



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Integração de dados de sensoriamento remoto em sistema de irrigação por taxa variável utilizando sistemas *fuzzy* de suporte à decisão

Willians Ribeiro Mendes

Orientador: Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEEC: D268

Natal, RN, março de 2020

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Mendes, Willians Ribeiro.

Integração de dados de sensoriamento remoto em sistema de irrigação por taxa variável utilizando sistemas fuzzy de suporte à decisão / Willians Ribeiro Mendes. - 2020.

193 f.: il.

Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação, Natal, RN, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.

1. Sistemas fuzzy - Tese. 2. Controle Fuzzy de Irrigação por Zonas Específicas - Tese. 3. Sistema de suporte à decisão para irrigação - Tese. 4. Irrigação de precisão - Tese. 5. Irrigação por taxa variável - Tese. 6. Sensoriamento remoto - Tese. I. Araújo, Fábio Meneghetti Ugulino de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 004.312

DEDICATÓRIA

À minha família: Nilzete, parceira de todos os momentos, e meus filhos, Alice e Lucas, que nasceram no meio do meu doutorado e dão sentido à minha vida.

Aos meus pais, Rosa e Luiz Carlos, pelos esforços que sempre dispuseram em prol da minha formação educacional.

Aos meus irmãos, Wellington e Juliana, pelo apoio à minha trajetória acadêmica.

A vocês, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Tenho muita sorte de ter trabalhado com o professor Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo, seu apoio, conselhos e incentivo a esta pesquisa foram imprescindíveis. As lições que aprendi foram inestimáveis para o meu trabalho e vida. Agradeço de coração.

Ao longo do caminho muitas pessoas e parceiros contribuíram para o sucesso deste trabalho, assim gostaria de agradecer aos parceiros do projeto, Sr. Anderson Ricardo Seitenfus, Luiz, gerente de negócios internacionais da Fockink, por fornecer dados de especificações do equipamento. Sou grato ao Sr. Luiz Pedro Saccol Fros, gerente de operações da Sistema Irriga®, por fornecer dados de casos reais de seus clientes. Um especial e profundo agradecimento ao Prof. Dr. Derek M. Heeren do Instituto de Agricultura e Recursos Naturais da Universidade do Nebraska - Lincoln, pelo seu apoio e assistência em diferentes e significativos aspectos associados ao meu projeto. Outra pessoa que agradeço em especial é o Prof. Dr. Ritaban Dutta, pesquisador da CSIRO Data61 e CEO da i-ekbase™, por fornecer acesso ao sistema de sensoriamento remoto e assistência nas análises dos dados.

Agradecimentos fraternos a meus amigos e colegas de trabalho: Alcemy G. V. Severino, Mário Sérgio F. F. Cavalcante, José Kleiton E. C. Martins, André Luiz A. Souza, Sérgio Natan Silva, Missilene Farias, André Henrique M. Pires, Gustavo R. Silva, Mayranne É. M. Furtunato, Jean Mário M. de Lima, Danilo C. S. Ichihara, Ícaro B. Q. Araujo e Brunna S. de Vasconcellos pelos momentos de descontração, bate-papos e ajuda nas horas mais tensas.

Meus mais sinceros agradecimentos à minha amada esposa, Nilzete, que me motivou e incentivou durante toda a duração dos meus estudos.

Finalmente, meus maiores agradecimentos aos meus pais, que se sacrificam pelo meu sucesso.

Muito obrigado a todos!

“I suppose it is tempting, if the only tool you have is a hammer, to treat everything as if it were a nail.”

(Abraham H. Maslow)

RESUMO

A água doce é um recurso escasso que, nos dias de hoje, está sob um enfoque sem precedentes devido às preocupações com sustentabilidade dos ecossistemas naturais e por uma demanda agrícola, para alimentar uma população global crescente. Isso transforma a água doce em um recurso natural imprescindível para todos. Todas essas preocupações nos levam à necessidade de gerenciar esse bem com eficiência, dessa forma, necessitando de sistemas inteligentes, automatizados e precisos, especialmente para a irrigação. Essa necessidade motiva o desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias para um uso racional que permitirá aos agricultores melhorar quando e onde a irrigação é aplicada, buscando assim aumentar a produção de alimentos. Para alcançar esses objetivos, este trabalho apresenta um sistema inteligente de Irrigação em Taxa Variável (*Variable Rate Irrigation*). Logo, uma ferramenta de gerenciamento da irrigação por áreas específicas, que ajudará na tomada de decisão em relação à aplicação de quantidade ideal de água em zonas de manejo. O que se espera é um maior rendimento da produtividade da lavoura e uma maior eficiência na utilização da água. Para conseguir essa precisão, o sistema usa uma abordagem com técnicas de inteligência artificial para criar, de forma autônoma, mapas de controle ideais para um sistema de irrigação por pivô central. O cerne desse sistema é a lógica *fuzzy*, que é capaz de estabelecer os valores de referências para os controladores de velocidade de giro e abertura individual de cada válvula dos aspersores de um pivô central. O sistema se baseia na tomada de decisão (“se” aplica mais ou menos água) usando dados de sensoriamento remoto e, com isso, é possível uma irrigação inteligente. Os resultados apontam que os dados de variáveis edafoclimáticas, quando bem combinados com a lógica *fuzzy*, podem resolver as incertezas e não linearidades de um sistema de irrigação, além de estabelecer um modelo de controle para irrigação com alta precisão. Embora nem sempre seja possível reduzir o consumo de água, essa tecnologia tem muitos usos potenciais que podem aumentar a produtividade da fazenda.

Palavras-chave: Irrigação de Precisão, Irrigação por Taxa Variável, Sistemas *fuzzy*, Controle *Fuzzy* de Irrigação por Zonas Específicas, Sistema de Suporte à Decisão para Irrigação, Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

Freshwater is a scarce resource, and nowadays it is under unprecedented focus due to concerns about the sustainability of natural ecosystems and because of the agricultural demand, which needs to feed a growing global population. These concerns make freshwater a necessary natural resource for everyone. All these issues lead us to want to manage this asset efficiently, thus generating an increase in the demand for more intelligent, automated and accurate systems. These needs are the driving force behind the development and implementation of new technologies for more rational use, allowing farmers to improve when and where irrigation is applied, seeking to increase food production. In this manner, this work presents a new proposal for an intelligent variable rate irrigation system application in order to achieve that goal. It is a site-specific irrigation management tool; in other words, a system that should assist in decisions about applying water quantity to delimited zones. We expect a higher yield from crop productivity and greater efficiency in water use. To be successful, the system has an artificial intelligence approach to automatically create optimal control maps for a center pivot irrigation system. At the heart of this system there are the *fuzzy* logic, which is able to set the reference values for the rotating speed controllers and individual opening of each central pivot sprinkler valve. The system is based on the decision making (whether applying more or less water) and will use remote sensing data, so we expect the smart irrigation system to describe the spatial variability of the crop efficiently. The results point out that the edaphoclimatic variables, when well combined with *fuzzy* logic, can solve uncertainties and non-linearities of an irrigation system and define a control model for high precision irrigation. However, it will not always be possible to reduce water consumption, but this technology has many uses to increase farm productivity.

Keywords: Precision Irrigation, Variable Rate Irrigation, *Fuzzy* Systems, Site-Specific Irrigation Control, Irrigation Decision Support System, Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Variabilidade espacial para necessidades hídricas de irrigação	25
Figura 2- Diferentes zonas de manejo dentro da mesma área de plantio	25
Figura 3- O ciclo VRI com seus componentes de informações, suporte a decisões e tecnologia	26
Figura 4- Mapa de prescrição para irrigação por taxa variável.....	27
Figura 5- Representação conceitual do estado da arte e a capacidade relativa de vários elementos e tecnologias de irrigação para aumentar a produtividade da água	29
Figura 6- Pivô Central.....	37
Figura 7- Componentes de um equipamento de irrigação tipo pivô central	38
Figura 8- Movimento de um pivô central.....	40
Figura 9- Tipos de aspersores mais comuns em pivô central.....	40
Figura 10- Ciclo hídrico da água no sistema solo-planta-atmosfera	43
Figura 11- Triângulo de Feret, diagrama de classificação textural dos solos	44
Figura 12- Movimento da água dentro da estrutura da solo-planta.....	46
Figura 13- Comportamento dos solos de acordo com sua capacidade de retenção de água em função da textura	46
Figura 14- Estágios da retenção da água no solo	47
Figura 15- Estágios da retenção da água no solo	48
Figura 16- Ciclo da evapotranspiração.....	50
Figura 17- Ciclo de vida de uma cultura de sorgo	53
Figura 18- Representação do comportamento dos valores de K_c durante o desenvolvimento das culturas	54
Figura 19- Algumas funções de pertinência. (a – função triangular; b – função trapezoidal; c – função gaussiana)	63
Figura 20- Sistema fuzzy de inferência.....	64
Figura 21- Fuzzificação das variáveis entradas para domínio dos conjuntos fuzzy.....	65
Figura 22- Interpretação gráfica do método Mamdani.....	68
Figura 23- Estrutura do sistema inteligente de irrigação (Fuzzy-VRI)	70
Figura 24- Imagens gerada pela web-ferramenta i-ekbase.....	72
Figura 25- Estrutura do sistema fuzzy	75
Figura 26- Conjunto fuzzy para a Temperatura do Dossel	77
Figura 27- Conjunto fuzzy para o SAVI.....	77
Figura 28- Conjunto fuzzy para a Umidade próxima ao solo	78

Figura 29- Conjunto fuzzy para o Índice de Nitrogênio	78
Figura 30- Conjunto fuzzy para a Temperatura do Dossel	79
Figura 31- Conjunto fuzzy para a Umidade próxima ao solo	79
Figura 32- Conjunto fuzzy para o SAVI.....	79
Figura 33- Conjunto fuzzy para o Índice de Nitrogênio	79
Figura 34- Conjunto fuzzy de saída para Velocidade de giro do pivô central instalado na fazenda comercial em Mato Grosso	80
Figura 35- Conjunto fuzzy de saída para Velocidade de giro do pivô central instalado na área experimental no Nebraska, EUA.....	81
Figura 36- Conjunto fuzzy de saída para controle das Válvulas do pivô central instalado na fazenda comercial em Mato Grosso	82
Figura 37- Conjunto fuzzy de saída para controle das Válvulas do pivô central instalado na área experimental no Nebraska, EUA.....	82
Figura 38- Sistema Fuzzy Mamdani	85
Figura 39- Área de estudo localizado no município de Ipiranga do Norte/MT	88
Figura 40- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	92
Figura 41- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	93
Figura 42- Velocidade média de giro por fatia	93
Figura 43- Abertura proporcional das válvulas solenoides	94
Figura 44- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	94
Figura 45- Abertura proporcional das válvulas solenoides	95
Figura 46- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	96
Figura 47- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	97
Figura 48- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimados por cada modelo	98
Figura 49- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	99
Figura 50- Abertura proporcional das válvulas solenoides	100
Figura 51- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	100
Figura 52- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	101
Figura 53- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimado por cada modelo	102
Figura 54- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	103
Figura 55- Abertura proporcional das válvulas solenoides	103
Figura 56- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	104
Figura 57- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	105
Figura 58- Comparação entre os volumes irrigados estimados por cada modelo por faixa.....	106
Figura 59- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	106

Figura 60- Abertura proporcional das válvulas solenoides	107
Figura 61- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação	108
Figura 62- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	109
Figura 63- Comparação entre os volumes irrigados estimados por cada modelo por faixa.....	110
Figura 64- a) Velocidade de giro do pivô central para dia 06 de agosto; b) Velocidade média de giro por fatia para o dia 06 de agosto	111
Figura 65- a) Velocidade de giro do pivô central para dia 14 de agosto; b) Velocidade média de giro por fatia para dia 14 de agosto	111
Figura 66- Abertura proporcional das válvulas solenoides para o dia 06 de agosto	112
Figura 67- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação para o dia 06 de agosto	112
Figura 68- Abertura proporcional das válvulas solenoides para o dia 14 de agosto	113
Figura 69- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação para o dia 14/08 ...	114
Figura 70- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo para o dia 06 de agosto	114
Figura 71- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo para o dia 14 de agosto	115
Figura 72- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	116
Figura 73- Abertura proporcional das válvulas solenoides	117
Figura 74- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	118
Figura 75- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	119
Figura 76- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	120
Figura 77- Abertura proporcional das válvulas solenoides	121
Figura 78- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	122
Figura 79- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	123
Figura 80- Área de estudo localizado na região de Brule, Nebraska, EUA.....	125
Figura 81- Área de plantio em Brule com as regiões de gerenciamento de irrigação.....	126
Figura 82- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	129
Figura 83- Abertura proporcional das válvulas solenoides	130
Figura 84- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	131
Figura 85- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	132
Figura 86- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimado por cada modelo	133
Figura 87- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	134
Figura 88- Abertura proporcional das válvulas solenoides	135
Figura 89- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	135
Figura 90- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	136
Figura 91- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	137
Figura 92- Abertura proporcional das válvulas solenoides	137

Figura 93- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	138
Figura 94- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	139
Figura 95- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	140
Figura 96- Abertura proporcional das válvulas solenoides	141
Figura 97- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	141
Figura 98- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	142
Figura 99- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	143
Figura 100- Abertura proporcional das válvulas solenoides	143
Figura 101- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	144
Figura 102- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	145
Figura 103- Imagem de satélite da temperatura de dossel na data de 19/agosto.....	145
Figura 104- Imagem de satélite da temperatura de dossel na data de 11/agosto.....	146
Figura 105- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	147
Figura 106- Abertura proporcional das válvulas solenoides	148
Figura 107- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	148
Figura 108- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	149
Figura 109- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	151
Figura 110- Abertura proporcional das válvulas solenoides	152
Figura 111- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	152
Figura 112- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	153
Figura 113- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia.....	154
Figura 114- Abertura proporcional das válvulas solenoides	155
Figura 115- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação.....	155
Figura 116- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de sensoriamento remoto disponíveis na web-ferramenta i-ekbase	56
Tabela 2 - Dados exportados pela web-ferramenta i-ekbase*	73
Tabela 3 - Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada para fazenda comercial.....	77
Tabela 4 - Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada para campo experimental em Brule, EUA.....	78
Tabela 5 - Implicação das variáveis de entrada para controle da velocidade e das válvulas	83
Tabela 6 - Datas dos eventos de irrigação programadas para área de Ipiranga do Norte/MT-Brasil	88
Tabela 7 - Datas das imagens de satélite disponibilizadas e as datas dos dados locais.....	90
Tabela 8 - Datas de evento de irrigação e volume aplicado em Brule	127
Tabela 9 - Datas das imagens de fornecidos pelo sistema i-ekbase e os dados locais	127
Tabela 10 - Distribuição das datas analisadas pelo sistema Fuzzy-VRI	128
Tabela 11 - Modificação ou ajuste dos parâmetros das funções de pertinência.....	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

mm	–	milímetro
cm	–	centímetro
km	–	quilômetro
ha	–	hectare
rpm	–	rotações por minuto
ANFAVEA	–	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
bh	–	balanço hídrico
Cc	–	Capacidade de campo
CSV	–	<i>Comma Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
CoA	–	<i>Center of Area</i> (Centro da Área)
CoS	–	<i>Center of Sums</i> (Centro da Soma)
CBAP	–	Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão
DTA	–	Disponibilidade Total de Água
DM	–	<i>Decision Making</i> (Tomada de Decisão)
ETpc	–	Evapotranspiração potencial da cultura
ETo	–	Evapotranspiração máxima da cultura
ETca	–	Evapotranspiração máxima da cultura acumulada
ECa	–	Condutividade Elétrica do solo
FAO	–	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GNSS	–	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema de Navegação Global por Satélite)
GIS	–	<i>Geographical Information Systems</i> (Sistema de Informação Geográfica)
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IA	–	Inteligência Artificial
i-ekbase	–	<i>Intelligent Environmental Knowledgebase</i>

ITN	– Irrigação Total Necessária
ICID	– Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem
K_C	– Coeficiente de cultura
LEPA	– <i>Low Energy Precision Application</i> (Aplicação de Precisão por Baixa Energia)
MAPA	– Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NDVI	– <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada)
Pm	– Ponto de murchamento
SAVI	– <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo)
SIG	– Sistema de Informação Geográfica
SGBD	– Sistema Gerenciador de Banco de Dados
TRF	– Turno de rega fixo
TDR	– <i>Time-Domain Reflectometry</i>
TS	– modelo Takagi-Sugeno
USDA	– <i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura dos EUA)
VRI	– <i>Variable Rate Irrigation</i> (Irrigação por Taxa Variável)

SUMÁRIO

1. Introdução.....	18
1.1 Objetivos da pesquisa.....	21
1.2 Organização do Trabalho	22
2. Revisão da literatura.....	24
2.1 Irrigação de Precisão	24
2.1.1 Irrigação à Taxa Variável.....	24
2.2 Sensoriamento Remoto	29
2.3 Sistemas Especialistas.....	31
2.4 Fuzzy Aplicado à Irrigação por Taxa Variável	33
3. Referencial teórico.....	36
3.1 Sistemas de Irrigação Inteligente	36
3.1.1 Subsistema de Aplicação.....	36
3.2 Pivô Central.....	37
3.2.1 Funcionamento.....	39
3.2.2 Lâmina Aplicada por Volta do Pivô.....	41
3.2.3 Determinação do Intervalo de Irrigação.....	41
3.3 Estratégias de Manejo de Irrigação	42
3.3.1 Relação Solo-Planta-Atmosfera	43
3.3.2 Solo	44
3.3.2.1 Determinação da Umidade do Solo.....	45
3.3.2.2 Disponibilidade de Água no Solo.....	45
3.3.2.3 Capacidade de Campo - Cc	47
3.3.2.4 Ponto de Murchamento - Pm.....	47
3.3.2.5 Cálculo da Água Disponível no Solo	48
3.3.3 Atmosfera ou Clima	49
3.3.3.1 Evapotranspiração	50
3.3.3.2 Determinação da Evapotranspiração	50
3.3.4 Planta.....	52
3.3.4.1 Duração do Ciclo das Culturas.....	52
3.3.4.2 Coeficiente de Cultura (<i>Kc</i>).....	53
3.3.4.3 Índices de Vegetação.....	54

3.4 Sensoriamento Remoto	55
3.4.1 SAVI – <i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>	56
3.4.2 Temperatura do dossel – <i>Canopy temperature</i>	57
3.4.3 Umidade próxima ao solo	58
3.4.4 Índice de Nitrogênio	60
3.5 Fuzzy	61
3.5.1 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	61
3.5.2 Funções de Pertinência <i>Fuzzy</i>	62
3.5.3 Sistemas <i>Fuzzy</i>	63
3.5.4 Base de Regras	64
3.5.5 Fuzzificação	65
3.5.6 Sistema de Inferência	66
3.5.7 Defuzzificação.....	66
3.5.8 Método de Inferência Mamdani	67
3.6 Comentários e Conclusão do Capítulo	68
4. Metodologia	70
4.1 Parcerias estabelecidas	71
4.2 Imagens de satélites.....	72
4.3 Análise dos dados.....	72
4.4 Dados selecionados	73
4.5 Sistema Fuzzy	74
4.5.1 Fuzzificação.....	75
4.5.2 Base de conhecimentos.....	76
4.5.2.1 Base de dados das variáveis de entrada da fazenda comercial.....	77
4.5.2.2 Base de dados das variáveis de entrada do laboratório de campo em Brule, EUA	78
4.5.2.3 Base de dados das variáveis de saída	79
4.5.2.3.1 Base dados para Velocidade de giro.....	80
4.5.2.3.2 Base de dados para Abertura das válvulas aspersoras	81
4.5.3 Base de Regras	83
4.5.4 Inferência Fuzzy.....	84
4.5.5 Defuzzificação	86
4.6 Considerações Finais do Capítulo	86
5. Experimentos e resultados.....	87
5.1 Ipiranga do Norte – Mato Grosso, Brasil	87
5.1.1 Datas amostradas.....	87
5.1.2 Resultados para imagens do dia 17 de junho de 2018.....	91

5.1.3 Resultados para imagens do dia 27 de junho de 2018.....	98
5.1.4 Resultados para imagens do dia 05 de julho de 2018.....	102
5.1.5 Resultados para imagens do dia 29 de julho de 2018.....	106
5.1.6 Resultados para imagens dos dias 06 e 14 de agosto de 2018.....	110
5.1.7 Resultados para imagens do dia 22 de agosto de 2018	115
5.1.8 Resultados para imagens do dia 27 de agosto de 2018	120
5.1.9 Discussão sobre estudo de caso em Ipiranga do Norte, MT, Brasil	123
5.2 Brule – Nebraska, EUA.....	124
5.2.1 Datas amostradas.....	126
5.2.2 Resultados para imagens do dia 24 de junho de 2016.....	129
5.2.3 Resultados para imagens do dia 10 de julho de 2016.....	134
5.2.4 Resultados para imagens do dia 26 de julho de 2016.....	137
5.2.5 Resultados para imagens do dia 11 de agosto de 2016	139
5.2.6 Resultados para imagens do dia 19 de agosto de 2016	143
5.2.7 Resultados para imagens do dia 12 de setembro de 2016	146
5.2.8 Resultados para imagens do dia 20 de setembro de 2016	154
5.2.9 Discussão sobre estudo de caso em Brule, NE, EUA.....	156
6. Conclusões, contribuições e perspectivas	158
6.1 Avaliação geral	158
6.2 Avaliação específica.....	160
6.3 Propostas para trabalhos futuros	161
Referências bibliográficas.....	163
APÊNDICE A	181
APÊNDICE B	185
APÊNDICE C	186

Capítulo 1

1. Introdução

A disponibilidade de água doce é uma das condições elementares para a vida na Terra. No entanto, a água é um recurso limitado, que está sob uma pressão sem precedentes devido ao crescimento populacional global e às alterações meteorológicas. A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – (FAO) *Food and Agriculture Organization*, estima que, a fim de atender à demanda por alimentos em 2050, seria necessário pelo menos duplicar, se não triplicar a produção agrícola, e cerca de 80 por cento do aumento necessário precisaria vir do aumento da produção (FAO, 2016). Será possível alcançar essa meta com os recursos limitados?

