[44,581 47,591 50,601]	[44,287 48,595 52,903]	[43,416 49,724 56,032]	[46,065 51,8 57,535]
	CRT	[19,366 24,659 29,952]	[19,178 25,932 32,686]	[18,054 26,18 34,306]	[20,535 27,087 33,639]	[22,439 28,681 34,923]
	FFR	[0,758 0,993 1,227]	[0,831 1,022 1,212]	[0,735 1,086 1,437]	[0,814 1,123 1,432]	[0,752 1,127 1,502]

FFF	[22,93 29,142 35,354]	[24,757 31,104 37,451]	[22,96 31,542 40,124]	[21,222 33,858 46,494]	[25,23 37,619 50,008]
FFRT	[22,128 27,104 32,08]	[23,232 29,271 35,31]	[29,207 33,407 37,607]	[33,235 37,238 41,241]	[28,116 39,311 50,506]
FSR	[0,949 1,148 1,348]	[0,983 1,232 1,482]	[1,092 1,385 1,678]	[1,089 1,44 1,792]	[1,052 1,64 2,228]
FSF	[1,721 2,265 2,808]	[1,882 2,338 2,794]	[1,914 2,395 2,875]	[2,286 2,702 3,118]	[2,023 2,822 3,622]
FSRT	[1,171 1,49 1,808]	[1,282 1,624 1,967]	[1,03 1,71 2,389]	[1,473 1,748 2,024]	[1,457 1,956 2,456]

Legenda: CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca a raiz tuberosa); C1, C2, C3, C4 e C5 são funções de pertinência.

A base de regra foi desenvolvida com a combinação entre os conjuntos *Fuzzy* de entrada (Lâminas de irrigação) e saída (variáveis biométricas). As regras desenvolvidas estão descritas na Tabela 20.

Tabela 20. Base de regra do SBRF da cultura do Rabanete, irrigada com água tratada magneticamente

Regra	Conjunto de Entrada	Conjunto de Saída									
		NC	CR	DRT	CRT	FFR	FFF	FFRT	FSR	FSF	FSRT
1	1	5	4	2	1	1	2	1	1	1	4
2	2	4	3	3	5	4	5	2	4	2	5
3	3	2	1	1	2	2	3	3	2	3	2
4	4	1	2	5	3	3	1	4	3	4	1
5	5	3	5	4	4	5	4	5	5	5	3

Legenda: (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca da raiz tuberosa).

A análise de ajuste dos dados foi realizada para os modelos com tratamento ATM. A Tabela 21 descreve a validação do modelo *Fuzzy* e a comparação do mesmo com o modelo estatístico polinomial das variáveis biométricas de saída.

Tabela 21. Validação dos modelo Fuzzy para as variáveis de saída da cultura do Rabanete, irrigado com ATM

Variável	Índices	Modelo <i>fuzzy</i>	Regressão polinomial	Equação Regressão
NF	χ^2	1.345 (p=1)	1.347 (p=1)	$y = 0.0002.x^2 + -0.034.x + 8.86$
	R^2	0.166 (p=0.0429)	0.164 (p=0.0444)	
	RMSE	0,633	0,634	
	MAE	0,472	0,476	
CR	χ^2	20.502 (p=0.6679)	21.447 (p=0.6123)	$y = 0.003.x^2 + -0.426.x + 55.553$
	R^2	0.297 (p=0.0048)	0.252 (p=0.0106)	
	RMSE	6,251	6,441	
	MAE	4,838	4,746	
DRT	χ^2	13.22 (p=0.9624)	15.066 (p=0.9188)	$y = 0.0003.x^2 + -0.017.x + 47.827$
	R^2	0.13 (p=0.0767)	0.04 (p=0.3398)	
	RMSE	5.194	5.445	
	MAE	4.169	4.375	
CRT	χ^2	38.858 (p=0.0283)	41.02 (p=0.0166)	$y = -0.0004.x^2 + 0.065.x + 24.185$
	R^2	0.048 (p=0.2943)	0.007 (p=0.6911)	
	RMSE	38.858 (p=0.0283)	41.02 (p=0.0166)	
	MAE	4,866	4,871	
FFR	χ^2	1.968 (p=1)	1.972 (p=1)	$y = -0.000002.x^2 + 0.001.x + 0.994$
	R^2	0.039 (p=0.3439)	0.014 (p=0.5691)	
	RMSE	0.269	0.272	
	MAE	0.226	0.23	
FFF	χ^2	52.984 (p=0.0006)	54.528 (p=0.0004)	$y = 0.000009.x^2 + -0.013.x + 33.583$
	R^2	0.1 (p=0.1236)	0.002 (p=0.8267)	
	RMSE	8,674	9,097	
	MAE	7,065	6,871	
FFRT	χ^2	27.564 (p=0.2788)	27.906 (p=0.264)	$y = -0.00006.x^2 + 0.138.x + 23.306$
	R^2	0.375 (p=0.0011)	0.371 (p=0.0012)	
	RMSE	5,944	5,959	
	MAE	4,572	4,691	
FSR	χ^2	1.716 (p=1)	1.799 (p=1)	$y = 0.00003.x^2 + -0.001.x + 1.234$
	R^2	0.215 (p=0.0196)	0.137 (p=0.0686)	
	RMSE	0.326	0.341	
	MAE	0.254	0.259	
FSF	χ^2	2.728 (p=1)	2.76 (p=1)	$y = 0.00004.x^2 + 0.000005.x + 2.233$
	R^2	0.161 (p=0.047)	0.154 (p=0.0522)	
	RMSE	2.728 (p=1)	2.76 (p=1)	
	MAE	0,396	0,402	
FSRT	χ^2	2.158 (p=1)	2.269 (p=1)	$y = 0.00003.x^2 + -0.006.x + 1.979$
	R^2	0.126 (p=0.0812)	0.036 (p=0.3644)	
	RMSE	0,403	0,422	

MAE 2.158 (p=1) 2.269 (p=1)