A irrigação é uma alternativa. A agricultura irrigada é uma tecnologia imprescindível no processo de aumento da produção de bens agrícolas, sendo a sua adoção dependente da disponibilidade hídrica de cada região. Há muitos benefícios quando os agricultores passam a utilizar a técnica da irrigação. E se realizada no momento correto e com a aplicação da quantidade certa de água, permite a obtenção de índices de produtividade acima das médias das culturas cultivadas na condição de sequeiro, ou seja, quando esta cresce somente com a água da chuva (TESTEZLAF, 2017).

Em uma escala global, a agricultura irrigada é um dos setores que mais consomem água doce (WWAP, 2014). Esse consumo de água para irrigação pode chegar a 90.000 litros/hectares por dia (SNSA, 2016), fica fácil entender a importância da busca por metodologias mais eficientes para sistemas de irrigação.

De acordo com Christofidis (2005), a adoção da agricultura irrigada possibilita o aumento da produtividade e uma diversificação das culturas agrícolas. Entretanto, há uma limitação cada vez maior dos recursos hídricos e, desse modo, a utilização da água na agricultura precisa ser mais eficiente, visando à manutenção dos níveis atuais de produtividade, aliada à expansão da área irrigada.

As questões mencionadas justificam a necessidade de um uso sustentável e racional da água em lavouras irrigadas, o que motiva a implementação de novas tecnologias de irrigação inteligentes, automatizadas e mais precisas. Os desafios à frente são

substanciais: mudanças climáticas, descarbonização da economia, sistemas integrados para aumentar eficiência, uso racional da água, sistemas que permitam usar insumos de forma inteligente e, por fim, aumento da produção de alimentos para atender ao crescimento da população mundial nos próximos quarenta anos.

Quando se fala em práticas mais eficientes um exemplo é a agricultura de precisão, que consiste em um mapeamento da variabilidade da colheita, identificando as características do solo e planta para que seja possível controlar eficientemente a aplicação de insumos. Em 2012, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), ao instituir a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), concorda que a agricultura de precisão é um sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial do campo, com o objetivo de obter um resultado sustentável social, econômico e ambiental (BRASIL, 2012).

Inovações recentes em tecnologias de sensores e redes de comunicação de dados sem fio, em conjunto com avanços nas tecnologias de aplicativos móveis, oferecem oportunidades para o desenvolvimento de ferramentas de gerenciamento e sistemas de suporte a decisões para ajudar o setor agrícola a melhorar a eficiência e a produtividade da irrigação (EVANS e SADLER, 2013; SMITH et al., 2010).

Balastreire (2000), Brase (2005) e Srinivasan (2006) afirmam que o termo pode ser usado em tudo que se refere à atividade realizada com maior precisão por meio de sistemas eletrônicos; porém, fazem uma ressalva quanto às aplicações de insumos de forma uniforme, o que ainda seriam apenas sistemas convencionais e não tratariam com as variabilidades espaciais das plantações.

Nos últimos anos, a tecnologia de irrigação por taxa variável (*Variable Rate Irrigation - VRI*) foi desenvolvida comercialmente para controlar a velocidade de deslocamento do pivô central, o aspersor individual ou os bancos de aspersores para aplicar água de maneira diferenciada a cada zona de gerenciamento (EVANS et al., 2013). A gestão de culturas por regiões ou zonas específicas, dentro de uma mesma área de plantio, refere-se a um sistema agrícola com um novo conceito multidisciplinar, baseado numa abordagem de sistemas especialistas para resolução de problemas.

Há um interesse crescente nos benefícios potenciais que as novas tecnologias podem proporcionar na melhoria da eficiência hídrica, energética e na produtividade das culturas (DACCACHE et al., 2015). Embora a água seja um dos principais componentes de produção a afetar a produtividade das culturas, sua variabilidade dentro da área irrigada

é frequentemente ignorada, o que soma às preocupações com a degradação ambiental, faz com que as formas de se gerenciar esse insumo de modo eficiente sejam alvo de fortes estudos (DUKE et al.; 1992).

Para ser eficaz, um sistema de apoio à decisão para irrigação requer o desenvolvimento de um sistema de informação com base na demanda dos recursos hídricos de cada cultura e que deve reunir dados de diferentes elementos tais como hidrologia, meteorologia, tipo de agricultura e solo para que se tomem decisões corretas e precisas possíveis sobre quanto, quando e onde irrigar (McCARTHY et al., 2013). Técnicas computacionais vêm sendo aplicadas cada vez mais na resolução desse tipo de problema, entretanto, ainda existem barreiras a serem superadas, principalmente quanto à dificuldade em agregar o conhecimento de especialistas a um modelo matemático computacionalmente viável, sem esquecer outro grande inconveniente: a necessidade de grandes quantidades de dados (NEVO et al., 1994).

Procedimentos utilizados para o desenvolvimento e a aplicação de sistemas com metodologias clássicas de decisão não são triviais. Por outro lado, um operador humano experiente pode frequentemente gerir o sistema de irrigação de forma eficiente simplesmente usando os dedos como os sensores e decidir o momento para a irrigação. Neste contexto, são necessárias as novas abordagens tecnológicas para que se possa alcançar uma maior efetividade nas fases de tomada de decisão envolvidas na gestão dos recursos hídricos a fim de otimizar seu uso.

Nesse panorama, as ferramentas com representação do conhecimento e raciocínio sob imprecisão são uma alternativa viável. O uso de técnicas de inteligência artificial (IA) para agricultura irrigada é uma possibilidade promissora, e os resultados relatados na literatura mostram que o uso dessa tecnologia pode ter um grande impacto na melhoria dos sistemas de irrigação por taxa variável (ROMERO et al., 2012).

Uma elegante abordagem para lidar com representação do conhecimento e raciocínio sob imprecisão é a teoria *fuzzy*. Desde que o artigo "*Fuzzy Sets*" de Lofti A. Zadeh foi publicado em 1965, a teoria dos conjuntos *fuzzy* tem sido considerada uma boa alternativa para representar modelos de decisão mais realistas.

A teoria do conjunto *fuzzy* oferece instrumentos adequados para modelar e lidar com regras de especialistas. Ao representar variáveis linguísticas em forma de conjuntos *fuzzy*, foi possível transformar o conhecimento em termos matemáticos (ROMMELFANGER, 1999). Portanto, o uso de conjuntos *fuzzy* ajudaria os usuários a

entender os princípios básicos do conhecimento especializado com mais facilidade, e isso é um fator essencial para a aceitação de um sistema especialista bem-sucedido.

Pelas razões já mencionadas, é necessário chamar a atenção para o uso cuidadoso e eficiente da água na agricultura. Essa atenção demanda novas tecnologias, porém, percebe-se que na literatura há uma carência de pesquisas sobre o uso das técnicas de irrigação de precisão conectadas por meio de técnicas de inteligência artificial ao controle central de um sistema de irrigação, em particular o pivô central.

Assim este trabalho se insere preenchendo essa lacuna. Com uma abordagem mais prática e seu resultado é inovador.

1.1 Objetivos da pesquisa

Diante dos cenários vistos, é apresentado o desenvolvimento um sistema especialista para pivôs centrais capaz de auxiliar na decisão sobre lâmina a ser aplicada considerando a variabilidade (espacial e temporal) e buscando, assim, melhorar a eficiência da irrigação. Dessa forma, o foco deste trabalho é destacar os aspectos positivos do uso dessa tecnologia para ampliar o espectro de metodologias aplicadas em irrigação em taxa variável, e assim num futuro próximo tornar essa ferramenta indispensável para uma agricultura sustentável.

Isto foi alcançado através dos seguintes objetivos específicos:

1º Estabelecimento de uma relação entre os elementos que compõe um sistema de irrigação e um sistema fuzzy

Para entender o papel e a importância que cada parte tem no todo, um estudo criterioso de referenciais teóricos foi realizado. Assim, é possível criar uma relação entre o desenvolvimento da plantação e funcionamento do equipamento de aplicação (pivô central). Todos esses elementos deverão ser incorporados à um sistema *fuzzy*. A escolha desse estudo com foco no equipamento se deve ao fato de que muitas propostas de sistemas inteligentes são focadas na determinação do volume a ser irrigado e não no controle do pivô central.

2º Reunindo informações práticas de cada etapa de construção do sistema

O desenvolvimento de algoritmos de análises em imagens de satélites não é foco deste trabalho, assim, as informações de sensoriamento foram adquiridas através do estabelecimento de parceria com uma empresa especializada. Da mesma maneira, as

especificações e as formas operacionais do equipamento pivô central foram conseguidas por meio de parceria com uma indústria brasileira de pivô central.

Devido à escolha do uso de sistema fuzzy, a interpretação e os conhecimentos sobre a área de irrigação contaram com a contribuição do professor Dr. Derek M. Heern, da Universidade Nebraska.

3° Desenvolvendo do sistema de inferência fuzzy

Os mapas de controle através da lógica fuzzy é o conteúdo diferencial em relação aos demais sistemas encontrados no mercado. Dessa forma, esse mapa de controle possui dois setpoints, o primeiro estabelece os valores de referência para variação da velocidade e o outro estabelece os valores de referência para abertura proporcional da válvula do aspersor. A introdução da inferência fuzzy tem o objetivo de auxiliar as complexas interações entre máquina e homem, tornando o processo de controle mais amigável.

4° Comparando o sistema desenvolvido com outros métodos clássicos de irrigação

Para atingir o quarto objetivo, a aplicação da tecnologia VRI foi comparada com dois casos reais de sistemas de irrigação. Porém devido a diferenças metodológicas entre os trabalhos, a comparação se dará apenas de forma analítica aos resultados. Uma vez que este trabalho não realizou testes práticos em campo. Desta forma o estudo pretende mostrar que os resultados simulados podem alcançar os níveis de irrigação praticados pelos outros tipos de metodologias. Para examinar o desempenho do sistema, foi simulada a quantidade de água aplicada nos dois tratamentos de irrigação – o volume irrigado.

1.2 Organização do Trabalho

Para uma melhor compreensão, este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Inicialmente, tem-se a introdução, que traz como motivação do trabalho os diversos aspectos que caracterizam dificuldades na área de sistemas de controle para irrigação de precisão.

No capítulo 2, é contextualizada a pesquisa, detalhando-se os principais estudos já realizados no que diz respeito a técnicas de inteligência artificial empregada para o manejo da irrigação por irrigadores do tipo pivô central.

No capítulo 3 é descritos os diversos enfoques teóricos que constituem a fundamentação teórica da pesquisa. Primeiramente, apresenta os principais conceitos

relacionados ao entendimento dos aspectos agronômicos deste trabalho, descrevendo quais as necessidades hídricas das plantações do setor agrícola. Explica, brevemente, a relação solo / água / clima / planta, discorrendo sobre sensoriamento remoto e sistemas de informação georreferenciadas.

Ainda são contemplados nesse capítulo os conceitos de agricultura de precisão, irrigação por taxa variável e criação dos mapas de prescrição de irrigação. Também, foram considerados especificações de alguns elementos de construção de um pivô central e as formas de manejo da irrigação por meio desse tipo de equipamento. E por fim, o referencial teórico apresentará uma breve descrição dos principais conceitos relacionados ao entendimento da lógica *fuzzy* aplicada na criação do mapa de controle para pivô central.

No capítulo 4, é abordada a metodologia utilizada para adaptar os dados do sensoriamento remoto e a forma como serão utilizados para inferir os valores de referência para o sistema de controle de velocidade e controle da abertura das válvulas dos aspersores dos pivôs centrais.

O capítulo 5 trata dos resultados obtidos com o desenvolvimento do *Fuzzy-VRI* e mostrará a capacidade de estabelecer o controle de zonas irrigáveis por meio de *setpoints* de velocidade e de abertura das válvulas dos aspersores para um pivô central usando apenas dados de sensoriamento remoto. O sistema inteligente de suporte à decisão desenvolvido foi comparado com dois estudos de casos. O primeiro estudo de caso é em uma fazenda comercial, localizada próximo da cidade de Ipiranga do Norte, no estado do Mato Grosso, Brasil, com uma área de aproximadamente 100 hectares. O outro caso a ser analisado é o laboratório de campo de recursos hídricos da Universidade de Nebraska, Lincoln, localizado perto da cidade de Brule, no estado do Nebraska, EUA, com uma área de aproximadamente 50 hectares.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas considerações sobre a metodologia desenvolvida e observações obtidas dos resultados, assim como proposições para continuação de estudos e pesquisas nessa área.

Capítulo 2

2. Revisão da literatura

No conceito antigo, a irrigação era vista como uma técnica que visava promover, basicamente, a luta contra a seca. Em uma visão mais atual, dentro do foco empresarial do agronegócio, a irrigação é uma estratégia para elevar a rentabilidade da propriedade agrícola por meio do aumento da produtividade de forma sustentável e com maior geração de emprego e renda (BERNARDO et al., 2006, SETTI et al., 2001).

Ao longo dos anos, os sistemas de irrigação têm passado por aperfeiçoamentos tecnológicos e se tornado confiáveis, de simples operação, reduzindo o desperdício de água e energia elétrica. O uso de um sistema de controle inteligente para irrigação de precisão implicará na utilização eficiente dos recursos hídricos com redução do consumo de energia elétrica, assim reduzindo os impactos ambientais.

2.1 Irrigação de Precisão

A irrigação de precisão é considerada uma abordagem revolucionária para a melhoria da gestão de recursos para o desenvolvimento agrícola sustentável e é uma tecnologia promissora para gestão de áreas ou zonas específicas de acordo com as condições locais. Podendo ser considerada uma ferramenta gerencial que auxilia na coleta de informações e na interpretação dos resultados que ajudarão na tomada de decisão sobre a quantidade, localidade e temporalidade da água que é usada nas culturas. A irrigação de precisão refere-se a gerenciar a irrigação em zonas específicas dentro de uma mesma área plantada.

2.1.1 Irrigação à Taxa Variável

A tecnologia de irrigação por taxa variável – *Variable Rate Irrigation (VRI)* - é uma ferramenta de gerenciamento de zonas em uma área de plantio utilizada para aplicar a

quantidade ideal de água com base nos fatores de variabilidade de campo. A Figura 01 ilustra uma forma de divisão em áreas específicas.



Figura 1- Variabilidade espacial para necessidades hídricas de irrigação
Fonte: Valley, 2017

Existem duas abordagens para o gerenciamento do VRI: uma baseada em mapas e outra baseada em sensores (KRISHNA, 2013). O método baseado em mapas utiliza ferramentas tecnológicas de sensoriamento remoto, GNSS (*Global Navigation Satellite System*), monitoramento de rendimento e amostragem de solo. A abordagem baseada em sensor utiliza sensores "em movimento" para detectar a variabilidade do solo em tempo real; as medições feitas pelos sensores são enviada ao controlador central, que por sua vez controlam a quantidade aplicada pelo equipamento de taxa variável (ZHANG et al. 2002). A integração desses mapas através do GIS (*Geographical Information Systems*) cria bancos de dados espaciais usando mapas de produtividade, amostragem de solo, imagens de sensoriamento remoto e outros sensores.

A análise da variação temporal e espacial por meio da geoestatística pode ser usada para criar modelos de culturas e mapas de tratamento, e pode ser definida por elementos como solos, tipo de cultura, pragas, climas e outros elementos necessários para uma gerência eficiente (Figura 02).

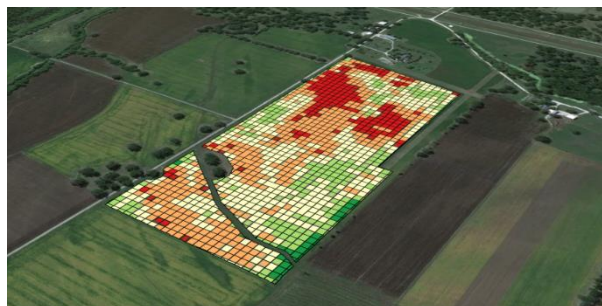


Figura 2- Diferentes zonas de manejo dentro da mesma área de plantio
Fonte: Agricultura de precisão, 2017

Assim, para que isso seja possível, utiliza-se de informações e tecnologia para extrair a variabilidade de campo e assim tomar decisões de gerenciamento. O interesse pelo gerenciamento de irrigação em locais específicos vem crescendo de forma expressiva em resposta à comercialização bem-sucedida de outras tecnologias de irrigação. Irrigação de precisão pode ser dividida em três componentes principais: informações, sistemas de suporte a decisões e equipamentos de aplicação (GRISSE et al., 2009).

As informações constituem o núcleo, pois são coletadas usando várias tecnologias, como, por exemplo, sensoriamento remoto, sistema de navegação global (GNSS) e sensores, entre outros. O gerenciamento de informações é importante, pois uma quantidade enorme de dados é coletada e precisa ser manipulada por meio de processos de suporte à decisão (Figura 03) (STAFFORD 2006).

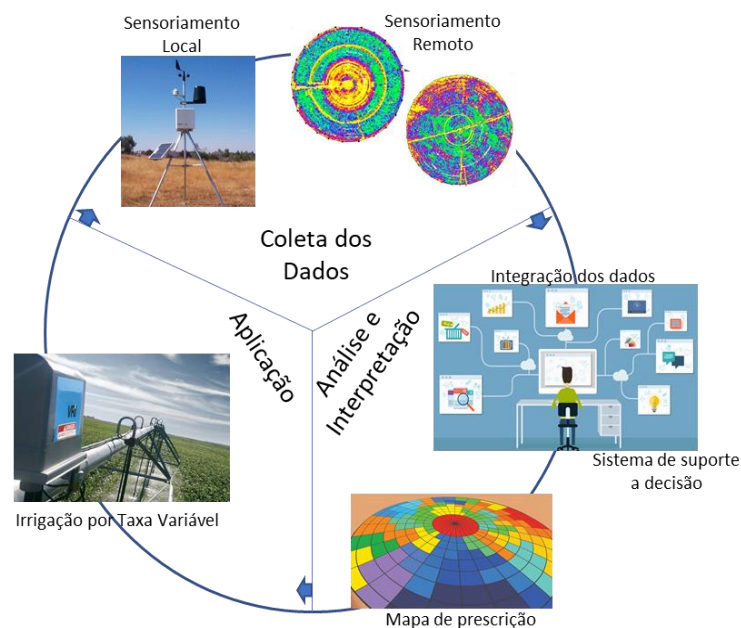


Figura 3- O ciclo VRI com seus componentes de informações, suporte a decisões e tecnologia

Fonte: Adaptado de Stafford (2006)

O início do ciclo é a coleta de dados na resolução temporal e espacial apropriada. Na etapa de coleta de dados é armazenado as informações da variabilidade do solo, imagens de sensoriamento remoto, dados de rendimento, e outros. A integração e a análise de dados levam à criação de opções de gerenciamento, tais como desenvolvimento de prescrição da irrigação ou de qualquer outro insumo necessário para aumentar a produção, essa é a fase de interpretação. Na última etapa de aplicação é onde se implementa as

opções de gerenciamento que foram determinadas na fase anterior (STAFFORD, 2006, KRISHNA, 2013).

Em alguns casos, softwares fornecem mapas de prescrição para irrigação, e a partir desses mapas é possível construir sistemas de controle que podem mudar a velocidade de deslocamento do pivô para alterar a taxa de aplicação em cada setor ou zona, ou podem variar as taxas de abertura das válvulas solenoides elétricos (Figura 04) (GRISSO et al., 2009).

As abordagens de aplicação ou irrigação em locais específicos do local foram iniciadas no início dos anos 1990 por meio de sistemas de irrigação por pivô central modificados para aplicar água e nitrogênio, e assim alcançar a profundidade de aplicação desejada. O controle de zona permite que o sistema de irrigação por pivô central use aspersores individuais ou grupos para alterar a taxa de aplicação de aspersores em qualquer zona.

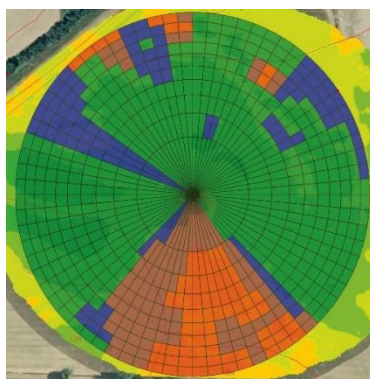


Figura 4- Mapa de prescrição para irrigação por taxa variável
Fonte: Valley, 2017

Os sistemas de irrigação por pivô central possuem um alto nível de automação e controle de sistemas, quando comparado com outros tipos de sistemas de irrigação, dessa forma tornando-os candidatos ideais para implementação da tecnologia *VRI*. Então, foram modificados para que fosse possível controlar a velocidade de giro lateral e a taxa de fluxo do aspersor para aplicar a água ou outro insumo de acordo com a variabilidade do campo (DUKE et al., 1992; FRAISSE et al. 1993; SADLER, et al., 1996; CAMP e SADLER, 1994; CAMP et al., 1996; OMARY et al., 1996; KING e KINCAID, 2004; O'SHAUGHNESSY, et al., 2015).

No início do século XXI, a ênfase da pesquisa se estendeu à avaliação e demonstração de desempenho do *VRI*, e pesquisas adicionais também foram realizadas a

fim de avaliar o desempenho da tecnologia. Ademais, vários aspectos do VRI foram investigados nas últimas duas décadas, quando máquinas de irrigação em movimento contínuo foram modificadas para aplicação variável de água e produtos químicos em campo (STARK et al., 1993; FRAISSE, et al., 1993; DUKE, et al., 1992).

Em 2003, um sistema VRI foi comparado com o sistema não-VRI para entender o efeito da aplicação de taxa variável na uniformidade da irrigação (PERRY et al., 2003). O sistema VRI usou o GNSS para coordenar a posição do sistema de irrigação, e um software específico para PC de mesa foi desenvolvido para gerar um mapa prescritivo para o VRI. O resultado de experimentos de campo indicou que a tecnologia VRI tinha uma uniformidade tão boa quanto o sistema não-VRI.

Outros trabalhos como o desenvolvido na Universidade de Southern Queensland (McCARTHY et al., 2011) se concentraram no desenvolvimento de uma estrutura de simulação (VARIwise) para avaliação e gerenciamento de estratégias de controle de irrigação específicas do local. O VARIwise tem a capacidade de gerar e implementar estratégias de gerenciamento de área específica usando bancos de dados espaciais e módulos de simulação.

A VRI ajuda a mitigar os problemas de umidade e nutrientes do solo, levando em consideração a variabilidade na quantidade de água a ser aplicada a cada área do campo (SADLER et al., 2005). O gerenciamento específico do local é amplo em dados e tecnologia, o que permite aos agricultores tomarem decisões mais acertadas sobre o gerenciamento da água (KRISHNA, 2013). Evidências de estudos de VRI apoiaram que uma economia de água de até 50% foi alcançada nas áreas de estudo (SADLER et al., 2005; HEDLEY e YULE, 2009; SMITH et al., 2010).

Existe um potencial para o VRI ajudar na melhoria da eficiência na irrigação e no aproveitamento dos recursos, o que é crucial para o aumento da produção. Porém, existe uma grande barreira à adoção: o custo inicial de compra de equipamentos e controladores adicionais necessários para o VRI (Lu et al., 2005). Quanto maiores os níveis de gerenciamento, maior a complexidade da tecnologia VRI e maiores ainda serão os custos (Figura 05).

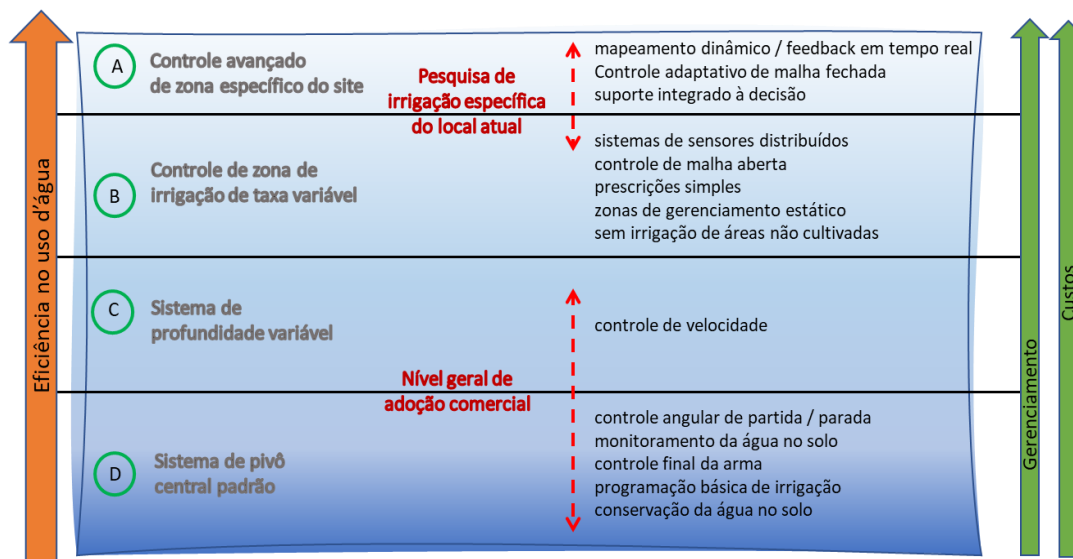


Figura 5- Representação conceitual do estado da arte e a capacidade relativa de vários elementos e tecnologias de irrigação para aumentar a produtividade da água

Fonte: Adaptado de Evans et al. (2013)

A maior parte das pesquisas sobre o tema, atualmente, estão na região A e na parte superior da Região B, onde é encontrada as pesquisas de ponta e os principais desafios científicos. No entanto, a zona inferior da Região B, mais a Região C e a Região D é onde a indústria e os produtores estão operando, o que mostra uma lacuna significativa na implementação das pesquisas de ponta (EVANS et al., 2013). Para considerar o efeito global positivo de todos esses fatores a fim de aumentar a produtividade e obter maior eficiência no uso da água, é preciso não só ter o conhecimento atualizado, mas também diminuir as distâncias entre o que se pesquisa e o que se aplica.

2.2 Sensoriamento Remoto

Todo o fundamento do sensoriamento remoto está na interação da energia eletromagnética com a matéria que constitui os objetos (D'ARCO et al., 2003). Dessa forma, é possível obter informações sobre uma área por meio da análise de dados adquiridos por um sensor que não está em contato direto com a área investigação (LILLESSAND e KIEFER, 1994; MOLIN, 1997).

Os dados do sensoriamento podem ser usados para medir com a devida precisão as quantidades que definem a variabilidade espacial de uma cultura (STEVEN, 2004;

YOUNAN e KING, 1999), e essas informações obtidas podem ser usadas para melhorar a qualidade das culturas e monitorar a irrigação, os processos de fertilização e o manejo de plantas daninhas. As tecnologias de sensoriamento remoto são cada vez mais usadas nas aplicações agrícolas de precisão, e algumas podem ser abordadas, com destaque para: (a) a estimativa da biomassa e a produtividade da cultura; (b) o monitoramento de estresse hídrico e do vigor nas plantas e (c) a avaliação do estágio fenológico (SHIRATSUCHI et al., 2011; FACCO et al., 2012; JOHANN et al., 2012; VICTORIA et al., 2012; VICENTE et al., 2012).

As refletâncias ópticas no vermelho e no infravermelho próximo (0,4 a 12,5 μm) são usadas para estimar os índices de vegetação diretamente relacionados aos diferentes parâmetros da cultura, como o coeficiente de cultura (K_c) usado na estimativa das necessidades de água na plantação. Muitos estudos (JACKSON et al., 1980; BAUSCH e NEALE, 1987; NEALE et al., 1989; CHOUDHURY et al., 1994; HUNSAKER et al., 2003; HUNSAKER et al., 2005; ER-RAKI et al., 2007; ER-RAKI et al., 2013; DIARRA et al., 2017) foram especificamente dedicados à estimativa de K_c a partir do Índice de Vegetação com Diferenças Normalizadas NDVI (ROUSE et al., 1974) e do Índice de Vegetação Ajustada ao Solo - SAVI (HUETE, 1988). O sensoriamento via satélite mostrou um grande potencial para o gerenciamento de irrigação em larga escala usando diferentes dados (ópticos, térmicos e radares) adquiridos de diferentes satélites.

O sensoriamento remoto por infravermelho tem sido usado em diversas aplicações, como por exemplo, estudos meteorológicos (HANSEN et al., 2010; KUSTAS e ANDERSON, 2009), monitoramento do consumo de água das culturas e detecção de estresse hídrico (BASTIAANSSEN et al., 1998; BOULET et al., 2007; OLIVERA-GUERRA et al., 2018), monitoramento de vegetação (KOGAN, 2001; WILLIAMSON, 1988) e estimativa de umidade do solo (AMAZIRH et al., 2018; MERLIN et al., 2010; SANDHOLT et al., 2002).

Já a temperatura do dossel é reconhecida há muito tempo como um bom indicador do status da água da lavoura e como uma boa ferramenta para a programação da irrigação. O fechamento estomático é uma das primeiras respostas ao estresse hídrico da planta que causa uma diminuição na transpiração da planta e, portanto, um aumento na temperatura da planta. Esse aumento de temperatura é um sinal de que a vegetação está passando por estresse hídrico, e o índice de estresse hídrico da colheita é frequentemente usado para

quantificar o estresse hídrico da colheita com base na temperatura da superfície do dossel (MORAN et al., 1994).

Esse cenário destacado neste capítulo demonstra que um vasto campo de estudos dentro do sensoriamento remoto vem sendo aberto e possui ainda grandes desafios principalmente em regiões tropicais, onde a limitação na aquisição de imagens, sistema de produção em plantio direto, custo de equipamentos e pessoal qualificado imperam na adoção destas tecnologias. E com a ajuda de programas de computador os especialistas vão analisar e interpretar esses dados para desenvolver opções de gerenciamento, fornecendo assim informações necessárias para que os agricultores tomem as melhores decisões para a sua fazenda.

2.3 Sistemas Especialistas

Em Henderson (2009), sistemas especialistas são sistemas computacionais que empregam um determinado conhecimento proveniente de especialistas no domínio do problema para apresentar conclusões ou resolver, emulando a habilidade de tomada de decisão de um especialista humano.

Para Dutta (2014), o desafio final de um sistema de apoio à decisão ambiental e agrícola esta em superar a incerteza associada à qualidade dos dados, validar os conhecimentos de forma automática e melhorar a eficiência do processo decisório. Muitas vezes o sistema sensorial e a integração dos modelos não refletem a fluidez natural do ambiente e criam limitações de desempenho significativas (VOINOV e SHUGART, 2013). E em muitos casos, sistemas de controle não refletem ou satisfazem os requisitos do usuário final, devido à falta de captura do conhecimento de domínio (McINTOSH et al., 2011).

Em situações de decisão real, um decisor – *Decision Making* (DM) – é muitas vezes confrontado com o problema de que as informações necessárias para a construção de um modelo de decisão clássico não estão disponíveis ou o custo para obtê-las é alto, o que pode levar o DM a trabalhar com um modelo que não seja uma imagem autêntica do problema real. Nevo et al. (1994) apontam que a complexidade e a não linearidade dos parâmetros de natureza agrícola e dos dados incertos são importantes e devem ser levados em consideração ao se desenvolver sistemas de suporte a decisão para agricultura. Um

plano de cultivo ótimo é difícil de alcançar devido ao grande número de fatores envolvidos e as complexas interações entre eles.

Mais recentemente, Andrade et al. (2015) desenvolveram um software (ARSmartPivot) como uma ferramenta de suporte à decisão a fim de facilitar as comunicações entre usuários, redes de sensores e sistema de irrigação para gerenciamento específico do local. Esse software conseguiu integrar os dados coletados para gerar um mapa de prescrição de irrigação. Trabalhos de pesquisa recentes foram expandidos a fim de incluir o uso do sistema de controle supervisão e aquisição de dados (SCADA) para integrar variáveis de campo espacial e temporal com o VRI e aumentar a eficiência do uso da água para aumentar a produtividade agrícola (CASANOVA et al., 2014; ANDRADE et al., 2015; BARTLETT et al., 2015; O'SHAUGHNESSY et al., 2015; HAGHVERDI et al., 2016).

As tecnologias VRI requerem um alto nível de gerenciamento, hardware e software avançados e mapas de prescrição para aplicar a água em um campo com base na variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, características da paisagem e condições das culturas (EVANS e SADLER, 2013).

Algumas empresas de irrigação (Valmont, Lindsay e Reinke) oferecem ao operador opções de controle de velocidade e zonas, que lhe permite alterar a profundidade da aplicação no setor radial para atingir a profundidade desejada em incrementos de 1° a 10° (EVANS et al., 2013). Técnicas computacionais vêm sendo aplicadas cada vez mais na resolução desse tipo de problemas, entretanto, ainda existem barreiras a serem superadas, principalmente quanto à dificuldade em agregar o conhecimento de especialistas a um modelo matemático computacionalmente viável. Sem esquecer um outro grande inconveniente: a necessidade de grandes quantidades de dados.

O conhecimento especializado normalmente não consiste apenas em teorias confirmadas; na verdade, é composto, em grande parte, de regras heurísticas que o especialista obedece durante as horas de tomada de decisão. As regras de especialistas são geralmente formuladas por termos linguísticos e, portanto, é difícil transformá-los em termos matemáticos clássicos ou aplicá-los ao processamento assistido por computador (ROMMELFANGER, 1999). Procedimentos utilizados para o desenvolvimento e a aplicação de sistemas com metodologias clássicas de decisão não são triviais e podem levar a becos sem saídas, com um elevado número de horas de trabalho para se alcançar um resultado satisfatório.

Dessa maneira, são necessárias novas abordagens tecnológicas para que se alcance uma maior efetividade nas fases de tomada de decisão envolvidas na gestão dos recursos hídricos a fim de melhorar seu uso. Para ser eficaz um sistema de apoio à decisão baseado em técnicas de conhecimento e de otimização requer o desenvolvimento de um sistema de informação com base na demanda dos recursos hídricos de cada cultura. Esse sistema de informação deverá reunir dados de diferentes elementos tais como hidrologia, meteorologia, tipo de agricultura e solo para que se tomem decisões mais corretas e precisas possíveis sobre quanto, quando e onde irrigar (McCARTHY et al., 2013).

O processo de tomada de decisão é inerente à humanidade, que diariamente encara situações em que se deve escolher entre diferentes alternativas através de raciocínio mental dos processos, e muitos desses problemas de decisão são pensados em ambientes incertos e com informações vagas e imprecisas. É nesse panorama que as ferramentas com representação do conhecimento e raciocínio sob imprecisão se apresentam como uma alternativa viável.

O uso de técnicas de IA para agricultura irrigada é uma possibilidade promissora, e os resultados relatados na literatura mostram que o uso dessas ferramentas pode ter um grande impacto na melhoria dos sistemas de irrigação e no uso eficiente dos recursos hídricos (ROMERO et al., 2012).

2.4 Fuzzy Aplicado à Irrigação por Taxa Variável

A lógica *fuzzy* não é nova para os sistemas agrícolas e biológicos, é possível encontrar resultados de sistemas *fuzzy* favoravelmente em comparação com aqueles de técnicas de modelagem tradicionais, em muitos artigos científicos. Um sistema de regra *fuzzy* é atraente para o controle de irrigação e pode ser adaptado e programado em microcontroladores comerciais.

A lógica *fuzzy* é atraente para uso como parte de um sistema inteligente de gerenciamento de irrigação (MATTAR et al., 2017). Esses autores, desenvolvem um modelo de lógica *fuzzy* para prever a taxa de infiltração de água sob irrigação por aspersão, e o modelo desenvolvido pode efetivamente estimar valores de taxa de infiltração da água usando o histórico de dados. As aplicações do sistema de lógica *fuzzy* têm sido usadas na estimativa da evapotranspiração de referência diária com menos parâmetros para o planejamento da irrigação (PAPAGEORGIOU et al., 2016). No

trabalho de Al-Faraj et al. (2001) é modelado um índice de estresse hídrico da cultura baseado em regras de lógica *fuzzy* e os resultados demonstraram que o sistema com 150 regras prediz a correta tendência de desenvolvimento do estresse hídrico, semelhante aos métodos teóricos empíricos e mais complexos.

Usar sistemas *fuzzy* para tomada de decisão, especialmente para irrigação, apresenta algumas vantagens. Uma delas é não necessitar de toda a quantidade de informação relevante (ZHANG et al., 2011), bastando apenas aquelas que desempenham o papel principal do cálculo da irrigação. Isso implica que, ao usar um método de tomada de decisão baseado em sistemas *fuzzy*, é possível simplificar as variáveis de entrada.