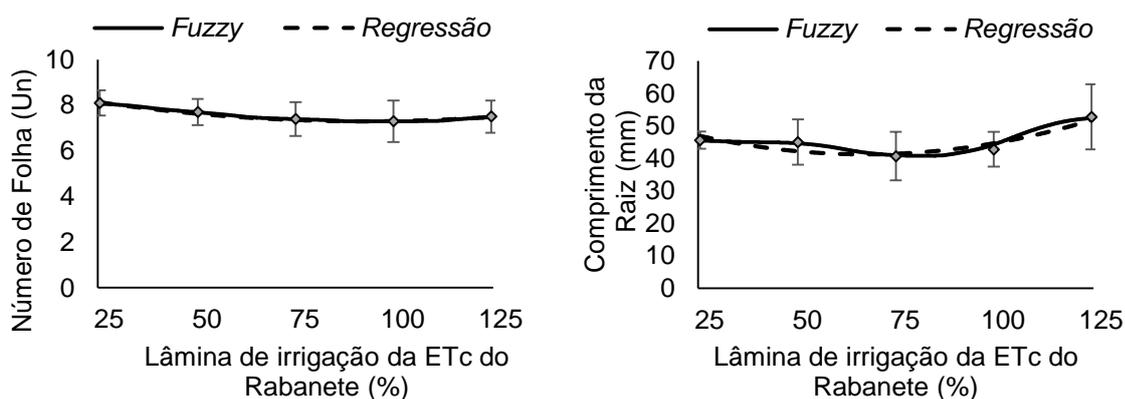
Legenda: χ^2 = Teste Qui-Quadrado; R^2 = Coeficiente de determinação; *RMSE* = Desvio do quadrado médio da raiz; *MAE* = Erro quadrado médio da raiz. CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca da raiz tuberosa).

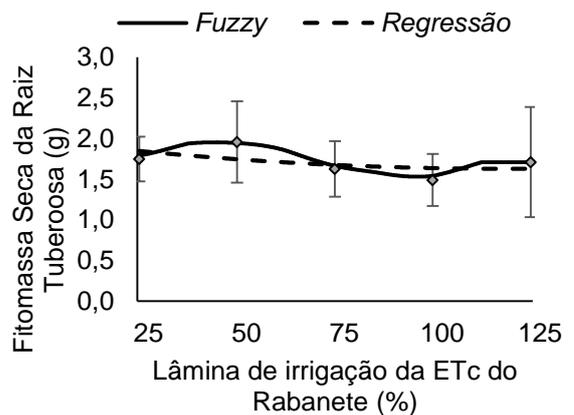
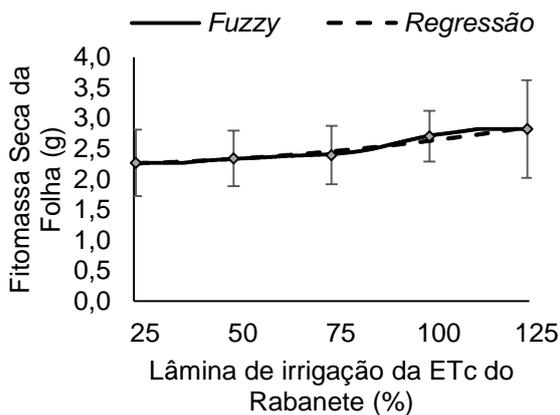
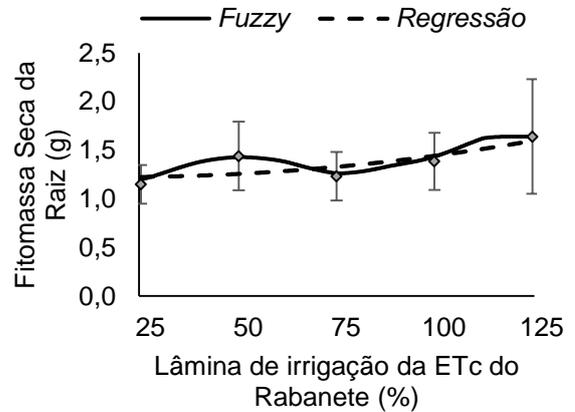
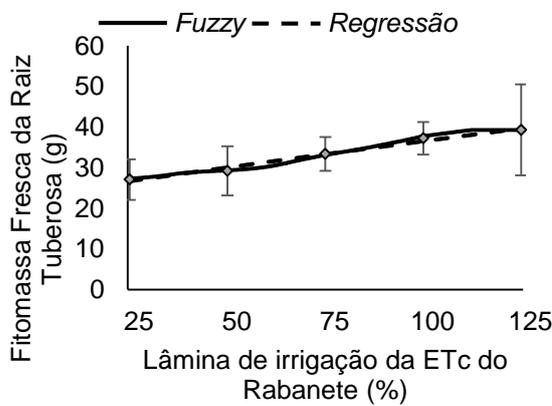
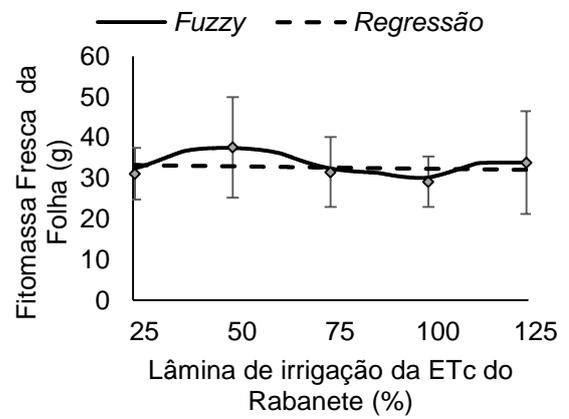
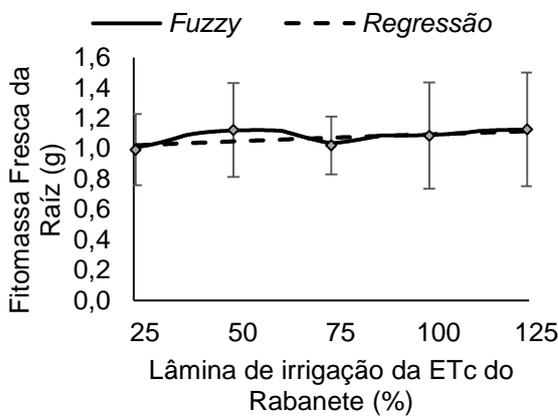
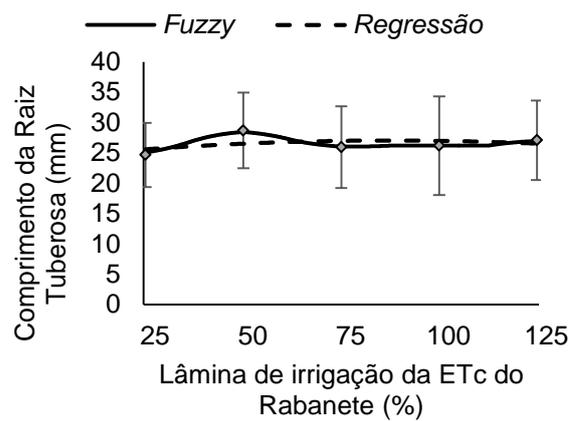
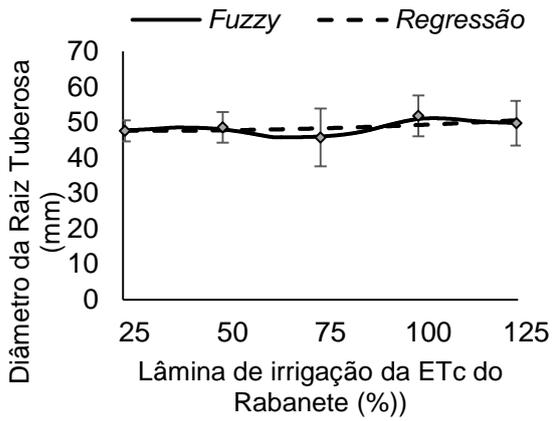
Analisando a validação dos modelos, verifica-se que em todas as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, o modelo *Fuzzy* foi superior em demonstrar a produtividade da cultura no *DAS* 35, quando comparado com o modelo estatístico. O mesmo ocorreu para os modelos *Fuzzy* que retratam os resultado do tratamento com AC.