Raju e Kumar (2005) observaram que a integração da lógica *fuzzy* com problemas de planejamento de irrigação do mundo real é muito eficaz, particularmente com múltiplos especialistas em um ambiente de dados subjetivos. O sistema criado pelos autores foi considerado útil devido à sua natureza interativa, flexibilidade na abordagem e evolução das características gráficas, e pode ser adotado para qualquer situação semelhante para classificar as alternativas.

A aplicação da metodologia da lógica *fuzzy* para problemas de tomada de decisão do mundo real é mais efetiva (KUMAR e RAJKUMAR, 2014). Por isso, este estudo adota como sistema de decisão a lógica *fuzzy* e aplica a um estudo de caso na Índia para selecionar o subsistema de irrigação com melhor desempenho. Bing et al. (2015) propõem um sistema de controle de decisão *fuzzy* para resolver a incerteza e não linearidade dos sistemas de irrigação a fim de obter o volume ideal de lâmina d'água de uma plantação de milho. Assim, o sistema de controle foi projetado com base no valor da diferença de temperatura das folhas e na umidade do solo. Os resultados mostraram que o sistema pode obter um valor mais preciso.

Giusti e Marsili-Libelli (2015) discutem um sistema de apoio à decisão de irrigação baseado em um sistema de inferência *fuzzy*, que incorpora um banco de dados extenso com informações de diversas culturas, incluindo dados meteorológicos (temperatura, radiação solar, vento, chuva, etc.) e dados agrícolas (irrigação, composição do solo, localização do local, etc.), com um total de 45 variáveis de entrada. A saída do modelo é a umidade do solo expressa em milímetros, e seu desenvolvimento foi motivado pela necessidade de melhorar o desempenho de um sistema de consultoria de irrigação na web que decidirá o momento e a quantidade de irrigação.

O principal foco dos sistemas de suporte à decisão desenvolvidos tem a preocupação de estimar a quantidade a ser aplicada, utilizando poucas ou muitas variáveis de entrada, que são comuns a todos os outros sistemas de irrigação, como, por exemplo, dados meteorológicos, umidade do solo, tipo de planta e estágio de desenvolvimento da cultura. Um ponto muito positivo apontado por esse capítulo é que em nenhum dos trabalhos apresentados anteriormente havia a preocupação do controle voltado para o equipamento. Dessa forma, há lacunas que devem ser preenchidas.

Quando se procura por pesquisas com esse foco, encontram-se poucos trabalhos sobre os sistemas de irrigação *fuzzy*. Exemplos são aqueles desenvolvidos por Zhang et al., (1996); Xinjian (2011); Zhu e Li (2011) e Ed-Dahhak et al., (2013), que usam uma abordagem com a lógica *fuzzy* para imitar os operadores humanos e dessa forma conseguiram monitorar e controlar a duração da irrigação. O resultado é superior ao dos sistemas de controle tradicionais. Bahat et al. (2000) abordam uma solução para um controlador de irrigação baseado na metodologia da lógica *fuzzy* com regras simples: o controlador recebe os dados de um ou mais sensores em campo, que fornecem continuamente dados atualizados ao controlador sobre parâmetros influenciados pelo comportamento do sistema (como nível de umidade do solo, temperatura e outras). Recebe também um parâmetro de saída, que é o controle da válvula, e isso torna o sistema muito simples e direto, com os valores de saída definidos no intervalo de 0 a 100.

Como se vê, sistemas *fuzzy* têm sido utilizados em sistemas de suporte à decisão aplicados na área de agricultura irrigada graças à sua capacidade de resolver uma ampla gama de problemas em diferentes campos de aplicação. O desenvolvimento da prescrição inteligente de irrigação com taxa variável é uma área de pesquisa ativa e bem desenvolvida, e os trabalhos de pesquisa existentes estão focados no desenvolvimento e avaliação de desempenho desse tipo tecnologia VRI.

Porém, existe um potencial para melhoria das estratégias de controle dos equipamentos de aplicação de insumos como, por exemplo, o comportamento do sinal de saída de um sistema de suporte à decisão ou o sinal de entrada do sistema de controle. A quantidade real de irrigação é baseada na necessidade de água para plantação, mas não é o único fator prático da irrigação. Os sistemas de irrigação por taxa variável devem ser compreendidos como um todo, desde o elemento que determina o montante de água a ser aplicada ao sistema de controle dos equipamentos que realizam a aplicação.

Capítulo 3

3. Referencial teórico

Este capítulo apresenta os aspectos teóricos relacionados aos conceitos mais importantes do sistema de irrigação por pivô central, bem como uma breve descrição de cada elemento que compõe a inter-relação solo-planta-atmosfera. Serão explicados também, alguns conceitos fundamentais ao entendimento da lógica *fuzzy* relevantes à estruturação e desenvolvimento do sistema inteligente de irrigação.

3.1 Sistemas de Irrigação Inteligente

Os sistemas de irrigação são um conjunto de técnicas que visam distribuir água às plantações em quantidades adequadas para promover um desenvolvimento vegetal adequado, com um mínimo de consumo de água (BERNARDO et al., 2006). O uso de um sistema de controle inteligente para irrigação implicará a utilização eficiente dos recursos hídricos com redução do consumo de energia elétrica e minimização dos impactos ambientais (LIMA, 2008). E podem ser divididos em dois subsistemas, um de captação e um de aplicação.

3.1.1 Subsistema de Aplicação

Métodos de irrigação podem ser divididos em três grupos: irrigação por superfície, irrigação localizada e irrigação por aspersão.

Irrigação por superfície: compreende os métodos de irrigação nos quais a condução da água do sistema de distribuição (canais e tubulações) até qualquer ponto de infiltração, dentro da parcela a ser irrigada, é feita diretamente sobre a superfície do solo. São classificadas como: sulcos de infiltração e inundação ou submersão;

Irrigação localizada: é o método em que a água é aplicada diretamente sobre a região radicular, com pequena intensidade e alta frequência. É classificado como: microaspersão e gotejamento;

Irrigação por aspersão: é o método de irrigação em que a água é aspergida sobre a superfície do terreno, assemelhando-se a uma chuva, por causa do fracionamento do jato d'água em gotas. É classificado como: aspersão convencional, pivô central, autopropelido e sistema linear. Por se tratar do escopo de trabalho, a irrigação por pivô central será detalhada a seguir.

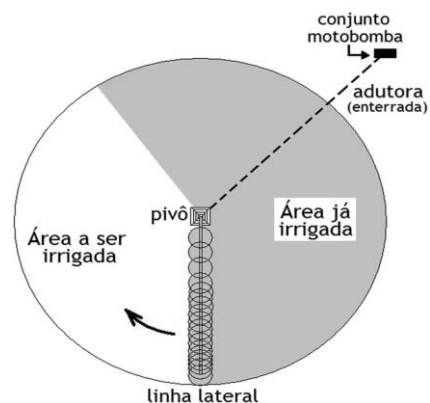
3.2 Pivô Central

Dentre os sistemas por aspersão, o pivô central vem sendo utilizado com relativo sucesso devido à menor demanda de mão de obra, possibilidade de redução no custo da energia elétrica com irrigações noturnas e ainda possui um maior nível de automação e controle (SILVA e COELHO, 2003). Nesse tipo de sistema, uma área circular é projetada para receber uma estrutura suspensa que, por sua vez, recebe uma tubulação em seu centro.

Esse sistema consiste em aplicar água ao solo sob a forma de aspersão, em que os aspersores são instalados sobre uma haste apoiada em torres que giram em torno de um ponto fixo e a água é aspergida por cima da plantação. As torres são acionadas por dispositivos elétricos ou hidráulicos e se movem de forma circular, fazendo com que a área irrigada seja função do comprimento do pivô (Figura 06).



a) Pivô Central – foto real



b) Área irrigada pelo pivô

Figura 6- Pivô Central
Fonte: Pivot central, 2016

Segundo Bernardo et al. (2006), o pivô central foi construído pela primeira vez em 1948, por Frank L. Zybach, que submeteu o invento para ser analisado e finalmente patentado em 1952, no Colorado, Estados Unidos. Em 1954, Zybach vendeu os direitos de fabricação para a empresa americana Valley, localizada no Estado do Nebraska. A partir de 1968, outra empresa, denominada Lindsay, também iniciou a fabricação de pivôs, e atualmente ambas dividem a liderança do mercado mundial de pivôs.

O comprimento do raio do pivô pode variar de 200 a 1500 metros, sendo o mais comum de 400 a 600 metros, e a área irrigada por unidade de comprimento aumenta com o incremento do raio. As principais partes desse sistema são mostradas na Figura 07: torre central, caixa de controle, tubulação de distribuição, torres móveis, conjunto motorredutor e lance final em balanço (BISCARO, 2009). As principais vantagens do pivô central são a pequena exigência de mão de obra, a alta uniformidade de distribuição de água e a alta eficiência de irrigação, entre 85% a 90%, mas com um custo por unidade de área (aquisição e instalação) elevado (MAROUELLI et al., 2011).

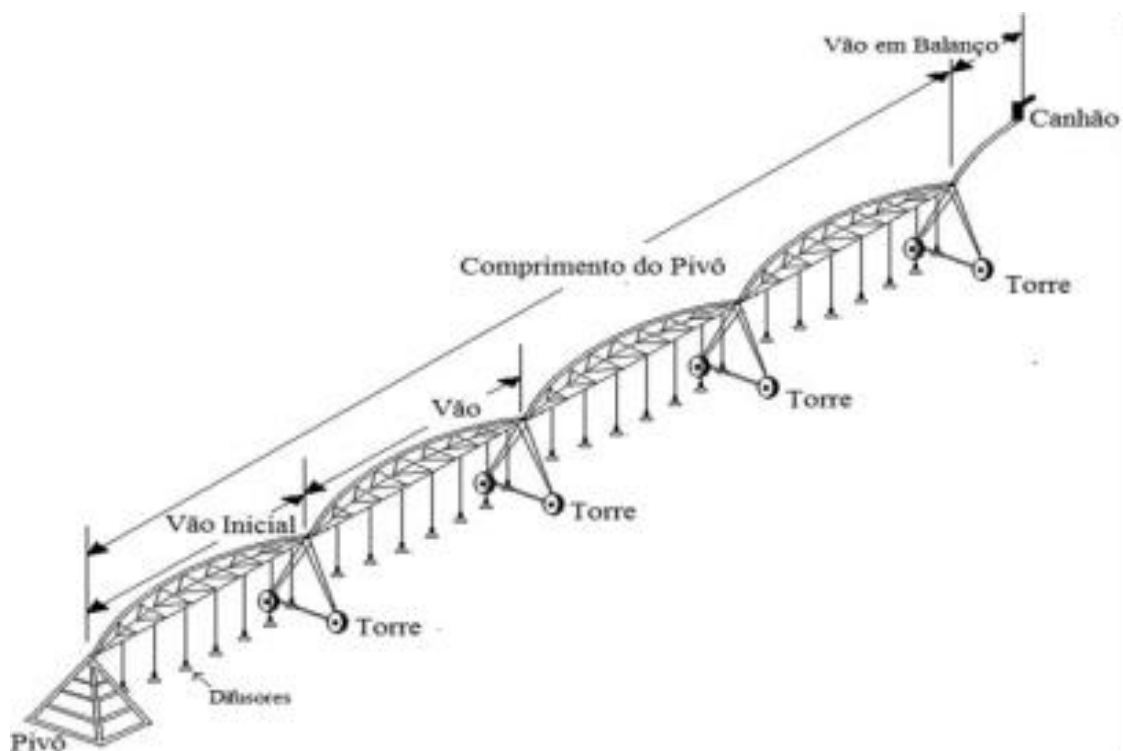


Figura 7- Componentes de um equipamento de irrigação tipo pivô central

Fonte: Adaptado de Biscaro (2009)

O pivô central é um dos sistemas de irrigação por aspersão mais automatizado disponível no mercado. Gilley et al. (1983), Fraisse et al. (1993), Sadler et al. (1996),

Evans et al. (2013) e Evans e King (2011) demonstram que o irrigador tipo pivô central ou linear móvel é particularmente adequado para a condição de irrigação de precisão devido principalmente aos seus atuais níveis de automação e da grande área que o pivô pode irrigar.

3.2.1 Funcionamento

A velocidade de deslocamento de um pivô-central é controlada em sua última torre. Essa velocidade é estabelecida por um temporizador, instalado na caixa de comando central do pivô, o qual controla o tempo de acionamento do motor da última torre. Por exemplo, a situação em que o tempo de parada do motor é igual ao de movimento corresponde à regulação de 50% da velocidade máxima estabelecida pelo percentímetro de controle do temporizador. Na velocidade máxima de 100%, o motor da última torre fica continuamente em movimento (BERNARDO et al., 2006, SILVA e AZEVEDO, 1998).

Uma das informações importantes no dimensionamento de um pivô-central é a velocidade de deslocamento da lateral. Essa velocidade depende das características construtivas do motorreductor, da redução na roda e da rotação do motor de cada torre, e, com o comprimento do raio até a última torre, determina o tempo de rotação que leva o pivô para completar um giro. Esse tempo, conhecido por tempo de giro ou de rotação, pode ser calculado pela seguinte Equação (1):

$$T_{giro} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{v} \quad (1)$$

em que, T_{giro} = tempo de giro da lateral do pivô-central (h);
 R = distância da última torre em relação ao ponto pivô (m);
 v = velocidade linear no arco de deslocamento da última torre (m/h).

As torres internas movem-se toda vez que o ângulo de declinação de um vão em relação ao outro for superior a um valor predeterminado (em geral, 5 graus). Um mecanismo simples detecta tal variação no ângulo e mecanicamente, aciona uma chave elétrica, permitindo a passagem de corrente para um motor de $\frac{3}{4}$ ou de 1 cv, localizado sobre a base da torre (Figura 08).

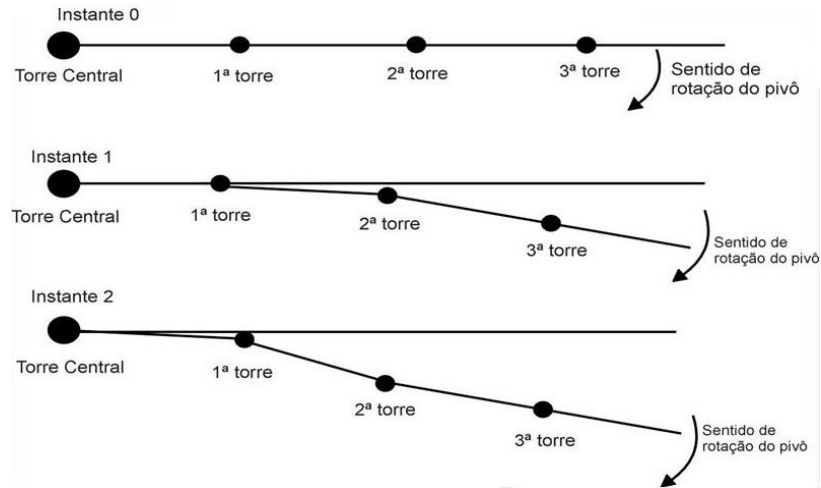


Figura 8- Movimento de um pivô central
 Fonte: Adaptado de Silva e Azevedo (1998)

Os aspersores podem ser distribuídos ao longo da lateral com o mesmo espaçamento, variando o tamanho dos bocais, ou com espaçamento decrescente a partir do ponto pivô, mas mantendo a mesma vazão dos aspersores. A água é aplicada por meio de aspersores do tipo spray, que funcionam na posição invertida, como mostrado na Figura 9a.

Para plantio no formato circular (círculos concêntricos), cada emissor irriga uma linha de plantas e, neste caso, a irrigação pode ser aplicada de forma localizada pelos aspersores do tipo LEPA (*low energy precision application* – aplicação precisa de baixo consumo de energia), como mostrado na Figura 9b (RAJAN et al., 2015). A escolha correta dos aspersores representa um dos pontos fundamentais do projeto de um pivô-central.



a) aspersores do tipo spray



b) aspersores do tipo LEPA

Figura 9- Tipos de aspersores mais comuns em pivô central

Fonte: Irrigação, 2016

3.2.2 Lâmina Aplicada por Volta do Pivô

Quanto maior o tempo necessário para o pivô central dar um giro completo, maior será a lâmina aplicada por ele. Desse modo, para aumentar a lâmina aplicada por rotação, tem-se que reduzir a velocidade de rotação do pivô e vice-versa. Essa lâmina é dada pela Equação (2):

$$L = 0,36 \cdot \frac{Q_0 \cdot T_{giro} \cdot E_f}{A} \quad (2)$$

em que, L = lâmina média aplicada pelo pivô central (mm);
 Q_0 = vazão do sistema (l/s);
 T_{giro} = tempo para dar uma volta completa (h);
 A = área total irrigada (ha);
 E_f = eficiência de irrigação (decimal).

3.2.3 Determinação do Intervalo de Irrigação

Deve-se evitar a irrigação diária, pois essa prática mantém a superfície do solo sempre úmida, aumentando as perdas por evaporação. Além disso, quando muito frequente, a irrigação umedece apenas uma pequena camada de solo, o que dificulta o desenvolvimento das raízes. O intervalo entre irrigações pode ser determinado de três maneiras: turno de rega fixo, lâmina de irrigação fixa e irrigação com base na tensão de água no solo (BERNARDO et al., 2006), a saber:

Turno de rega fixo (TRF) refere-se ao tempo que pode ser decorrido entre uma irrigação e a próxima. Em outros termos, é o intervalo de tempo, geralmente em dias, entre duas irrigações sucessivas e o tempo necessário para que a cultura consuma, através da evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}), a disponibilidade total de água (DTA) no solo na profundidade efetiva do sistema radicular (Z), como é visto na Equação (3):

$$TRF = \frac{DTA \cdot Z}{ET_{pc}} \quad (3)$$

em que, TRF = Turno de Rega Fixo (dias);
 DTA = Disponibilidade Total de Água (mm de água/cm de solo);
 Z = Profundidade efetiva do sistema radicular (m);
 ET_{pc} = Evapotranspiração Potencial da Cultura (mm);

Lâmina de irrigação fixa: neste método, a irrigação é realizada sempre que a evapotranspiração máxima da cultura acumulada (ETca) atinge um valor pré-estabelecido, que vai depender principalmente do tipo de solo. Quanto maior a capacidade de retenção de água apresentada pelo solo, maior poderá ser o valor de ETca, e quanto maior esse valor, maior será o intervalo de irrigação.

Irrigação com base na tensão da água no solo: é semelhante ao método da lâmina de irrigação fixa, mas ao invés de utilizar um valor pré-fixado da ETca, utiliza-se, como base da irrigação, um valor pré-estabelecido da tensão da água no solo. Essa tensão está diretamente relacionada ao teor de umidade do solo, pois quanto mais seco o solo, maior a tensão com que a água é retida. Na prática, o intervalo de irrigação representa o número de dias que o solo terá reserva de água suficiente para suprir a necessidade hídrica das plantas, sem prejudicar o seu desenvolvimento (REICHARDT, 1990).

Independentemente do tipo de turno de rega adotado no manejo da irrigação, fixo ou variável, o sistema de irrigação deverá repor ao solo a mesma quantidade de água que foi evapotranspirada pela cultura após a última irrigação ou chuva.

3.3 Estratégias de Manejo de Irrigação

A agricultura irrigada não pode permitir reduções na produtividade da cultura em decorrência da falta ou do excesso de água aplicada. A aplicação de pouca água (irrigação com déficit) pode ser um desperdício óbvio, tendo em vista que a produção não poderia obter o benefício esperado. Por outro lado, a aplicação excessiva é muito mais destrutiva, pois ocorre saturação do solo, o que impede a sua aeração e lixivia os nutrientes, induzindo a uma maior taxa de evaporação e à salinização (BERNARDO et al., 2006).