Todas as variáveis biométricas, no modelo *Fuzzy*, adquiriram R^2 superiores ao modelo polinomial, demonstrando a eficiência do modelo *Fuzzy* na interpretação, na estimativa e no ajuste dos dados, com menores erros.

Como demonstração gráfica da validação dos modelos, a Figura 20 apresenta a comparação dos modelos desenvolvidos para a produtividade da cultura, sobre as variáveis biométricas irrigada com ATM.

Figura 20. Comparação da função resposta, dos modelos propostos, para as variáveis biométricas da cultura do Rabanete, irrigado com ATM





Observando a comparação entre as funções de resposta dos modelos desenvolvidos, constata-se que a variável número de folha (NF) não obteve diferença entre os modelos analisados. Resultado semelhante pode ser observado com a utilização da água convencional.

No entanto, se comparar a unidade de folha em cada lâmina de irrigação aplicada, sobre o tipo de tratamento utilizado, observa-se que uma boa quantidade de folha foi adquirida na lâmina de 25%, nos dois tratamentos aplicados (AC e ATM), sendo que o tratamento ATM foi superior em 17,83% para a lâmina com ótima produção (25%). O aumento do número de folhas, com tratamento ATM, também pode ser apreciado em Conceição (2016), onde o autor descreve o crescimento do número de folhas, o aumento da espessura da folha da cultura do rabanete, quando irrigado com água magnetizada.

Para a variável FFF, verifica-se que lâmina de irrigação 50% foi mais eficiente do que as demais lâminas de irrigação, produzindo 37,6 g, contra 29,3 g produzida pela lâmina de 75% apresentada como a mais eficiente no tratamento AC. A eficiência da utilização da água magnetizada para esta variável pode ser visualizada em Ferrari (2018), na aplicação de água magnetizada no cultivo do Rabanete.

Observando as variáveis FSRT, CRT, e DRT apresentaram boa produção na lâmina de 50%, com 2 g, 28,7 mm e 51,8 mm respectivamente, onde estes valores são superiores em 81%, 19,5% e 15,63% respectivamente, com tratamento AC. As demais variáveis apresentaram igualdade na comparação de incrementos, em comparação das variáveis analisadas, entre os tipos de tratamento de irrigação (AC e ATM).

2.3.3 Análise das relações entre as variáveis biométricas e de produtividade

2.3.3.1 Análise de correlação entre as variáveis biométricas

A análise de correlação para as variáveis biométricas e de produtividade do rabanete irrigado com água convencional revelou que a variável número de folha (NF) obteve correlação significativa com a maioria das variáveis investigadas (Tabela 22). Pode-se afirmar que as variáveis, fitomassa seca da folha (FSF) e fitomassa fresca da raiz (FFR) apresentaram r (índice coeficiente de correlação) alto e positivo, com

valores calculados respectivamente 0,726 e 0,614. De acordo Putti et al. (2015), este fenômeno ocorre devido as altas temperaturas que foram percebidas no local durante o experimento, uma vez que temperaturas altas fazem com que a planta tenha maior crescimento nas fases fenológicas iniciais.

Tabela 22. Correlações entre as variáveis de saída da cultura do Rabanete, tratada com água convencional

	NF	CR	DRT	CRT	FFR	FFF	FFRT	FSR	FSF
CR	0,518*								
DRT	0,472*	0,368 ^{NS}							
CRT	0,115 ^{NS}	-0,175 ^{NS}	-0,411*						
FFR	0,614*	0,576*	0,304 ^{NS}	0,036 ^{NS}					
FFF	0,436*	0,814*	0,342 ^{NS}	0,014 ^{NS}	0,511*				
FFRT	0,124 ^{NS}	0,005 ^{NS}	0,350 ^{NS}	-0,101 ^{NS}	0,420*	0,190 ^{NS}			
FSR	0,485*	0,530*	0,529*	-0,122 ^{NS}	0,369 ^{NS}	0,321 ^{NS}	-0,105 ^{NS}		
FSF	0,726*	0,694*	0,358 ^{NS}	0,108 ^{NS}	0,888*	0,545*	0,187 ^{NS}	0,485*	
FSRT	0,464*	0,842*	0,395*	-0,021 ^{NS}	0,580*	0,970*	0,174 ^{NS}	0,290 ^{NS}	0,617*

Variáveis com o símbolo “NS” não demonstraram correlação a um nível de 5% de significância. Variáveis com o símbolo “*” demonstraram correlação a um nível de 5% de significância. CR (Comprimento da raiz); NF (Número de folha); DRT (Diâmetro Da raiz tuberosa); CRT (Comprimento da raiz tuberosa); FFR (Fitomassa fresca da raiz); FFF (Fitomassa fresca da folha); FFRT (Fitomassa fresca da raiz tuberosa); FSR (Fitomassa seca da raiz); FSF (Fitomassa seca da Folha); FSRT (Fitomassa seca da raiz tuberosa).

Já variável comprimento da raiz (CR) apresentou alta correlação com as variáveis fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT) e fitomassa fresca da folha (FFF). Para El-Desuki et al. (2005), a produtividade do comprimento da raiz está relacionada com o número da folha da planta e a área foliar. Essa relação ocorre devido a uma interceptação da luz, gerando uma produção maior de fotoassimilados.

Em relação a variável diâmetro da raiz tuberosa (DRT), observou-se uma correlação negativa com o comprimento da raiz tuberosa (CRT), ou seja, as variáveis são inversas. Conforme o diâmetro da raiz tuberosa aumenta, o comprimento diminui e vice-versa. Isso se deve a temperatura altas no período do cultivo. De acordo com Lima (2018), o crescimento da raiz tuberosa é prejudicado pelas altas temperaturas do ambiente e pelo excesso de irrigação antes do período de desenvolvimento da raiz tuberosa. Isso promove um crescimento rápido do diâmetro da raiz tuberosa e uma diminuição do comprimento do mesmo. O coeficiente do crescimento da raiz tuberosa com as demais variáveis não demonstrou significância ao nível de 5%.

A variável fitomassa fresca da folha (FFF) alcançou uma alta correlação (0,970), com a variável fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT). Conforme Cremasco

(2015), houve um aumento da temperatura ambiente durante o período de cultivo, necessitando um aumento nos níveis de lâminas de irrigação. Diante disto, de acordo com Lacerda et al. (2017), a relação entre fitomassa fresca da folha e a fitomassa seca da raiz tuberosa está direcionada com a disponibilidade de água, já que quanto maior a quantidade de água disponível, melhor será o desenvolvimento da planta. Em seu estudo, o autor menciona que a produtividade da cultura obteve melhores resultados quando aplicado uma lâmina de 100% e 125%.

Já a análise de correlação para as variáveis biométricas e de produtividade do rabanete irrigado com água tratada magneticamente revelou que houve pouca correlação entre as variáveis (Tabela 23).

Tabela 23. Correlações entre as variáveis biométrica cultura do Rabanete irrigada com ATM

VAR.	NF	CR	DRT	CRT	FFR	FFF	FFRT	FSR	FSF
CR	-0,102 ^{NS}								
DRT	-0,370 ^{NS}	0,373 ^{NS}							
CRT	0,144 ^{NS}	-0,179 ^{NS}	-0,118 ^{NS}						
FFR	-0,042 ^{NS}	0,256 ^{NS}	-0,002 ^{NS}	0,035 ^{NS}					
FFF	-0,201 ^{NS}	0,651*	0,252 ^{NS}	-0,072 ^{NS}	0,188 ^{NS}				
FFRT	0,026 ^{NS}	0,259 ^{NS}	-0,016 ^{NS}	0,000 ^{NS}	0,492*	0,064 ^{NS}			
FSR	-0,069 ^{NS}	0,099 ^{NS}	0,107 ^{NS}	0,202 ^{NS}	-0,129 ^{NS}	0,175 ^{NS}	-0,061 ^{NS}		
FSF	0,230 ^{NS}	0,244 ^{NS}	-0,058 ^{NS}	0,025 ^{NS}	0,609*	0,102 ^{NS}	0,918*	0,040 ^{NS}	
FSRT	-0,077 ^{NS}	0,589*	0,156 ^{NS}	-0,158 ^{NS}	0,258 ^{NS}	0,941*	0,062 ^{NS}	0,112 ^{NS}	0,180 ^{NS}

Variáveis com o símbolo "NS" não demonstraram correlação a um nível de 5% de significância. Variáveis com o símbolo "*" demonstraram correlação a um nível de 5% de significância.

Observou-se que as variáveis número de folha (NF), diâmetro da raiz tuberosa (DRT), fitomassa seca da raiz (FSR) e comprimento da raiz tuberosa (CRT), não demonstraram significância com as demais variáveis analisadas.

A variável fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT) apresentou alta significância com a variáveis fitomassa seca da folha (FSF). Outra correlação com grande significância foi constatada entre as variáveis fitomassa fresca da folha (FFF) e o fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT).

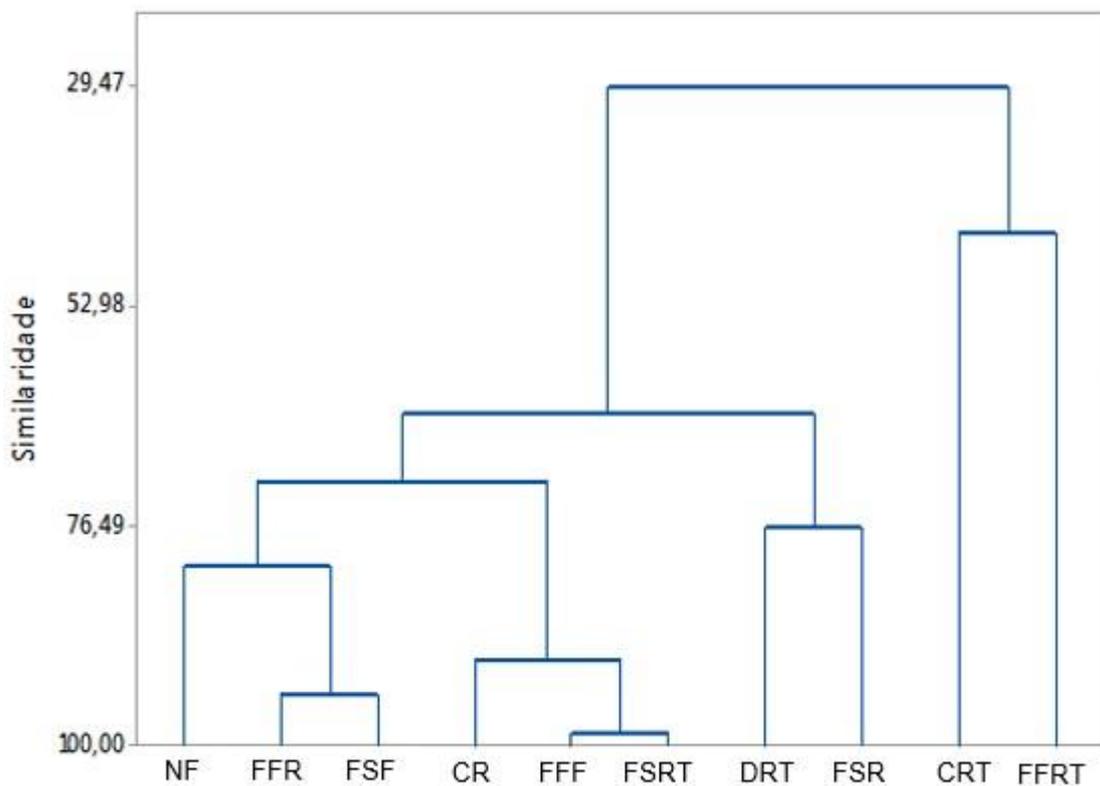
2.3.3.2 Análise de agrupamento de variáveis

A Figura 21 apresenta o dendograma e ilustra as formas de interações entre as variáveis biométricas da cultura do rabanete irrigado com água convencional. Para Martins et al. (1992), o dendograma apresenta um retrato gráfico da análise de

agrupamento. A estrutura é exposta em um formato de árvore que representam as etapas do processo.