Vários são os indicadores disponíveis para determinar o momento de irrigar e a quantidade de água a ser aplicada, podendo ser agrupados conforme a seguinte sequência:

- Indicadores de manejo com base no solo;
- Indicadores de manejo com base na planta;
- Indicadores de manejo com base na atmosfera (clima/evapotranspiração).

Os indicadores com base na planta possibilitam apenas estabelecer o momento de irrigar, enquanto aqueles com base na atmosfera permitem somente estimar a quantidade

de água a ser aplicada por irrigação. Já os indicadores com base no solo geralmente possibilitam determinar quando e quanto irrigar (ROSEGRANT et al., 2002). Na prática, para fins de manejo da água de irrigação, é comum utilizar conjuntamente mais de um indicador do sistema solo-planta-atmosfera.

3.3.1 Relação Solo-Planta-Atmosfera

A caracterização dos processos que envolvem a água em equilíbrio e em movimento no sistema solo-planta-atmosfera (Figura 10) constitui uma vasta área de conhecimento. Isso, porque os componentes do solo, planta e atmosfera são estruturalmente bastante diferenciados entre si e com diversas formas de interação com a água.

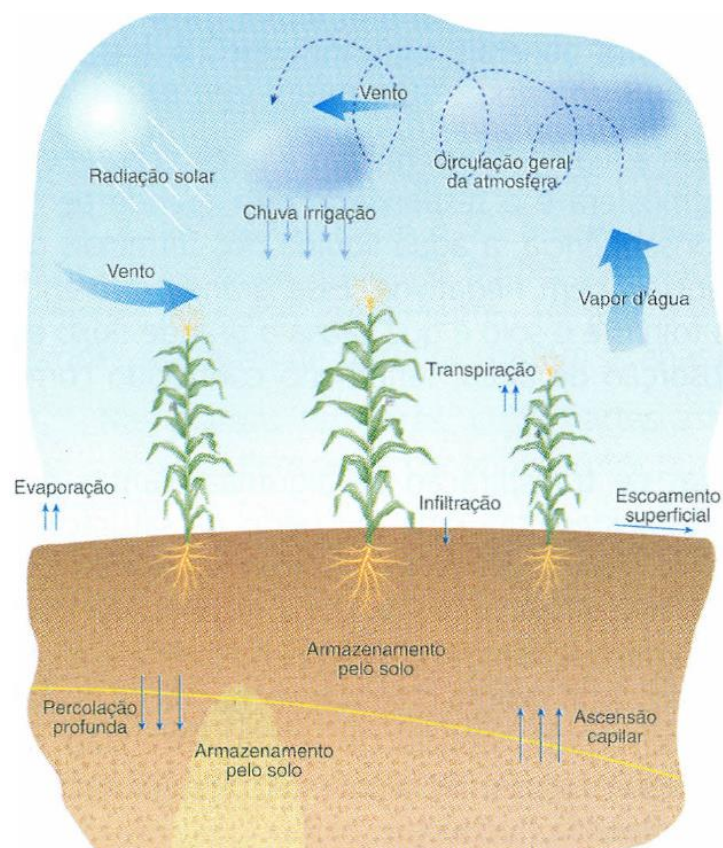


Figura 10- Ciclo hídrico da água no sistema solo-planta-atmosfera
Fonte: Adaptado de Reichardt (1990)

Qualquer planejamento e operação de um projeto de irrigação em que se vise à máxima produção e à boa qualidade do produto, usando de maneira eficiente a água, requer conhecimentos das inter-relações entre solo-planta-atmosfera. Infelizmente, as

práticas irrigatórias, no geral, são baseadas em costumes herdados ou conveniência particular, em vez de corretas análises para as condições presentes. (BERNARDO et al., 2006). O escopo do trabalho não permite que esses elementos sejam finamente dissecados, todavia, para uma visão geral do desenvolvimento do trabalho são necessárias inclusão das principais definições.

3.3.2 Solo

São constituídos de água, ar, material mineral e orgânico, contendo ainda organismos vivos. Servem como um meio natural para o crescimento das plantas (PREVEDELLO, 1996). Troeh e Tompson (2007) apresentam a granulométrica de solos pela textura, que pode ser vista mais facilmente no diagrama triangular de Feret (Figura 11). Em um solo constituído apenas por areia, silte e argila, a soma das porcentagens destas três frações é 100%.

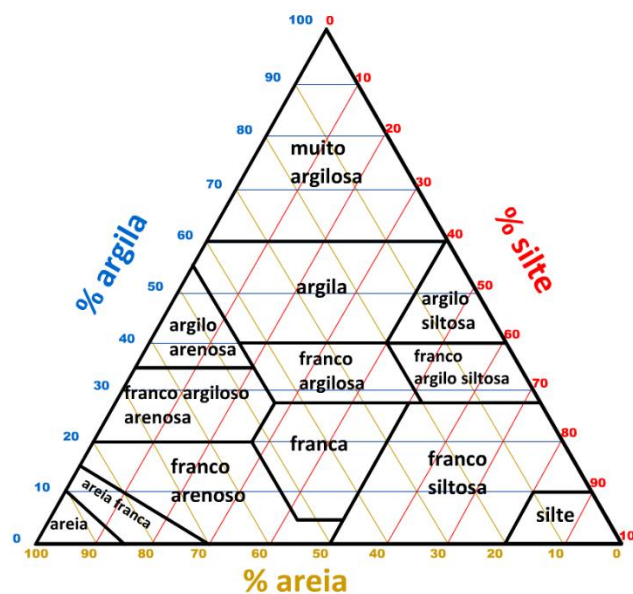


Figura 11- Triângulo de Feret, diagrama de classificação textural dos solos
Fonte: Adaptado de Troeh e Tompson (2007)

Assim, as quantidades de água e ar podem variar, e a evaporação pode fazer a água diminuir, substituindo o volume por ar; a compressão do solo pode provocar a saída de água e ar, reduzindo o volume de vazios, e as diversas propriedades do solo dependem do estado no qual as três fases se encontram.

Solo é o material solto e macio que cobre a superfície da terra e podem variar muito na superfície da terra, tanto com relação à sua espessura (da superfície do solo em contato com a atmosfera até a rocha que lhes deu origem), quanto em relação às suas características, tais como cor, quantidade e organização das partículas de que são compostos (argila, silte e areia), fertilidade (capacidade em suprir nutrientes, água e favorecer o crescimento das plantas), porosidade (quantidade e arranjo dos poros), entre outras características.

3.3.2.1 Determinação da Umidade do Solo

A capacidade que o solo possui de armazenar água, a capacidade de infiltração e a quantidade de água existente no solo por ocasião da irrigação são os principais fatores na determinação da quantidade de água a ser aplicada. Há vários métodos para determinar a umidade do solo, divididos em métodos diretos e indiretos - estes últimos o mais usado na agricultura, tais como o tensiômetro, a sonda de nêutrons, os eletrométricos e a TDR (reflectometria com domínio do tempo). Em Bernardo et al. (2006), pode-se encontrar mais detalhes dos métodos diretos e indiretos.

3.3.2.2 Disponibilidade de Água no Solo

O movimento de água do ponto A ao ponto D, esquematizado na Figura 12, mostra que o solo ocupa uma posição muito importante. Se houver água disponível no solo, o movimento de água prossegue da planta para a atmosfera.

A frequência de irrigação requerida para uma cultura, sob determinado clima, depende grandemente da quantidade de água que pode ser “armazenada” no solo após uma irrigação. Definiu-se, então, uma quantidade de água disponível baseada em parâmetros do solo, de grande utilidade, desde que se reconheçam suas limitações.

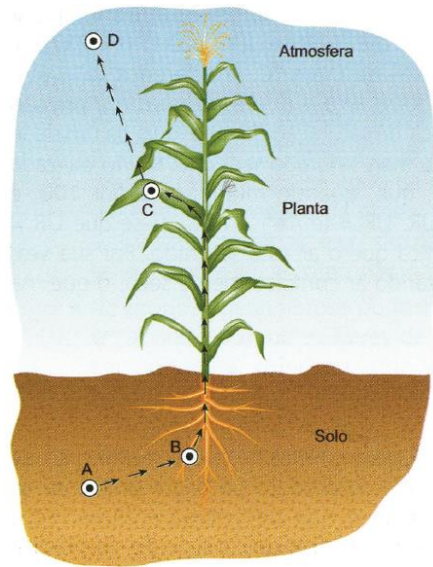


Figura 12- Movimento da água dentro da estrutura da solo-planta
 Fonte: Adaptado de Reichardt (1990)

A água disponível às plantas, classicamente definida como uma característica estática, representa a quantidade de água que um solo poderia reter ou armazenar entre a “capacidade de campo” (Cc) e o “ponto de murchamento” (Pm) (TROEH e TOMPSON, 2007). Com isso, é possível caracterizar o solo quanto à sua capacidade de armazenar água (Figura 13), pois conforme muda a textura do solo, muda sua capacidade de retenção de água.

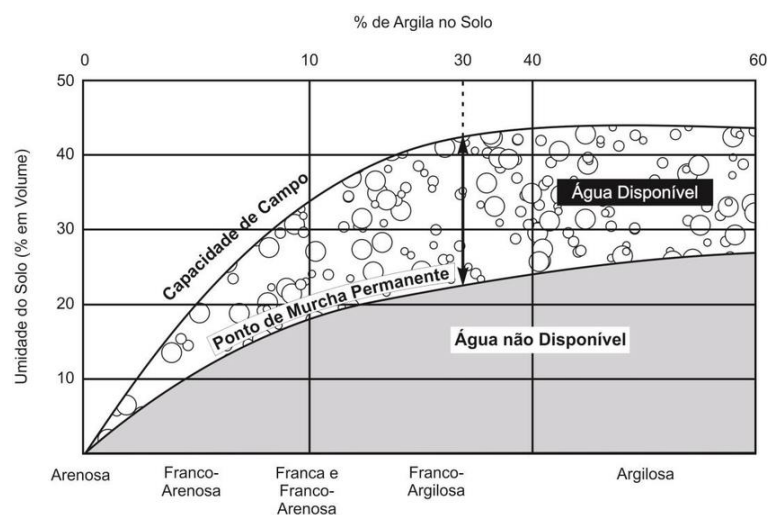


Figura 13- Comportamento dos solos de acordo com sua capacidade de retenção de água em função da textura
 Fonte: Adaptado de Troeh e Tompson (2007)

3.3.2.3 Capacidade de Campo - Cc

O conceito de capacidade de campo (Cc) refere-se à quantidade de água retida pelo solo após o excesso ter sido drenado e a taxa de movimento descendente ter decrescido acentuadamente. Em solos de textura grossa, geralmente, a redução da intensidade de movimento com a diminuição da umidade do solo, abaixo de certos valores, apresenta uma faixa de transição bem nítida, tornando a capacidade de campo bem definida nesses tipos de solo; contudo, em alguns solos de textura fina, não há nítida faixa de transição na redução da intensidade de movimento de água, tornando o conceito de capacidade de campo pouco preciso (REICHARDT, 1990).

3.3.2.4 Ponto de Murchamento - Pm

Este conceito, também conhecido como “Ponto de Murcha Permanente” (Reichardt, 1990), afirma que a água do solo é igualmente disponível em intervalo de umidade, que vai de um limite superior à capacidade de campo até um limite inferior – o ponto permanente de murcha (Pm). Tal ponto representa o teor de umidade no solo abaixo do qual a planta não conseguirá retirar água na mesma intensidade com que ela transpira. Isso aumenta a cada instante a deficiência de água na planta, o que a levará à morte caso não seja irrigada.

A Figura 14 ilustra bem os estados de saturação, capacidade de campo e o ponto de murchamento descrito anteriormente.

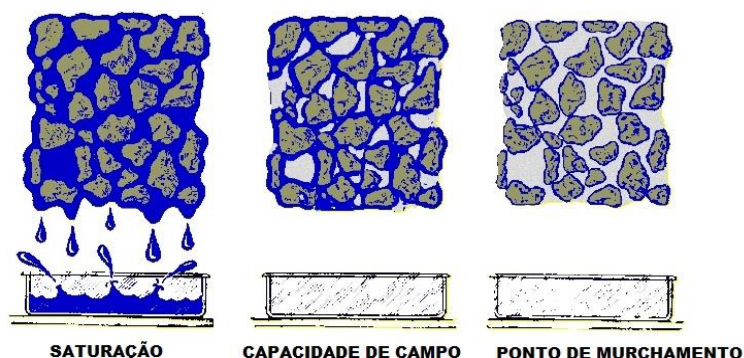


Figura 14- Estágios da retenção da água no solo

Fonte: Adaptado de Brady e Weil (1996)

3.3.2.5 Cálculo da Água Disponível no Solo

A disponibilidade total de água do solo é uma característica do solo, que corresponde à água nele armazenada no intervalo entre as umidades correspondentes à capacidade de campo e o ponto de murchamento, visto na Figura 15, e pode ser expressa pela Equação (4), em altura de lâmina de água, por profundidade do solo, geralmente de mm de água por cm de solo, ou em volume de água por unidade de área do solo.

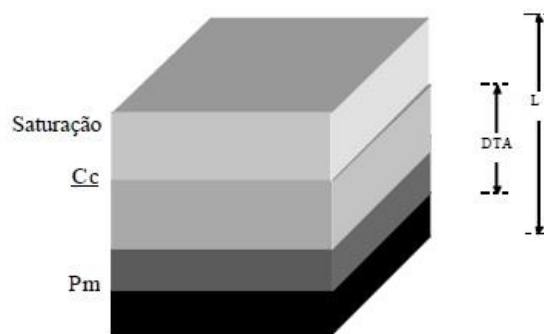


Figura 15- Estágios da retenção da água no solo
Fonte: Adaptado de Bernardo et al., (2006)

A água disponível em um solo pode ser calculada, desde que se conheçam os teores de umidade correspondentes à Cc e ao Pm , as propriedades físicas do solo e a profundidade do solo que será considerada. Em irrigação, essa profundidade considerada nada mais é do que a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (BERNARDO et al., 2006).

$$DTA = \frac{(Cc - Pm)}{10} \cdot d_a \quad (4)$$

em que, DTA = disponibilidade total de água (mm de água/cm de solo);

Cc = conteúdo de água no solo na capacidade de campo (% em peso);

Pm = conteúdo de água no solo no ponto de murchamento (% em peso);

d_a = densidade do solo (g de solo/cm³);

A irrigação nunca deve permitir que o teor de umidade solo atinja o ponto de murchamento. Tanto a quantidade de água de chuva como a de irrigação só devem ser consideradas disponíveis para a cultura no perfil do solo que esteja ocupado pelo sistema radicular, as raízes. Por isso, a capacidade total de água do solo somente deve ser

calculada até a profundidade do solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura a ser irrigada (VERMEIREN e JOBLING, 1997).

3.3.3 Atmosfera ou Clima

Entre os inúmeros fatores que afetam uma cultura, as condições meteorológicas são as que mais influenciam a produtividade. Dentre os fatores meteorológicos, os que mais influenciam no crescimento da planta são: radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa do ar. A transferência de água para a atmosfera, no estado de vapor, quer pela evaporação de superfícies úmidas ou pela transpiração vegetal, constitui importante componente do ciclo hidrológico.

As perdas por escoamento superficial ou percolação profunda devem ser eliminadas com o manejo de água adequado. Portanto, para fins de controle do balanço hídrico (bh), os principais componentes que restam são as irrigações, as precipitações e a evapotranspiração (BERNARDO et al., 2006). A Equação (5) do balanço de água, simplificada.

$$ITN = \frac{\sum ET - Pe - Ws - \Delta s}{Ea} \quad (5)$$

em que: ITN = quantidade total de irrigação necessária (mm de lâmina d'água);

$\sum ET$ = somatório da evapotranspiração (mm);

Pe = precipitação efetiva (mm);

Ws = água proveniente do lençol freático (mm);

Δs = variação do teor de umidade solo (mm);

Ea = eficiência de aplicação irrigação (%);

A irrigação e a precipitação são as componentes de entrada no bh, já as perdas por percolação profunda, escoamento superficial e consumo de água pelas plantas, conhecida também como evapotranspiração, são as componentes de saída do bh. Normalmente, Ws e Δs são valores desprezíveis em relação com ET e Pe.

3.3.3.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície de um vegetal durante um determinado período, e pode ser expressa em valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água no período considerado. O processo de evapotranspiração, que pode ser visto na Figura 16, necessita de energia para a evaporação de água e, sendo assim, depende principalmente da quantidade de energia solar recebida.

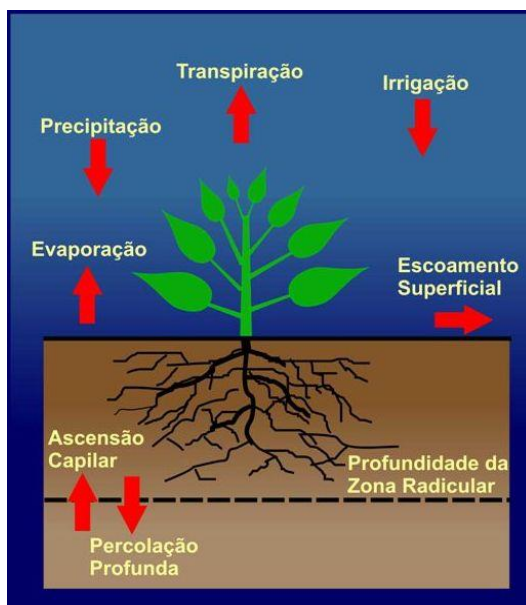


Figura 16- Ciclo da evapotranspiração
Fonte: Adaptado de Monteiro (2009)

A quantidade de água evapotranspirada depende principalmente da planta, do solo e das condições meteorológicas, sendo este último o fator predominante sobre os demais como, por exemplo, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento, chuva e pressão de vapor, de modo que a quantidade de água requerida por uma cultura variará com a extensão da área coberta pelo vegetal e com as estações do ano.

3.3.3.2 Determinação da Evapotranspiração

Evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) é aquela que ocorre em uma cultura em que o solo não apresenta restrição de umidade e, portanto, não há restrição para a taxa

de evapotranspiração. É a relação entre o tipo de planta ou cultura e a ET_o , e pode ser expressa pela seguinte Equação (6):

$$ET_{pc} = K_c \cdot ET_o \quad (6)$$

em que, K_c = coeficiente da cultura;

ET_o = Evapotranspiração (mm);

A determinação da ET_o pode ser dividida em dois grupos: os métodos diretos e os indiretos. Os métodos diretos levam em consideração principalmente a fonte de água a ser usada pelo vegetal, se é por precipitação, irrigação por aspersão ou por superfície ou se é água subterrânea (BERNARDO et al., 2006). Os principais métodos diretos para determinação do ET_o são: a) lisímetros; b) parcelas experimentais no campo; c) controle da umidade do solo e d) método da “entrada-saída” para grandes áreas. Devido ao escopo do trabalho, esses métodos não serão tratados aqui.

Os métodos indiretos podem ser divididos em outros dois grupos: os evaporímetros, que são equipamentos usados para medir a evaporação da água. O segundo grupo são os modelos matemáticos, como o método de Blaney-Criddle, o método de Hargreaves e o método de Penman-Monteith. A Equação Penman-Monteith foi uma evolução da estimativa da ET_o pelo método de Penman. Além de incorporar os aspectos aerodinâmico e termodinâmico, inclui na sua dedução a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor da água e a resistência da superfície à transferência de vapor da água.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) consideram esse método como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, descrita na Equação (7), a partir de dados meteorológicos (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (7)$$

em que, ET_o = evapotranspiração de referência ($\text{mm } d^{-1}$);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

R_n = saldo de radiação à superfície ($\text{MJ } m^{-2} d^{-1}$);

- G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);
 γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).
 T = temperatura do ar a 2m de altura ($^\circ\text{C}$);
 U_2 = velocidade do vento à altura de 2m (m s^{-1});
 e_s = pressão de saturação de vapor (kPa);
 e_a = pressão de vapor atual do ar (kPa);
 $(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor (kPa);

Informações da quantidade de água evapotranspirada são necessárias em diversos estudos hidrológicos e para adequado planejamento e manejo. O conhecimento da evapotranspiração é essencial para estimar a quantidade de água requerida para irrigação.

3.3.4 Planta

Considerando a planta como referencial para as irrigações, existem alguns métodos indicativos do estado hídrico das plantas que podem ser utilizados, tais como: potencial hídrico das folhas, resistência estomática, temperatura do dossel vegetativo e determinação do grau de turgescência das folhas, entre outros (BERNARDO et al., 2006). Tais métodos são promissores, porém complexos. Têm sido utilizados para fins de pesquisa, têm em geral custo elevado e necessitam de automação e cuidados especiais para utilização em grande escala. Devido às dificuldades envolvidas no manejo via planta, comumente o manejo da água é feito via solo, clima ou a associação de ambos.

3.3.4.1 Duração do Ciclo das Culturas

A duração total do ciclo das culturas aqui considerada vai desde o dia da semeadura até a maturação fisiológica, como é apresentado pela Figura 17; ocasião em que praticamente a planta termina o processo de senescência e se encerra a absorção de água pelas raízes. No entanto, essa duração é variável de acordo com a forma de cultivar e com as condições meteorológicas, pois, normalmente, um mesmo tipo de material pode

alongar ou encurtar o ciclo, dependendo da demanda evaporativa, ou seja, uma maior demanda evaporativa tende a encurtar o ciclo e vice-versa (MAITI e BIDINGER, 1981).

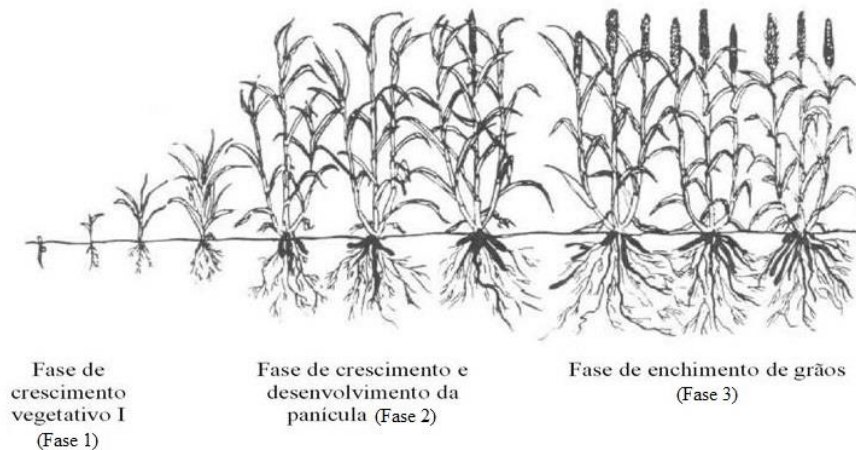


Figura 17- Ciclo de vida de uma cultura de sorgo
 Fonte: Adaptado de Maiti e Bidinger, (1981)

3.3.4.2 Coeficiente de Cultura (K_c)

O coeficiente de cultura representa o estágio fenológico da cultura e as condições de cultivo e pode ser determinado pela equação expressa por Allen et al. (1998) mediante a posse dos valores de evapotranspiração da cultura (ET_{pc}), sem restrição de água e evapotranspiração de referência (ET_o), de acordo com a Equação (8).

$$K_c = \frac{ET_o}{ET_{pc}} \quad (8)$$

em que, K_c = coeficiente de cultura;

ET_{pc} = evapotranspiração potencial da cultura sem restrição de água ($\text{mm } d^{-1}$);

ET_o = evapotranspiração de referência ($\text{mm } d^{-1}$).

A FAO recomenda três valores de K_c para cada cultura, conforme o período de desenvolvimento das plantas. É possível ver a distribuição do valor de K_c (Figura 18) com um valor inicial (K_c -ini), que representa o período que vai do plantio até o momento em que o cultivo alcança aproximadamente 10% da cobertura do solo; um valor intermediário (K_c -med), para o período de pleno desenvolvimento foliar até o início da maturação e,

por fim, um valor final (K_c -fin), que engloba o período de maturação até a colheita ou a completa senescência.

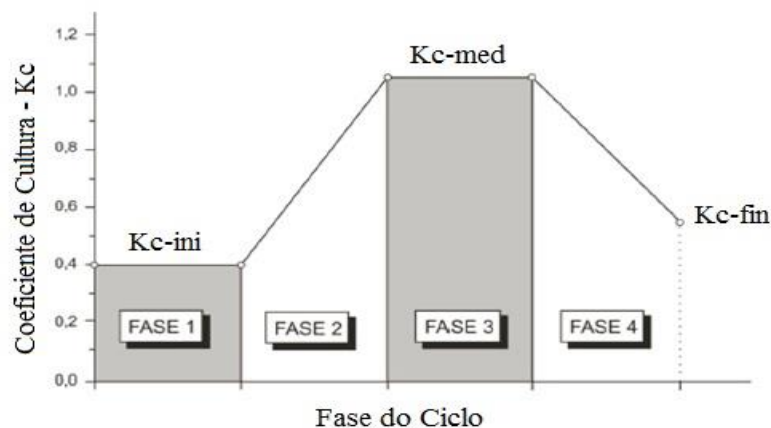


Figura 18- Representação do comportamento dos valores de K_c durante o desenvolvimento das culturas

Fonte: Adaptado de Allen et al., (1998)

A prática de manejo de irrigação via planta possui complexidade inerente à visualização dos sintomas de déficit hídrico, são difíceis de ser detectados e em outras ocasiões, os são muito tardiamente, isto é, quando observados, seus efeitos já comprometeram a produção ou a qualidade do produto e, geralmente, esses sintomas estão relacionados à tonalidade da coloração das folhas, enrolamento de folhas, ângulo da folha, etc.

3.3.4.3 Índices de Vegetação

Os índices de vegetação resultam de combinações lineares de dados espectrais, realçando o sinal da vegetação, que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal (JACKSON e HUETE, 1991). Nesse sentido, possibilitam comparações espaciais e temporais da atividade fotossintética terrestre, facilitando, assim, o monitoramento sazonal, interanual e variações de longo prazo dos parâmetros estruturais, fonológicos e biofísicos da vegetação (WANG et al., 2003).

De acordo com Epiphanyo et al. (1996), os índices de vegetação realçam o comportamento espectral da vegetação e se correlacionam com o vigor da vegetação verde, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e produtividade. Dados

oriundos de sensores remotos constituem uma importante ferramenta para o monitoramento de alterações naturais ou antrópicas no uso e na cobertura da terra.

Esses índices têm sido usados na estimativa de diversos parâmetros da vegetação como, por exemplo, o índice de área foliar e a quantidade de biomassa verde, bem como na avaliação do uso e manejo do solo e da recuperação de áreas degradadas (RIZZI e FONSECA, 2001; OKIN, 2007).

3.4 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto tem se mostrado como importante ferramenta de monitoramento de fenômenos meteorológicos e ambientais, não destrutiva e com grande potencial de aplicação na agricultura em vários níveis para estimar, quantificar e monitorar atributos biofísicos e bioquímicos da vegetação (SAHOO et al., 2015; XIA et al., 2016), podendo, dessa forma, descrever eficientemente a variabilidade espacial da cultura e auxiliar na tomada de decisão com sistemas especialistas (JONES e BARNES, 2000; BEZERRA et al., 2008).

As imagens de satélites se constituem como instrumento de grande utilidade para o monitoramento de grandes áreas (MASCARENHAS et al., 2009). Para aplicar essa abordagem à escala de campo comercial, os dados de sensoriamento remoto necessários para descrever a relação solo-planta-atmosfera podem ser adquiridos por satélite (MORAN et al., 1997) e imagens de drones (WOOD et al., 2003; FITZGERALD et al., 2006). No entanto, altos custos, resolução espacial, frequência e disponibilidade de dados (PINTER et al., 2003; TROUT et al., 2008), além de imagens de satélite sem nuvens, são um desafio para a correta execução de modelos baseados em sensoriamento remoto (BARKER et al., 2018). Esses problemas podem limitar a eficiência do gerenciamento de irrigação de taxa variável em tempo real.

A partir dos dados de sensoriamento remoto, serão selecionados aqueles que melhor descrevem a relação solo-planta-atmosfera para o sistema de irrigação inteligente do local da plantação. Nesta fase, a seleção correta desses dados é fundamental para a determinação correta dos resultados, e faz-se necessário abrir um parêntese para explicar de que maneira as variáveis de entrada do sistema foram escolhidas.

Acontece que para a realização dos estudos foi necessário estabelecer uma parceria com empresa especializada em sensoriamento remoto chamada *Intelligent Environmental*

*Knowledgebase (i-ekbase)*¹. A empresa disponibilizou imagens de satélites e dados de sensoriamento remoto via ferramenta web. Com uso limitado e gratuito para pesquisa, assim, diante dos dados disponibilizados pela empresa para o estudo (Tabela 01) e com base na escolha do local de plantio e do tipo de cultura a ser irrigada, em relação aos dados do tipo de planta, serão utilizados os valores de leitura do Índice de nitrogênio; SAVI; Umidade próxima do solo e Temperatura do dossel.

Tabela 1 - Dados de sensoriamento remoto disponíveis na web-ferramenta i-ekbase

NDVI ajustado ao solo (%) – SAVI
Teor de clorofila (%)
Temperatura do dossel (°C)
Biomassa seca (tn / ha)
Umidade próxima do solo (%)
Salinidade próxima da superfície (dS / m)
Índice de nitrogênio (%)

3.4.1 SAVI – *Soil-Adjusted Vegetation Index*

O objetivo dos índices de vegetação é destacar uma propriedade particular da vegetação como, por exemplo, o SAVI, o teor de clorofila, a biomassa verde e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2009) por apresentar boa correlação com o conteúdo de água do dossel vegetal e ser capaz de acompanhar mudanças na biomassa e nos estresses de umidade das plantas (HARDISKY et al., 1983 e GAO, 1996). Desse modo, com um aumento no déficit hídrico a síntese de fotoassimilados é afetada e o resultado é prejuízo no desenvolvimento.

Alguns índices têm sido desenvolvidos para a caracterização dos dosséis da vegetação a partir da variação de sua densidade e conseqüentemente dos valores biofísicos da vegetação, como os valores de reflectância (EPIPHANIO et al. 1996). O índice vegetativo mais utilizado é o NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (TUCKER, 1979). Entretanto, os resultados obtidos a partir do NDVI sofrem variações em virtude do solo estar em segundo plano na imagem.

¹ <http://iekbase.com>

Desta forma, em 1988, Huete desenvolveu o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo-SAVI, que é uma melhoria do NDVI a partir da aplicação da constante L, minimizando os efeitos da cor do solo nos seus resultados. A constante L varia entre 0 a 1, de acordo com a densidade da vegetação, sendo o valor 1 adotado para áreas com pouca cobertura vegetal, já áreas com cobertura intermediária é representada por L=0,5, áreas muito densas, geralmente adota-se a constante L= 0.25, quando o L é igual a 0, o SAVI é idêntico ao NDVI.

O SAVI é a razão entre a diferença das refletividades das bandas no infravermelho próximo e no vermelho e pela soma dessas mesmas refletividades (Equação 9):

$$SAVI = \left[\frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + L} \right] \cdot (1 + L) \quad (9)$$

em que, ρ_{NIR} = valor da refletância do infravermelho próximo;
 ρ_{red} = valor de refletância do vermelho;
 L = fator de ajuste do solo.

O SAVI permite avaliar o vigor vegetativo dos estágios de desenvolvimento da vegetação ou cultura, bem como identificar e diferenciar áreas com algum tipo de vegetação e áreas sem cobertura vegetal, e a fim de estabelecer uma correlação entre os valores de SAVI e o coeficiente de cultura (K_c), é possível desenvolver um modelo de regressão linear simples (KAMBLE et al., 2013), no qual obtiveram uma forte correlação entre os valores de K_c estimados e os valores de K_c observados (ALLEN et al., 1998).

3.4.2 Temperatura do dossel – *Canopy temperature*

A diferença de temperatura entre plantas com e sem estresse fundamenta-se no estado hídrico das plantas, no comportamento estomático e na perda de calor latente através da transpiração. Plantas sob déficit hídrico do solo muitas vezes fecham os estômatos, reduzindo assim a transpiração e aumentando a temperatura da folha (GARCÍA-TEJERO et al., 2011). Todos esses processos mudam ao longo do dia para cada espécie, conforme a intensidade e duração do estresse hídrico.

Desse modo, a temperatura do dossel deve subir em plantas cultivadas sob solo com limitações de água. Ou seja, em plantas sob estresse hídrico, a temperatura sobre suas folhas torna-se maior do que a da temperatura do ar. A relação entre a temperatura do dossel de plantas e a disponibilidade de água no solo tem sido investigada pela termometria a infravermelho por diversos pesquisadores, em busca por um índice térmico adequado para estabelecer o tempo de irrigação apropriado.

Um dos primeiros índices estudados foi por Jackson et al. (1977), que propuseram o uso do *Stress Degree Day* (SDD), cuja tradução direta seria “grau de estresse diário”, ou a simples subtração da temperatura do ar pela da temperatura do dossel de uma cultura. Os autores mostraram que o acúmulo de diferenças diárias de temperatura no meio da tarde ao longo da temporada ($T_a - T_c$) está linearmente relacionado ao rendimento final da safra. A principal desvantagem do SDD é que condições ambientais como a umidade do ar podem afetar o índice (IDSO et al., 1981; CLAWSON e BLAD, 1982; CLAWSON et al., 1989).

Segundo Zarco-Tejada et al. (2012), a metodologia de detecção de estresse hídrico a partir de infravermelho pode ser usada remotamente e permite a medição de grandes áreas quando a imagem térmica é empregada. Por conseguinte, a medição da temperatura do dossel via sensoriamento infravermelho pode ser usada para estimar a evapotranspiração da cultura (JONES et al., 2002).

As plantações não apresentam estresse hídrico até esgotar a água disponível na zona das raízes e que o estresse hídrico entre plantas individuais varia inevitavelmente devido a variações de fatores como propriedades do solo e profundidade de enraizamento. Portanto, a variabilidade espacial na temperatura do dossel deve ser muito baixa na ausência de estresse hídrico, mas deve aumentar à medida que o nível de estresse hídrico aumenta.

3.4.3 Umidade próxima ao solo

A estimativa da umidade do solo a partir de sensoriamento remoto óptico e térmico depende principalmente da relação entre a umidade do solo e a refletância da superfície ou índice de vegetação. Os métodos de sensoriamento remoto por infravermelho térmico usam a relação entre a umidade do solo e a temperatura da superfície ou variações da

temperatura da superfície (JACKSON et al., 1996). Essas abordagens geralmente têm processos complexos de derivação e muitas aproximações.

Embora as capacidades de penetração de sinal dos métodos ópticos e térmicos sejam piores que as dos métodos térmicos de infravermelho e micro-ondas, o domínio da refletância é o mais operacional, porque as imagens estão facilmente disponíveis em uma ampla faixa de resoluções no solo (MULLER e DÉCAMPS, 2001; SADEGHI et al., 2015; YANG et al., 2015). O efeito da umidade do solo sobre sua refletância direta, quando há uma diminuição nas medições de refletância, é uma indicação de que a umidade do solo aumentou (BEN-DOR et al., 1999; CHAUHAN et al., 1999; ISHIDA et al., 1991).

Várias abordagens metodológicas foram propostas para descrever a conexão entre a refletância da superfície do solo e o teor de umidade (BOWERS e SMITH, 1972; DALAL, 1986). Algumas técnicas, no entanto, fornecem apenas uma fraca indicação do teor de umidade do solo, uma vez que a característica espectral de um solo também depende de vários outros fatores, como composição mineral, matéria orgânica, textura do solo e rugosidade da superfície (ASNER, 1998).

O sensoriamento remoto pode estimar a umidade do solo continuamente em grandes áreas (JACKSON et al., 1996). Entretanto, as estimativas da umidade do solo a partir de camadas profundas do solo, como na zona da raiz, não são eficientes. Com base nos métodos ativos de sensoriamento remoto, estimar a umidade do solo em solo descoberto ou com menos vegetação fornece resultados mais precisos, em comparação ao uso dos métodos em uma mistura de solo coberto por terra. Além disso, o processo de estimativa se torna mais desafiador quando a cobertura vegetal é densa.

Nesse caso, as estimativas de umidade do solo referem-se à umidade do solo próximo à superfície, que representa os primeiros 5 cm (ou menos) do perfil do solo superficial. Nos últimos anos, as técnicas de sensoriamento remoto melhoraram e diversificaram suas estimativas, tornando-as uma ferramenta interessante para monitorar a umidade do solo próximo à superfície e outras variáveis, como o Índice de Vegetação por Diferenças Normalizadas (NDVI) e a temperatura da superfície terrestre (ZHANG e ZHOU, 2016).

3.4.4 Índice de Nitrogênio

A taxa de absorção de Nitrogênio (N) de qualquer safra é altamente variável de acordo com o desenvolvimento da safra, as estações do ano, ao tipo de planta e os locais. Entretanto, sob ampla disponibilidade de nitrogênio no solo, a absorção de N está altamente relacionada à taxa de crescimento da cultura e ao acúmulo de biomassa (GREENWOOD et al., 1986). Várias investigações mostraram que os fertilizantes nitrogenados proporcionaram aumentos substanciais no rendimento da produção (MARONI et al., 1994; SIELING e CHRISTEN, 1997).

No entanto, as exigências de nitrogênio do fertilizante podem diferir significativamente de acordo com o tipo de solo, clima, prática de manejo, época de aplicação do nitrogênio e cultivares utilizadas (FAGERIA e BALIGAR, 2005; HOLMES e AINSLEY, 1977; KALKAFI et al., 1998; RATHKE et al., 2005). Um meio direto de detectar remotamente níveis absolutos de nutrientes do solo ou de plantas ainda não foi estabelecido; no entanto, as respostas das plantas à deficiência de nutrientes podem ser detectadas usando técnicas de sensoriamento remoto.

Sabe-se que várias deficiências nutricionais reduzem os níveis de clorofila da planta (EVANS, 1989). Entre os fatores modificadores da composição química na folha está a condição nutricional das plantas. Segundo Munné-bosch e Alegre (2004), o estresse por deficiência nutricional ocasiona mudanças significativas na fisiologia das plantas. Essas alterações consequentemente ocasionam modificações no espectro de reflectância. O principal nutriente responsável nesse processo é o nitrogênio. A deficiência desse elemento induz mudanças na estrutura e na cor nas folhas, o que possibilita a identificação de padrões espectrais de resposta à adubação (CHEN et al., 2010).

Muitos estudos mostraram que a refletância foliar no espectro visível (particularmente na região verde ~ 550 nm) pode estar relacionada ao teor de clorofila (HABOUDANE et al. 2002). Como o conteúdo de nitrogênio da folha e a clorofila foi estabelecido para uma variedade de plantas (EVANS, 1989), a luz refletida a 550 nm também mostrou ser sensível ao conteúdo nitrogenado da planta (BLACKMER et al, 1986; RODRIGUEZ et al. 2005).