A interpretação dos dados consistiu em separar as variáveis estudadas por meio de agrupamento de similaridade, consideradas nesta avaliação pela distância entre as variáveis agrupadas. Observou-se que quanto maior a distância entre os objetos observados, menor é a sua similaridade.

Figura 21. Dendrograma das variáveis biométrica de saída cultura do Rabanete, com tratamento convencional



Observa-se que as variáveis biométricas foram unificadas em grupos por meio de medidas de similaridades (distâncias entre as variáveis). Os resultados do agrupamento foram distribuídos em forma de uma árvore hierárquica.

Analisando as similaridades entre as variáveis e os grupos formados, verifica-se que as variáveis FFF e FSRT obtiveram ótima similaridade, bem como as variáveis FFR e FSF. Pode-se dizer que o grupo formado com a variável CR e as variáveis FFF e FSRT, também demonstraram similaridade significativa.

A medida que os passos de similaridades vão sendo desenvolvidos, observa-se que houve similaridade entre as variáveis CRT e FFRT, formando um novo grupo.

Entretanto esse grupo alcançou pouca similaridade com os demais grupos formados, sendo 29,47 de similaridade e 1,41 de nível de distância.

Verifica-se também que há uma similaridade de 90,72 entre o grupo composto pelas variáveis FFF e FSRT; e pela variável CR. Para Silva et al. (2016), a similaridade entre essas variáveis pode estar relacionada com as condições do ambiente, que permite melhor desempenho fotossintético e maior quantidade de fotoassimilados.

Como não há uma teoria para especificar o nível de corte, cabe ao pesquisador analisar e avaliar o melhor intervalo de corte para o seu estudo. Analisando o dendograma confeccionado e a Tabela 24, verifica-se que a melhor posição de corte compreende acima de 52,98 de similaridade.

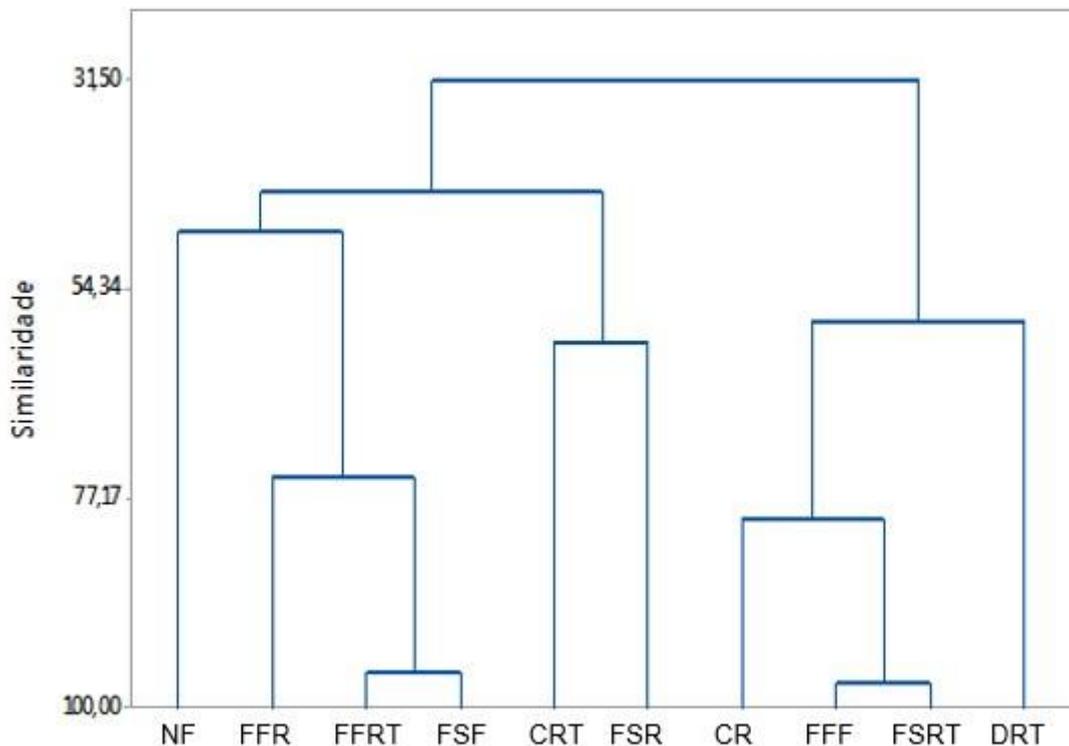
A partir desse ponto, é possível observar a concentração de sete grupos similares, onde o primeiro grupo (G1) é constituído pelas variáveis fitomassa fresca da folha (FFF) e fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT), o segundo grupo (G2) é constituído pelo fitomassa fresca da raiz (FFR) e fitomassa seca da folha (FSF), o terceiro grupo (G3) contém o comprimento da raiz e os componentes do G1, o quarto grupo (G4) é formado pelas variáveis do G2 e a variável número de folha (NF), o quinto grupo (G5) tem a formação pelas variáveis diâmetro da raiz tuberosa (DRT) e fitomassa seca da raiz (FSR), já o sexto grupo (G6) é formado pelas variáveis dos grupos 3 e 4, e o sétimo grupo (G7) é constituído pelos grupos 5 e 6.

Tabela 24. Análise de agrupamento das variáveis biométricas de saída do Rabanete

Passo	Número de agrupados	Nível de similaridade	Nível de distância	Agrupados reunidos		Novo agrupado	Número de obs. no novo agrupado
1	9	98,4814	0,03037	6	10	6	2
2	8	94,3935	0,11213	5	9	5	2
3	7	90,7200	0,18560	2	6	2	3
4	6	80,7217	0,38557	1	5	1	3
5	5	76,4668	0,47066	3	8	3	2
6	4	71,8191	0,56362	1	2	1	6
7	3	64,4964	0,71007	1	3	1	8
8	2	44,9446	1,10111	4	7	4	2
9	1	29,4725	1,41055	1	4	1	10

Para o tratamento ATM, também foi realizado o agrupamento de dado, para avaliar a o comportamento de similaridade das variáveis biométricas do rabanete (Figura 22).

Figura 22. Dendrograma das variáveis biométricas da cultura do Rabanete irrigada com ATM



Observou-se que não houve uma concentração de variáveis em grupos com alta similaridade, como verificado nas análises das variáveis com tratamento de água convencional descrito no capítulo 2.

O dendrograma demonstrou que houve o destaque de dois grupos em relação a concentração das variáveis, mas com baixa similaridade entre si. Um grupo formado pelas variáveis: número de folha (NF), fitomassa fresca da raiz (FFR), fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), fitomassa seca da folha (FSF), comprimento da raiz tuberosa (CRT) e fitomassa seca da raiz (FSR), e o outro grupo compreendido pela concentração das variáveis comprimento da raiz (CR), fitomassa fresca da folha (FFF), fitomassa seca da raiz tuberosa (FSRT) e diâmetro da raiz tuberosa (DRT).

No entanto, de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada**. Tabela 25, o corte realizado próximo a 55 de nível de similaridade, indica a concentração de três grupos, onde o grupo 1 (G1) é formado pelas variáveis fitomassa da raiz tuberosa (FFRT), fitomassa fresca da raiz (FFR) e fitomassa seca da folha (FSF); o grupo dois (G2) é compreendido pelas variáveis comprimento da raiz tuberosa (CRT) e fitomassa seca da raiz (FSR); e o grupo três (G3) é definido

pelas variáveis comprimento da raiz (CR), fitomassa fresca da folha (FFF), fitomassa seca da raiz tuberosa (FRT) e diâmetro da raiz tuberosa (DRT).

Tabela 25. Análise de agrupamento das variáveis biométricas da cultura do Rabanete irrigada com ATM

Passo	Número de agrupados	Nível de similaridade	Nível de distância	Agrupados reunidos		Novo agrupado	Número de obs. no novo agrupado
1	9	97,0528	0,05894	6	10	6	2
2	8	95,9010	0,08198	7	9	7	2
3	7	79,4548	0,41090	2	6	2	3
4	6	74,6223	0,50755	5	7	5	3
5	5	60,1152	0,79770	4	8	4	2
6	4	57,8100	0,84380	2	3	2	4
7	3	47,9012	1,04198	1	5	1	4
8	2	43,5668	1,12866	1	4	1	6
9	1	31,5039	1,36992	1	2	1	10

Outra observação importante está na similaridade entre variáveis fitomassa fresca da raiz tuberosa e fitomassa seca da folha, compreendidas em grupos com 96 de nível de similaridade; e nas variáveis fitomassa seca da raiz tuberosa e fitomassa fresca da folha contidas em grupo com 97 de similaridade.

2.3.3.3 Análise de variância (ANOVA)

Para analisar a produtividade do Rabanete irrigado com água convencional e água tratada magneticamente, foi realizada também uma comparação das lâminas de irrigação, nos dois tratamentos sobre os efeitos gerados nas variáveis biométricas analisadas da cultura, Tabela 26.

A análise foi realizada pelo métodos análise de variância (ANOVA), onde consiste em verificar se existe diferença entre as médias individuais ou gerais entre os grupos analisados, de modo geral ela verifica se existe diferença significativa entre as médias dos indivíduos e a média geral (DANCEY; JOHN, 2006).

Tabela 26. Análises das médias das variáveis biométricas do Rabanete para os diferentes tipos de água

Var	Água	Lâminas					Total
		25%	50%	75%	100%	125%	
	AC						6,5±0,7 B

NF	ATM						7,6±0,7 A
	Total						
CR	AC	45,8±6 Aa	45±1,6 Aa	47,8±7,2 Aa	35,2±4 Ab	34,8±7,4 Bb	
	ATM	45,6±2,6 Aa	45±7 Aa	40,7±7,5 Ab	42,8±5,3 Aa	52,8±10 Aa	
	Total						
DRT	AC	39,8±25 Aa	49±5,6 Aa	44,8±6,9 Aa	41,4±5,2 Aa	14,9±4,7 Bb	
	ATM	47,6±3 Aa	48,6±4,3 Aa	45,7±8,2 Aa	51,8±5,7 Aa	49,7±6,3 Aa	
	Total						
CRT	AC						
	ATM						
	Total						
FFR	AC						
	ATM						
	Total						
FFF	AC						18,8±8,5 B
	ATM						32,7±9,3 A
	Total						
FFRT	AC	21,35±8,88 Aa	13,83±2,7 Bab	25,09±7,06 Aab	31,95±2,8 Aa	14,3±10,33 Bb	
	ATM	27,1±4,98 Aa	29,27±6,04 Aa	33,41±4,2 Aa	37,24±4 Aa	39,31±11,2 Aa	
	Total						
FSR	AC	1,21±0,34 Aa	1,53±0,4 Aa	0,93±0,21 Ab	0,69±0,08 Bb	0,64±0,37 Bb	
	ATM	1,15±0,2 Aa	1,44±0,35 Aa	1,23±0,25 Aa	1,39±0,29 Aa	1,64±0,59 Aa	
	Total						
FSF	AC	2,96±0,94 Aa	2,19±0,56 Aab	2,07±0,86 Aab	1,4±0,28 Bb	1,09±0,48 Bb	
	ATM	2,27±0,54 Aa	2,34±0,46 Aa	2,4±0,48 Aa	2,7±0,42 Aa	2,82±0,8 Aa	
	Total						
FSRT	AC						1,06±0,54 B
	ATM						1,71±0,44 A
	Total	1,47±0,37 a	1,53±0,59 a	1,65±0,59 a	1,1±0,47 a	1,18±0,75 a	

Quando analisadas ao longo do ciclo as variáveis NF e FFF e FSRT apresentaram interação entre os tratamentos com AC e ATM. Os valores de médias para o NF variam de forma expressiva para os resultados utilizando a ATM (cerca de 1 unidade a mais) se comparados aos resultados obtidos para a irrigação com AC. O FFF obteve resultados mais expressivos ainda no mesmo sentido se comparados os tratamentos.

As variáveis CR, DRT, FFRT, FSF, FFRT e FSR obteve desempenho diferenciado para a avaliação de lâminas e tipo de água, com valores médias superiores para as variáveis DRT, CR e FFRT, no uso de ATM, comparados com nas lâminas da irrigação com AC.

Como forma de produtividade da cultura do Rabanete, a lâmina de 75% do uso da ATM, demonstrou ser mais eficiente que a lâmina de 100% da AC sobre a fitomassa fresca da raiz tuberosa (FFRT), o que demonstra importância para o produtor.

2.4 CONCLUSÃO

Similar o ocorrido no capítulo 1, observou-se que o modelo *Fuzzy* foi superior ao modelo estatístico desenvolvido pelo presente trabalho, sobre todas as variáveis biométricas analisadas, demonstrando a sua eficiência na estimação dos dados, para as tomadas de decisões, por parte dos produtores.