Tilling et al. (2006) (base metodológica usada pela empresa *i-ekbase* para determinação do status de nitrogênio) mostraram que, em áreas de sequeiro, os valores médios do Índice de estresse de nitrogênio apresentaram menores em relação às parcelas

irrigadas, indicando maior deficiência de N devido à maior taxa de crescimento e, portanto, maior demanda por N nas parcelas irrigadas. A variação nos dados ilustra a variação no status N que pode ocorrer entre parcelas com os mesmos tratamentos de água e N, potencialmente devido a variações nos parâmetros do solo, como salinidade, sodicidade e permeabilidade.

Existem inúmeros estudos sobre o uso de sensoriamento remoto espectral e multiespectral para detectar variações espaciais no status N, e o sensoriamento remoto térmico tem o potencial de identificar variações espaciais no status da água da colheita. Para sistemas de cultivo irrigado, essas abordagens espectrais e térmicas podem ser usadas para a programação da irrigação, permitindo uma rápida diferenciação de estresse por falta de nitrogênio do estresse por falta de água.

3.5 Fuzzy

A teoria de conjuntos *fuzzy* foi introduzida em 1965 pelo matemático de origem iraniana Lotfi Asker Zadeh, professor da Universidade de Berkley, Estados Unidos (ZADEH, 1965), com a principal intenção de dar um tratamento matemático a certos termos linguísticos subjetivos, como “aproximadamente” e “em torno de”, dentre outros.

Este seria um primeiro passo no sentido de se programar e armazenar conceitos vagos em computadores, tornando possível a produção de cálculos com informações imprecisas, a exemplo do que faz o ser humano. Simões e Shaw, (2007) colocam que as incertezas e verdades parciais dos fenômenos naturais são trabalhadas de maneira sistemática e rigorosa dentro da lógica *fuzzy*.

3.5.1 Conjuntos Fuzzy

A teoria clássica de conjuntos permite o tratamento de classes de objetos e suas inter-relações em um universo definido. Nessa teoria, a pertinência de um dado elemento com relação a um conjunto refere-se ao fato de tal elemento pertencer ou não a esse conjunto. Ao contrário da lógica convencional, a lógica *fuzzy* utiliza a ideia de que todas as grandezas físicas (temperatura, altura, velocidade etc.) admitem graus de pertinências que podem variar entre um intervalo fechado $[0, 1]$. Em outras palavras, enquanto a

tomada de decisão na teoria clássica seria como a da Equação (10), a da lógica *fuzzy* seria como a da Equação (11), considerando um conjunto A e um elemento x com relação a esse conjunto (DUBOIS et al., 2000).

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \end{cases} \quad (10)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad (11)$$

Segundo Barros e Bassanezi (2006), a característica mais evidente da lógica *fuzzy* é considerar que entre dois estados (zero e um) podem existir estados intermediários, e esses valores são analisados de acordo com um grau de pertinência, que indica o nível que a informação pertence a um conjunto específico em universo de discurso.

A teoria de conjuntos *fuzzy* provê um método para manipulação de conjuntos, cujos limites são imprecisos, em vez de restritos. A incerteza de um elemento, isto é, seu grau fracionário de pertinência, pode ser concebido como uma medida de possibilidade, ou seja, a possibilidade de que um elemento seja membro do conjunto (SIMÕES e SHAW, 2007).

3.5.2 Funções de Pertinência *Fuzzy*

O primeiro passo na representação de conjuntos *fuzzy* é a escolha da função de pertinência. A escolha dessa função depende do problema a ser modelado e também da capacidade computacional disponível para processar o que se deseja. Um conjunto *fuzzy* A caracteriza-se por uma função de pertinência a qual associa cada elemento do universo de discurso a um número no intervalo real $[0, 1]$.

Uma função de pertinência é uma função numérica que atribui valores de pertinência para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. A Figura 19 mostra alguns exemplos de funções de pertinência, onde o eixo vertical representa o

intervalo $[0,1]$ e o eixo horizontal o universo de discurso. São, de longe, as mais comuns encontradas na prática.

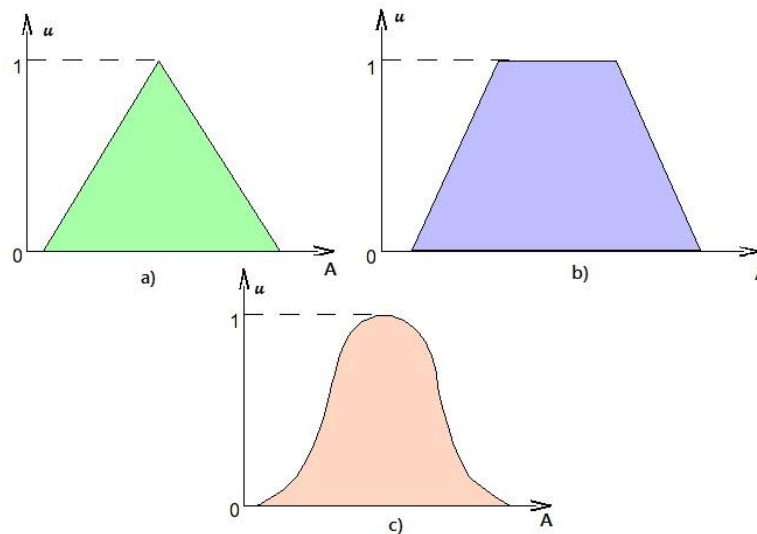


Figura 19- Algumas funções de pertinência. (a – função triangular; b – função trapezoidal; c – função gaussiana)
Fonte: Adaptado de Ross (1995)

A principal razão para considerar outros tipos de funções de pertinência é que os valores usados são, muitas vezes, excessivamente precisos. Exigem que cada elemento do universo X no qual o conjunto *fuzzy* esteja definido seja atribuído um valor de grau de pertinência específico, $\mu_A(x)$ (ROSS, 1995). A quantidade de funções em um universo de discurso e seu formato são escolhidos com base na experiência e na natureza do processo a ser controlado ou representado.

3.5.3 Sistemas *Fuzzy*

Para muitos sistemas práticos as informações importantes vêm de duas fontes: uma são os especialistas humanos - que descrevem seu conhecimento sobre o sistema em linguagens naturais; e a outra são medidas sensoriais e modelos matemáticos propostos de acordo com leis físicas. Uma tarefa importante, portanto, é combinar esses dois tipos de informação em projetos de sistemas (HENDERSON, 2009).

O sistema de inferência *fuzzy* (Figura 20) consiste em uma interface de fuzzificação, uma base de regra, um banco de dados, uma unidade de tomada de decisão ou unidade de inferência e, finalmente, uma interface de defuzzificação.

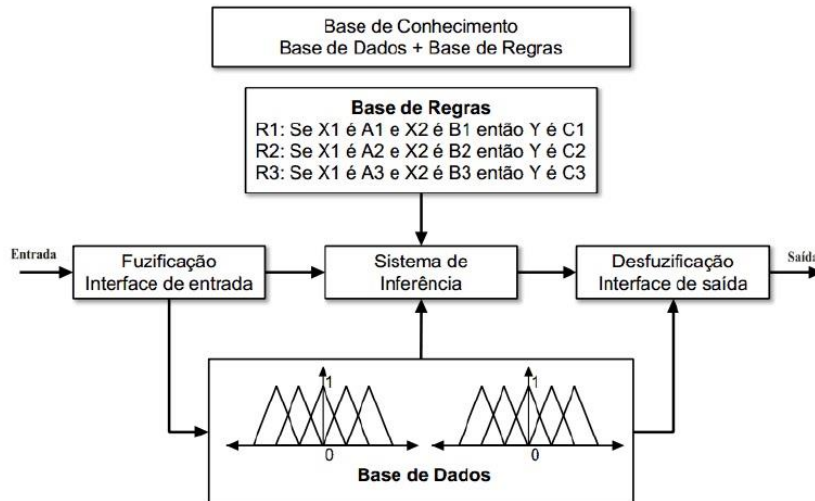


Figura 20- Sistema fuzzy de inferência
Fonte: Adaptado de Ross (1995)

A função de cada bloco é a seguinte:

- Uma base de regras contendo um número de regras *fuzzy* “se-então”;
- Uma base de dados que define as funções de associação dos conjuntos difusos utilizados nas regras *fuzzy*;
- Uma unidade de decisão que realize as operações de inferência nas regras;
- Uma interface de fuzzificação que transforma as entradas nítidas (*crisp*) em graus da correspondência com valores linguísticos e
- Uma interface de defuzzificação que transforma os resultados *fuzzy* da inferência em uma saída “*crisp*”.

3.5.4 Base de Regras

Os sistemas *fuzzy* são sistemas baseados em conhecimento ou baseados em regras. O coração de um sistema *fuzzy* é uma base de conhecimento, que consiste nas chamadas Regras de Produção - “se-então”. Talvez a maneira mais comum de representar o conhecimento humano seja formá-lo em expressões de linguagem natural do tipo SE premissa (antecedente) e ENTÃO conclusão (consequente). Um sistema *fuzzy* é construído a partir de uma coleção dessas regras *fuzzy* “se-então”. (ROSS, 1995). Em uma forma mais explícita, se houver n regras, cada uma com K premissas em um sistema, a i -ésima regra tem a seguinte forma mostrada pela Equação (12):

$$\text{Se } a_1 \text{ é } A_{i,1} \text{ e } a_2 \text{ é } A_{i,2} \text{ e } \dots \text{ e } a_k \text{ é } A_{i,k} \text{ Então } B_i \quad (12)$$

Ao utilizar se de variáveis linguísticas e de regras *fuzzy* SE-ENTÃO, o sistema *fuzzy* explora a tolerância à imprecisão e à incerteza e, dessa forma, imita a capacidade crucial da mente humana para resumir dados e se concentrar em informações relevantes para a decisão.

3.5.5 Fuzzificação

As entradas são limitadas no universo de discurso em questão e associada a um grau de pertinência em cada conjunto *fuzzy* através do conhecimento do especialista. Então, para obter o grau de pertinência de uma determinada entrada *crisp*, basta buscar esse valor na base de conhecimento do sistema *fuzzy*. Para o exemplo em questão, têm-se os conjuntos *fuzzy* e graus de pertinência para cada uma das variáveis de entrada, conforme mostrado na Figura 21.

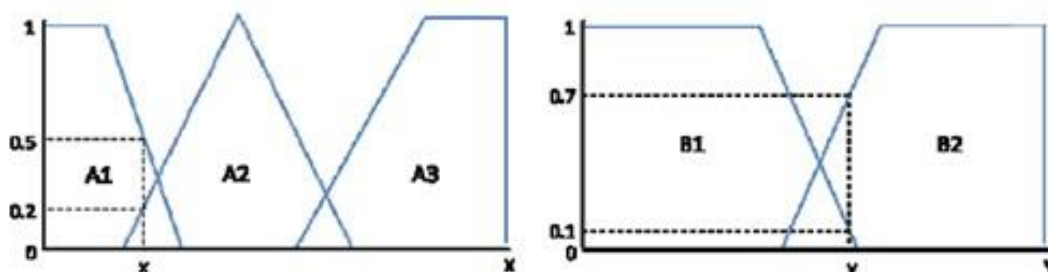


Figura 21- Fuzzificação das variáveis entradas para domínio dos conjuntos fuzzy
Fonte: Adaptado de Simões e Shaw (2007)

A fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio *fuzzy* (SIMÕES e SHAW, 2007). Essa etapa obtém o grau de pertinência a que cada entrada pertence em cada conjunto *fuzzy*.

3.5.6 Sistema de Inferência

A inferência é o módulo mais importante de um sistema *fuzzy*, pois é aqui que se calcula qual decisão tomar. Em um mecanismo de inferência *fuzzy*, os princípios da lógica *fuzzy* são usados para combinar as regras *fuzzy* “se-então” na base da regra *fuzzy* em um mapeamento de um conjunto *fuzzy* A de entrada com um universo de discurso U para um conjunto *fuzzy* B de saída, com um universo de discurso V. No estágio de inferência, ocorrem as operações com conjuntos *fuzzy* ao longo de regras “se-então” para processar as informações da entrada e produzir uma conclusão (JANG et al., 1997).

Há uma variedade de opções de mecanismos de inferência *fuzzy*, especificamente, têm-se as seguintes alternativas dentro da inferência baseada em composição: implicação de Dienes-Rescher; implicação de Lukasiewicz; Implicação de Zadeh; implicação de Gödel; implicações de Mamdani ou implicações de Sugeno. Estas são algumas operações diferentes para as t-normas e s-normas nas várias fórmulas (WANG, 1996).

Os dois tipos mais importantes de método de inferência *fuzzy* são o método de inferência *fuzzy* de Mamdani e método Sugeno ou Takagi-Sugeno-Kang; o primeiro foi introduzido por Mamdani e Assilian no ano de 1975 (MAMDANI E ASSILIAN, 1975), e segundo por Sugeno no de 1985 (TAKAGI e SUGENO, 1985; SUGENO e KANG, 1988). A maioria dos sistemas baseados em regras envolve mais de uma regra e o processo de obtenção do consequente (conclusão) global dos consequentes individuais é conhecido como agregação de regras.

3.5.7 Defuzzificação

Defuzzificação é a conversão de uma quantidade *fuzzy* para uma quantidade precisa, assim como fuzzificação é a conversão de um valor *crisp* para uma quantidade *fuzzy*. A saída de um processo *fuzzy* pode ser a união lógica de duas ou mais funções de pertinência *fuzzy* definidas no universo do discurso da variável de saída. Há muitos métodos propostos na literatura nos últimos anos para defuzzificar funções de saída *fuzzy* (ROSS, 1995), e serão detalhados dois métodos mais usuais de defuzzificação, ou aqueles baseados no centro de gravidade do(s) conjunto(s) de saída (SIMÕES e SHAW, 2007).

Centro da Área – CoA (*Center of Area*): frequentemente chamado de método do centro de gravidade, pois calcula o centroide da área composta pela união de todas as contribuições de regras, este cálculo é feito de acordo com a Equação (13):

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^N u_i \cdot \mu_{out}(u_i)}{\sum_{j=1}^N \mu_{out}(u_i)} \quad (13)$$

em que $\mu_{out}(u_i)$ = área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *fuzzy*;

u_i = posição do centroide da função de pertinência individual;

3.5.8 Método de Inferência Mamdani

Os sistemas *Fuzzy* Mamdani foram originalmente projetados para imitar o desempenho de operadores humanos encarregados de controlar certos processos industriais (MAMDANI e ASSILIAN, 1975). O método de inferência é o mais usado na prática e na literatura. O objetivo era resumir a experiência do operador em um conjunto de regras “*Se-Então*” (linguísticas) que poderiam ser usadas por uma máquina para controlar automaticamente o processo. Especificamente, usando esse conjunto de regras “*Se-Então*”, um sistema *fuzzy* Mamdani define uma função f que gera saídas numéricas $y = f(x)$ a partir dos valores de entrada (geralmente numéricos) x . Assim, o método de inferência para um conjunto de regras conjuntivas para as r -ésima regras será dada pela Equação (14):

$$\text{se } x_1 \text{ é } A_1^k \text{ e } x_2 \text{ é } A_2^k \text{ então } y^k \text{ é } B^k \text{ para } k = 1, 2, \dots, r \quad (14)$$

A Equação (14) tem uma interpretação gráfica muito simples, como visto na Figura 22. Ilustra a análise gráfica de duas regras, onde os símbolos A_{11} e A_{12} se referem ao primeiro e segundo antecedentes *fuzzy* da primeira regra, respectivamente e o símbolo B_1 refere-se ao consequente *fuzzy* da primeira regra. Os símbolos A_{21} e A_{22} referem-se ao

primeiro e segundo antecedentes *fuzzy*, respectivamente, da segunda regra e o símbolo B_2 refere-se ao consequente *fuzzy* da segunda regra.

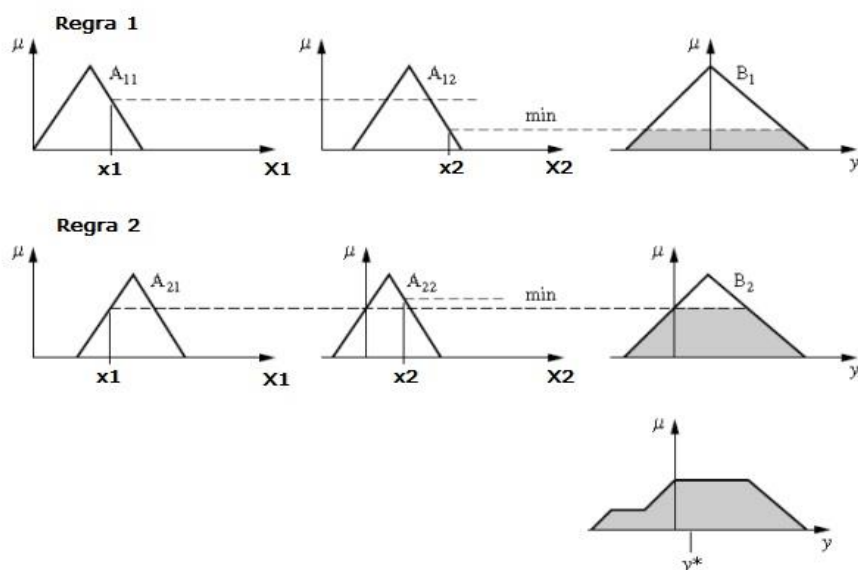


Figura 22- Interpretação gráfica do método Mamdani
 Fonte: Adaptado de Ross (1995)

Se o que se deseja é encontrar um valor discreto para a saída agregada, alguma técnica de defuzzificação apropriada poderia ser empregada para a função de associação agregada e um valor tal como y^* .

3.6 Comentários e Conclusão do Capítulo

Foram introduzidos os fundamentos teóricos relevantes para o desenvolvimento da pesquisa realizada. As inter-relações entre solo/água/clima/planta e algumas técnicas de medição de parâmetros físicos na agricultura foram apresentadas.

Os princípios da lógica *fuzzy* e a estrutura básica de um sistema *fuzzy* de inferência foram descritos, enfatizando as características que deverão ser usadas. Com base na linguagem natural, um sistema de lógica *fuzzy* é simples de entender e facilita a representação e o processamento de conhecimento humano em um computador. As entradas, saídas e regras da lógica *fuzzy* são fáceis de modificar. Estas características da lógica *fuzzy* a tornam particularmente bem adaptada para uso em sistema de suporte à decisão, podendo ajudar na construção de mapas de controle da irrigação por taxa

variável, baseada em resultados de um sistema de processamento de imagens, em tempo real ou por mapas prescritivos baseados na inter-relação solo-planta-atmosfera.

Capítulo 4

4. Metodologia

O presente capítulo apresentará o desenvolvimento do sistema inteligente de irrigação - *Fuzzy-VRI* (Figura 23). A estrutura do sistema permite a elaboração de forma sistemática e automatizada de mapa de manejo para controle da irrigação. Para facilitar a compreensão do processo construtivo, cada parte do sistema é detalhado individualmente.