De acordo com as Lâminas de irrigação e das variáveis biométricas avaliadas, a produtividade da cultura do Rabanete na cidade de Botucatu/SP, foi alcançada com a utilização da lâmina de irrigação de 75% da ETc, com água convencional.

Considerando as propriedades da água magnetizada e seus benefícios demonstrados para cultura, verificou-se que a lâmina de irrigação de 50% da ETc apresentou bom desenvolvimento das variáveis biométricas e produtividade da cultura do Rabanete, para a cidade de Botucatu/SP.

A aplicação da ATM demonstrou grande eficiência na redução da água utilizada para irrigação, em comparação aos resultados apresentados com a utilização da água convencional, beneficiando o produtor no custo final da produção.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. B.; BELDERRAIN, M. C. N.; SCARPEL, R. A. Tratamento multivariado de dados por análise de correspondência e análise de agrupamento. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO OITAVA, 13., 2007, São José dos Campos. **Anais...**, São José dos Campos: CTA/ITA, 2007. 7p.

BARROS, C. L.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. 2. ed. Campinas, SP: UNICAMP/IMECC, 2010.

BENINI, L. C. Uma introdução à teoria dos conjuntos *fuzzy*. In: Congresso Brasileiro de Sistemas *fuzzy*, 2., 2012, Natal. **Anais...**, São Carlos: SBMAC, 2012.

BREGONCI, I. S. E. A. Desenvolvimento do sistema radicular do rabanete em condições de estresse hídrico. **IDESIA (Chile)**, Arica, v. 26, n. 1, p. 33-38, jan./abr. 2008.

CHOUERI, M. **Modelagem fuzzy para avaliação do desenvolvimento da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente sem estresse hídrico**.

2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronegocio e Desenvolvimento)-Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2015.

CONCEIÇÃO, N. R. **Homeopatia phosphorus e água biomagnetizada no crescimento e características fotossintéticas em plantas de Rabanete.** 2016. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Tecnologia em Agroecologia)-Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2016.

CREMASCO, C. P. et al. Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 44., 2015, São Pedro. **Anais...**, Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2015. p. 1-9.

DANCEY, C. P.; JHON, R. **Estatística sem matemática para psicologia: Usando SPSS para Windows.** 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

DANTAS, A. E. A. et al. Produção de rabanete (*Raphanus Sativus L.*) sob diferentes níveis e fontes de fertilizantes orgânicos. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 2015, Fortaleza, **Anais...** Jaboticabal, SP: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2015. p. 1-9.

DELAZARI, F. T. et al. Eficiência no uso da água e acúmulo de matéria na batata-doce em função de lâminas de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 1, p. 115-128, jan./mar., 2017.

DEYVER, B. **Plataforma computacional fuzzy para avaliação nos estágios do tomateiro dos efeitos da irrigação e salinidade da água.** 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento)-Universidade Estadual Paulista, Campus de Tupã, 2016.

DONI, M. V. **Análise de cluster: métodos hierárquicos e de particionamento.** São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2004. Disponível em <http://meusite.mackenzie.com.br/rogerio/tgi/2004Cluster.PDF_>. Acesso em: 12 set. 2017.

EMBRAPA. **Hortaliças em revista:** Importância nutricional das hortaliças. Brasília,DF: Embrapa Produção de informação, 2012. 16 p.

FERRARI, J. M. S. **Análise da produtividade e das variáveis biométricas do Rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente utilizando modelagem neuro fuzzy.** 2018. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

FILGEUIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura:** agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2007. 421 p.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2. ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2003.

FREI, F. **Introdução à análise de agrupamento: teoria e prática**. São Paulo: Editora Unesp, 2006.

GABRIEL FILHO, L. R. A. **Sistemas fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias**. 2015. 258 p. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional)-Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Tupã, 2015.

GIRDEN, E. **ANOVA: Repeated Measures**. 84. ed. California: SAGE Publications, 1992.

GOUVÊA, M. A.; PREARO, L. C.; ROMEIRO, M. C. Avaliação da aplicação de técnicas multivariadas de interdependência em teses e dissertações de algumas instituições de ensino superior. **FACEF Pesquisa: Desenvolvimento e Gestão**, Franca, v. 15, n. 1, p. 107-123, jan./abr. 2012.

KLAR, A. E. et. al. The effects of different irrigation depths on radish crops. **Irriga**, Botucatu, p. 150-159, 2015. Edição Especial 20 anos Irriga + 50 anos FCA.

LACERDA, V. R. et al. Características morfológicas e produtivas do rabanete so diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 1127-1134, jan./fev. 2017.

LACERDA, C. F. **Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro**. Recife: UFRP, 2007. 79 p. Disponível em:

<https://www.agro.ufg.br/up/68/o/APOSTILA_-_RELA__ES_SOLOS__GUA_PLANTA.pdf>. Acesso em: 12 maio 2018.

LIMA, C. E. P.; OLIVEIRA, V. R. **Arvore do conhecimento: cebola**. **AGEITEC:**

Agência Embrapa de Informação tecnológica. Disponível em:

<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cebola/arvore/CONT000gn0iyu2a02wx5ok0liq1mq7mr143w.html>>. Acesso em: 12 maio 2018.

LOLLATO, M. A. Produtividade na lavoura. **Revista Cultivar Grandes Culturas**,

Pelotas, v. 3, n. 27, p. 32-34, abr. 2001. Disponível em: <

<https://www.grupocultivar.com.br/artigos/produtividade-na-lavoura>> Acesso em: 25 set. 2017.

LOPES, et al. Irrigação magnética. **Revista Agro@ mbiente On-line**, Boa Vista, v. 1, n. 1, p. 1-8, jul/dez. 2007.

MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. O emprego da inteligências artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial. In: SEMINÁRIO CATARINENSE DE MANUTENÇÃO, 3, Joinville, **Anais...** Joinville: ABRAMAN, 2005.

MARQUELLI, W. A. **Irrigação por aspersão em hortaliças**: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo. 2. ed. Revista Atualizada e Ampliada. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 150 p.

MARTINS, M. E. G.; RODRIGUES, J. F. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, Porto, v. 2, n. 2, p. 34-36, abr./jun. 2014. Disponível em: <https://www.fc.up.pt/pessoas/jfgomes/pdf/revistaCienciaElementar_v2n2.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2017.

MARTINS, S. V. et al. Classificação ecológica do estado do Espírito Santos baseada em condições climáticas. **Rvista Árvore**, Viçosa, v. 16, n. 3, p. 272-286, set./dez. 1992.

MINCHINTON, E. J. et al. Evaluation of the efficacy and economics of irrigation management, plant resistance and Brassica spot™ models for management of white blister on Brassica crops. **Australasian Plant Pathology**, Murdoch, v. 42, p. 169-178, 2013.

OSTERTAGOVÁ, Eva. Modelagem usando regressão polinomial. **Procedia Engineering**, Reino Unido v. 48, p. 500-506, 2012.

PEREIRA A. J. et al. Efeitos dos níveis de reposição e frequência de irrigação sobre a produção e qualidade do rabanete. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 117-120, jan./abr. 1999. Disponível em <<http://www.agriambi.com.br/revista/v3n1/117.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2018.

PIMENTA, A. H. M. **Geração genética de classificador fuzzy intervalar do tipo 2**. 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)-Universidade de São Carlos, São Carlos, 2009.

PIMENTEL, C. **Relação da planta com a água**. Rio de Janeiro: Edur, 2004. 191 p. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/A-Rela--o-da-Planta-com-a-Agua-by-Carlos-Pimentel--2004-.pdf> Acesso em: 12 set. 2017.

PUTTI, F. F. **Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem fuzzy**. 2015. 205p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

PUTTI, F. F. **Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente**. 2014, 123f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

RAPOSO JR., J. L. et al. Avaliação da concentração de alguns íons metálicos em diferentes espécies de líquens co cerrado Sul-Mato-Grossense. **Química Nova**, Campo Grande, v. 30, n. 3, p. 582-587, 2007.

RODRIGUES, R. R. et al. Produção de rabanete em diferentes disponibilidades de água no solo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 9, n. 17; p. 2122-2130, 2013.

RUTHERFORD, A. **Introducing ANOVA and ANCOVA: A GLM approach**. 1. ed. California: SAGE Publications, 2001.

SHAUGHNESSY, J. J.; ZECHMEISTER, E. B.; ZECHMEISTER, J. S. **Metodologia de pesquisa em psicologia**. 9. ed. Porta Alegre: AMGH Editora LTDA, 2012.

SILVA, A. A. V. et al. Estimativa da produtividade de trigo em função da adubação nitrogenada utilizando modelagem neuro *fuzzy*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 2, p.180–187, 2014.

SILVA, D. F. D. et al. The production of *Physalis* spp. seedings grown under different-colored shade nets. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 38, n.2, p. 257-263, 2016.

SILVA, R. T. et al. Tolerância do rabanete ao encharcamneto do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 25-33, jan./mar. 2012.

SILVA, V. J. et al. RESPOSTA DA CENOURA À APLICAÇÃO DE DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 6, p. 954-963, nov./dez. 2011.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2005. 215 f. Monografia (Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa)-Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

WAN, S.; KANG, Y. Effect of drip irrigation frequency on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use. **Irrigation Science**, Cordoba, v. 24, p. 161-174, 2006.

ZADEH, L. A. *fuzzy* sets. **Information and Control**, San Diego, v. 8, p. 338-353, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As modelagens *Fuzzy* desenvolvidas em todos os capítulos permitiram analisar e realizar conclusões, de pontos específicos da produtividade da cultura do Rabanete, dos níveis de lâminas de irrigação e da interferência do tipo de água aplicado na produção da cultura.

O emprego da água tratada magneticamente apresentou bons resultados no desenvolvimento das variáveis biométricas da cultura do Rabanete e na produtividade da mesma, em nível de lâmina de irrigação inferiores a 100% da ETc. Para a região de Botucatu/SP, lâmina de 50% da ETc do Rabante obteve melhores resultados, sobre as variáveis biométricas analisadas. Isso intensifica a implantação da água tratada magneticamente por parte do setor agrícola, beneficiando de modo geral os custos de produção.

Todos os modelos *Fuzzy* elaborados demonstraram eficiência em apresentar a realidade agronômica ocorrida em campo, sendo estes superiores a modelagem estatística polinomial presentes nos capítulos.

Por fim, de acordo com os resultados apresentados, a aplicação da modelagem e a utilização da água tratada magneticamente podem ser aplicadas para outras culturas, a partir de adaptações metodológicas realizadas em dados experimentais.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, M. A. R. **Tomate**: produção em campo, em casa de vegetação e em hidroponia. Lavras: UFLA, 2004, p. 391.
- BEVILACQUA, H. E. C. R. **Classificação das hortaliças**. In: HORTA: cultivo de hortaliças. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2006. p. 1-6.
- COSTA, C. C. et al. Crescimento, produtividade e qualidade de raízes de rabanete cultivadas sob diferentes fontes e doses de adubos orgânicos. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, p. 118-122, 2006.
- CREMASCO, C. P. et al. Resposta da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente e convencional. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 44, 2015, São Pedro. **Anais...** São Pedro: CONBEA, 2015. p. 1-9
- CREMASCO, C. P. **Aplicação da lógica *fuzzy* para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.
- EMBRAPA. **Hortaliças em revista**: Importância nutricional das hortaliças. Brasília, DF, 2012. 16 p.
- GABRIEL FILHO, L. R. A. et al. M. Application of *fuzzy* logic for the evaluation of livestock slaughtering. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 813-825, jul./ago. 2011.
- GUEDES, R. A. A. et al. Estratégias de irrigação com água salina no tomateiro cereja em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, Campina grande, v. 19, n. 10, p. 913-919, 2015.
- PIRES, R. C. M. et al. Agricultura irrigada. **Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária**, São Paulo, v. 1, p. 98-111, jun. 2008.
- PUTTI, F. F. **Produção da cultura de alface irrigada com água tratada magneticamente**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.
- PUTTI, F. F. et al. *fuzzy* logic to evaluate vitality of *Catasetum fimbriatum* species (Orchidaceae). **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 405-413, 2014.
- RODRIGUES, R. R. et al. Produção de rabanete em diferentes disponibilidades de água no solo. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 9, n. 17, p. 2121-2130, 2013.
- PEREIRA, M. R. R. et al. Efeito de herbicidas sobre plantas de *Brachiaria plantaginea* submetidas a estresse hídrico. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 28, p. 1047-1058, 2010.

SILVA, E. M. B. et al. Características produtiva do rabanete submetido a doses de cinza vegetal. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p. 241, 2015.

SILVA, R. T. et al. Tolerância do rabanete ao encharcamento do solo. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 25-33, jan./mar. 2012.

VALENTE, D. S. M. et al. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola.**, Piracicaba, v. 69, n. 3, p. 173-179, May/Jun. 2012.