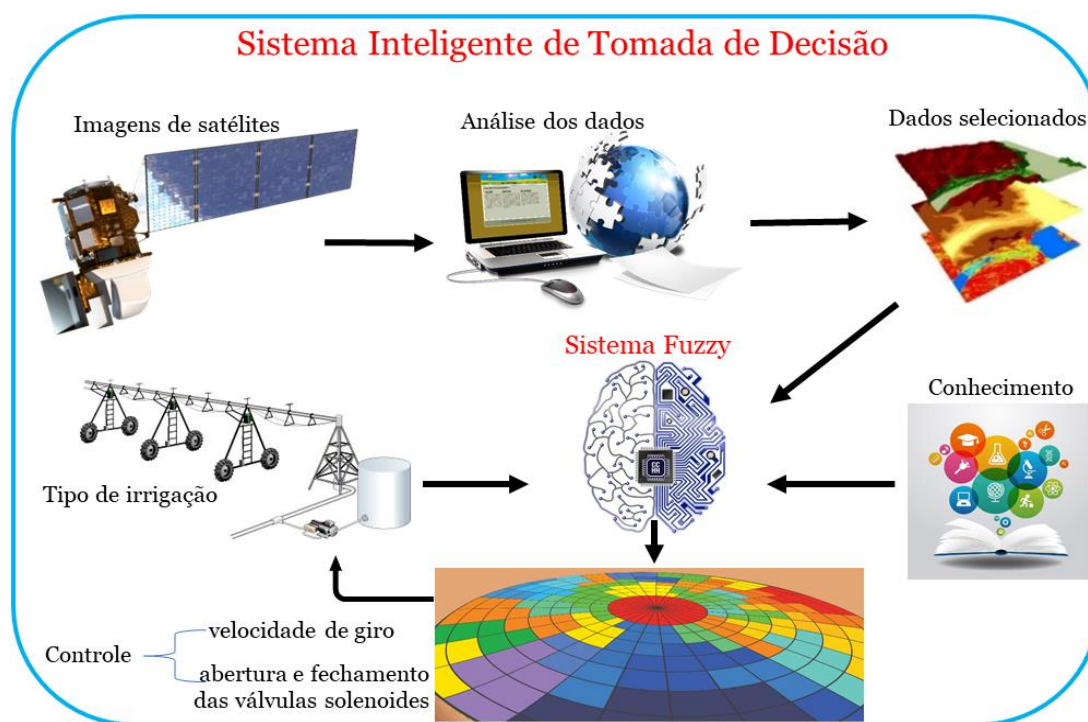


Figura 23- Estrutura do sistema inteligente de irrigação (Fuzzy-VRI)

O sistema inteligente de suporte à decisão foi construído para teste e validação em duas áreas de plantio, cujo sistema de gerenciamento de irrigação é tipo convencional. O levantamento dos dados de sensoriamento e dos dados para comparação foram adquiridos por meio de parcerias com as empresas comerciais e a Universidade de Nebraska, Lincoln, EUA.

4.1 Parcerias estabelecidas

Para ter acesso às especificações de projeto e construção do pivô central, foi estabelecida uma parceria com a empresa brasileira Fockink². Essas informações foram usadas na construção das funções de pertinências de saída e com o auxílio dos engenheiros da empresa, foi construído o método de comparação dos resultados obtidos, metodologia esta que é descrita na seção de resultados.

Para ter acesso aos dados (Apêndice B) reais de irrigação da área de plantio comercial para comparação dos resultados, foi estabelecida uma parceria com a empresa Sistema Irriga³, empresa que oferece um conjunto de serviços de manejo e monitoramento da irrigação. A empresa disponibilizou os dados de lâmina de irrigação de seu cliente, uma fazenda comercial cujo nome não teve a divulgação autorizada, localizada próximo da cidade de Ipiranga do Norte, no estado do Mato Grosso, Brasil, com uma área de aproximadamente 100 hectares.

Para ter acesso aos dados reais (Apêndice A) da pesquisa realizada em Barker et al. (2018), para comparação dos resultados, foi estabelecida uma parceria com a Universidade do Nebraska, Lincoln, em conjunto com Prof. Dr. Derek M. Heeren do Instituto de Agricultura e Recursos Naturais da mesma. O estudo desenvolvido por Barker e Heeren foi estruturado com dois tipos de sistemas de gerenciamento de irrigação: um é o sistema de irrigação por taxa variável baseado em sensoriamento remoto e balanço hídrico; e o outro é sistema de irrigação uniforme. A área plantada fica no laboratório de campo da área de recursos hídricos da universidade, e está localizada perto da cidade de Brule, no estado do Nebraska, EUA, com uma área de aproximadamente 50 hectares.

De posse dos locais de estudo e das informações de cada área de plantio, foi possível solicitar os dados do sensoriamento remoto para a empresa especializada. Para isso, foi estabelecida uma parceria com a empresa *i-ekbase*^{TM4} – *Intelligent Environmental Knowledgebase* e com Prof. Dr. Ritaban Dutta, pesquisador da CSIRO Data61 e CEO da empresa, que disponibilizou a ferramenta web (DUTTA et al., 2014), com uso limitado e gratuito para o estudo desenvolvido na presente Tese.

² <https://www.fockink.ind.br/>

³ <https://www.sistemairriga.com.br/>

⁴ <https://www.iekbase.com/>

4.2 Imagens de satélites

Para o estudo, as imagens de satélites e os dados de sensoriamento de cada área foram fornecidos pela *i-ekbase*, que disponibilizou via ferramenta web e com uso limitado e sem custos para a pesquisa. A ferramenta web forneceu os dados das áreas de estudo de casos, a Figura 24 ilustra um exemplo de imagem fornecida pela ferramenta *i-ekbase*.

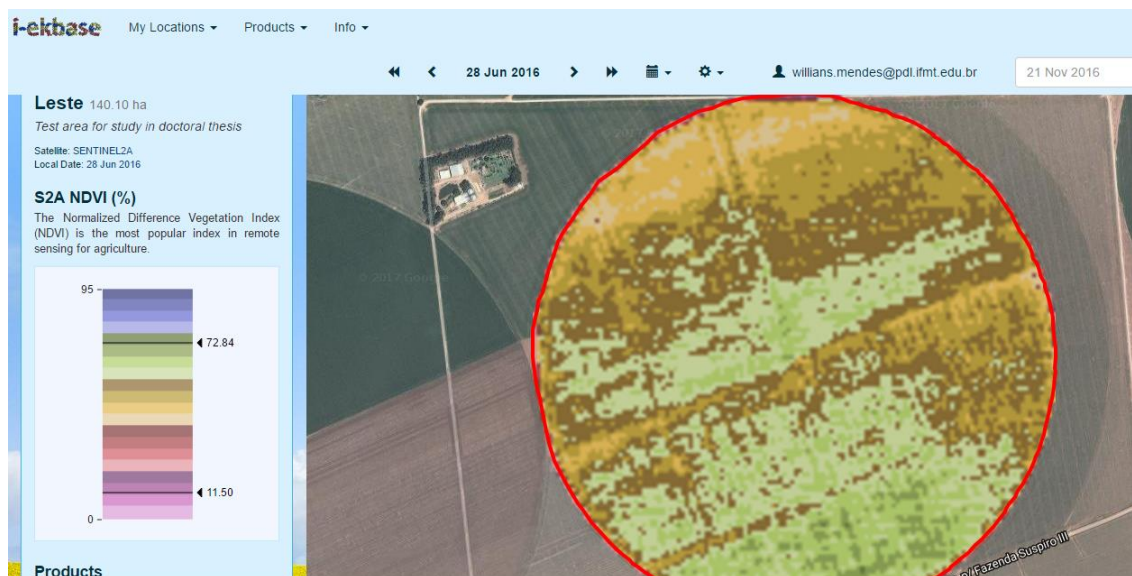


Figura 24- Imagens gerada pela web-ferramenta *i-ekbase*
 Fonte: Adaptado do sistema *i-ekbase*

Para o desenvolvimento do sistema *Fuzzy-VRI* experimental, foram processados 36 meses de dados, e essas imagens de sensoriamento remoto foram adquiridas pelo Landsat, com uma resolução espacial de 30 m. Os dados que constituem essa imagem possuem mais de 14 mil pontos georreferenciados, contendo em cada ponto ou pixel os atributos da análise agrícola.

4.3 Análise dos dados

Dentro da parceria que se estabeleceu com a *i-ekbase* para auxiliar o projeto de pesquisa, a empresa forneceu o processamento dessas imagens. Dessa forma, a processamento das variáveis de entrada ficaram fora do escopo do trabalho. A partir da escolha do local da plantação e das datas de análise, a empresa buscou as imagens dos satélites Landsat 7 e Landsat 8, depois as armazenam em um banco de dados e aplicaram

seus algoritmos de processamentos, cuja fundamentação teórica foi descrito no capítulo de referencial teórico.

4.4 Dados selecionados

Os dados disponíveis na plataforma do sistema i-ekbase e que melhor descreveriam a relação solo-planta-atmosfera para o sistema inteligente de irrigação (Tabela 02), são: índice de nitrogênio, SAVI, umidade próxima ao solo e temperatura do dossel. A correta seleção dos dados nesta etapa é fundamental para que todos os resultados sejam corretamente calculados. E a determinação de quais variáveis seriam usadas na pesquisa contou com auxílio de especialistas da área, o professor Dr. Derek M. Hereen e o professor Dr. Ritaban Dutta.

Tabela 2 - Dados exportados pela web-ferramenta i-ekbase*

Latitude	Longitude	Nitrogênio (%)	SAVI (%)	Umidade próxima ao solo (%)	Temperatura de dossel (°C)
-12,06369615080010	-56,11719865923520	0,010	3,800	9,770	28,900
-12,06369615080010	-56,11710979462750	0,010	3,500	9,760	29,000
-12,06369615080010	-56,11568796090330	0,010	3,530	7,680	25,350
-12,06369615080010	-56,11559909629560	0,600	3,620	7,970	25,370
-12,06341985764160	-56,11471045021800	3,760	11,650	7,350	24,870
-12,06332775992210	-56,11835389913610	2,600	33,400	14,310	27,330
-12,06332775992210	-56,11826503452840	2,790	27,540	13,900	27,520
-12,06332775992210	-56,11817616992060	3,000	20,290	13,270	27,710
-12,06332775992210	-56,11808730531280	3,290	13,640	12,570	27,800
-12,06332775992210	-56,11799844070510	3,570	8,660	11,880	27,840
-12,06332775992210	-56,11790957609730	3,810	6,780	11,260	27,810
-12,06332775992210	-56,11782071148960	3,920	6,560	10,750	27,830
-12,06332775992210	-56,11773184688180	3,970	6,570	10,320	27,910
-12,06332775992210	-56,11764298227400	3,950	6,340	10,000	28,090

* devido à extensão dos dados será mostrado apenas algumas linhas.

Fonte: Adaptado do sistema i-ekbase.

Os índices de vegetação apresentam valores maiores em áreas irrigadas quando comparados às áreas não irrigadas. Esse tipo de resposta espectral é esperado, visto que áreas irrigadas tendem a apresentar maior vigor vegetativo devido a maiores trocas gasosas entre as folhas e a atmosfera, conseqüentemente, a uma maior absorção do

vermelho visível para o processo fotossintético, demonstrando comportamento mais saudável (GUTIERREZ et al., 2012).

As plantas sob déficit hídrico do solo muitas vezes fecham os estômatos, reduzindo assim a transpiração no intuito de reduzir a perda de água para a atmosfera, porém, isso leva ao aumento da temperatura da folha (GARCÍA-TEJERO et al, 2011). A umidade do solo derivada de sensoriamento remoto é responsável apenas pelas camadas próximas à superfície do solo (0–5 cm) (GUPTA et al., 2016).

Essas informações da umidade do solo próxima à superfície são usadas para determinar os parâmetros hidráulicos efetivos do solo para toda a zona radicular. Estudos apontam a existência de uma correlação entre a umidade do solo próxima à superfície e abaixo da superfície e, portanto, quaisquer perturbações (por exemplo, aquelas causadas pelas atividades das plantas) que ocorrem na superfície do solo podem se propagar para baixo, influenciando processos hidrológicos por baixo (ABBASPOUR et al., 2001; INES e MOHANTY, 2008; WALKER et al., 2001).

Alterações no teor de nitrogênio (N) das folhas podem também ser observadas usando índices espectrais que permitem avaliar as condições das culturas e o estado geral do dossel, estimar a biomassa e estabelecer padrões para o manejo nutricional das culturas, levando a uma alta produtividade (ZARCO-TEJADA et al., 2012; BRITO et al., 2011). O desenvolvimento do sistema radicular da planta é fortemente sensível e influenciado pelo N encontrado no solo. Assim, a detecção de nitrogênio pelo sensoriamento remoto permite uma rápida detecção de problemas exclusivamente atrelados a déficit hídricos (FAGERIA e BALIGAR, 2005; RATHKE et al., 2005).

4.5 Sistema *Fuzzy*

Para a criação do mapa de controle para cada área de estudo foi desenvolvido um sistema IA capaz de manipular os dados e o conhecimento e que auxilia na determinação da velocidade de giro do pivô central, bem como inferir qual será o percentual de abertura e fechamento das válvulas dentro de uma zona de irrigação. A técnica de inteligência artificial escolhida para integrar o sistema de tomada de decisão é um Sistema *Fuzzy* (Figura 25).

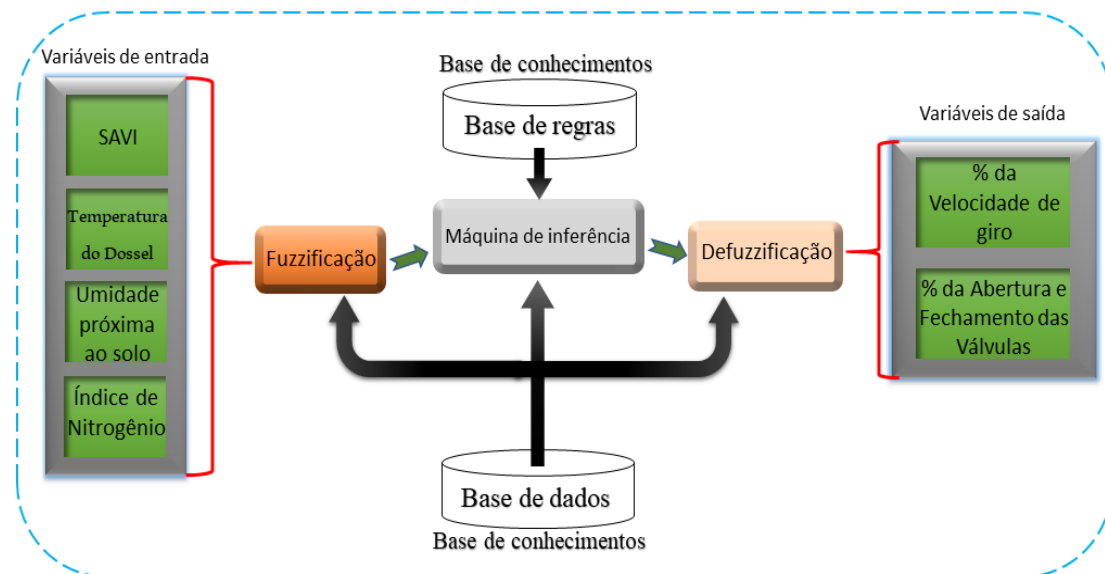


Figura 25- Estrutura do sistema fuzzy

A peça-chave desta etapa é um sistema *fuzzy* com mecanismo de inferência Mamdani (MAMDANI E ASSILIAN, 1975). Para fins de sistematização, sua construção é apresentada em quatro partes: Fuzzificação das variáveis de entrada; Construção da base de regras; Máquina de inferência e Defuzzificação das variáveis de saída.

4.5.1 Fuzzificação

Fuzzificação é a conversão de valores numéricos nítidos em quantificadores linguísticos (ROSS, 1995) e realizada usando as funções de pertinência. Cada função avalia quão bem a variável linguística pode ser descrita por um qualificador *fuzzy* específico. Essa adequação é frequentemente descrita como o grau de pertinência. Para a fuzzificação dos dados de entrada, serão utilizadas funções de pertinência cuja definição de forma foi realizada a partir da interpretação dos dados de satélites fornecidos pela empresa i-ekbase. As funções de pertinência em forma de triangular ou trapezoidal foram escolhidas pela simplicidade de construção (PEDRYCZ, 1994).

Inicialmente, foram escolhidas para cada variável de entrada (índice de nitrogênio, SAVI, umidade próxima ao solo e temperatura do dossel) cinco variáveis linguísticas: Muito Baixo (MB), Baixo (B), Médio (M), Alto (A) e Muito Alto (MA), tendo a função de pertinência triangular e divididas de forma igual (“*grid partition*”) (PEDRYCZ e GOMIDE, 1998). Para escrever cada uma das variáveis de entrada em termos de variáveis

linguísticas, usou-se a mesma abordagem encontrada em Bahat et al., 2000 e Touati et al., 2013, além do aconselhamento de um especialista da área, o Prof. Dr. Derek M. Heeren do departamento de engenharia de sistemas biológicos.

Porém, quando o sistema de inferência *fuzzy* contém mais de uma variável de entrada, o antecedente da regra “*If-Then*” sempre pode ser definido por mais de um conjunto linguístico *fuzzy*, porque na maioria dos casos cada variável de entrada possui um conjunto *fuzzy* correspondente com base no qual grau de pertinência. Aqui, o operador *fuzzy* é obrigado a combinar dois ou mais valores de pertinência do conjunto e, em seguida, obtém um valor numérico que representa o resultado do antecedente para esta regra (MENDEL, 1995; JANG et al., 1997). Os operadores *fuzzy* mais comuns são a operação *AND* – função de mínimo – e *OR* – função de máximo. Para formular essas operações lógicas, as funções de mínimo serão aplicadas.

Dessa forma, com quatro variáveis de entrada e cinco variáveis linguísticas para cada uma, o número de regras possível pode ser encontrado aplicando-se a Equação (15).

$$NR = VL^{VE} \quad (15)$$

onde, NR = Número total de Regras;
 VL = Número de Variáveis Linguísticas;
 VE = Número de Variáveis de Entrada;

Então: $NR = 5^4 = 625$. O quantitativo de 625 regras é expressivo para uma proposta metodológica que ainda necessitaria de ajustes manuais, dessa forma, optou-se por reduzir o número de variáveis linguísticas e usar também funções de pertinência trapezoidais para fuzzificação.

4.5.2 Base de conhecimentos

A base de conhecimento consiste em uma base de regras, caracterizando a estratégia de decisão. Adicionalmente, a base de dados armazena as definições necessárias sobre normalizações dos universos de discurso, as partições fuzzy dos espaços de entrada e saída, assim como as definições das funções de pertinência.

4.5.2.1 Base de dados das variáveis de entrada da fazenda comercial

De posse dos dados de irrigação fornecidos pela empresa Sistema Irriga, foi possível utilizar os dados do sensoriamento remoto para a empresa *i-ekbase*. Dessa forma, as variáveis de entrada (Tabela 03) se resumem a oito datas analisadas.

Tabela 3 - Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada para fazenda comercial

Variáveis de entrada para cultura de feijão								
Data	Índice de nitrogênio (%)		SAVI (%)		Umidade próxima ao solo (%)		Temperatura do Dossel (°C)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
17/jun/2018	0,01	4,19	00,11	32,93	8,31	25,58	10,92	24,31
27/jun/2018	0,01	4,19	01,07	49,79	0,12	15,51	25,44	31,34
05/jul/2018	2,11	3,98	08,49	48,60	0,35	12,48	27,75	32,96
29/jul/2018	1,84	2,60	31,72	70,94	0,12	09,94	24,22	29,39
06/ago/2018	1,85	2,54	30,41	73,69	0,13	09,60	21,94	24,94
14/ago/2018	1,82	2,96	23,75	80,12	4,87	14,26	25,24	30,99
22/ago/2018	1,83	2,48	30,90	77,06	8,69	14,34	22,39	27,34
27/ago/2018	1,83	2,79	26,66	75,36	7,47	18,07	23,33	31,97

Do mesmo modo que as funções de pertinências foram construídas usando o método de *grid partition*. Assim, ao selecionar os valores máximos de cada variável de entrada, foi possível estabelecer todo o universo de discurso. As Figuras 26, 27, 28 e 29 a seguir mostram os conjuntos *fuzzy* para cada variável após ajustes.

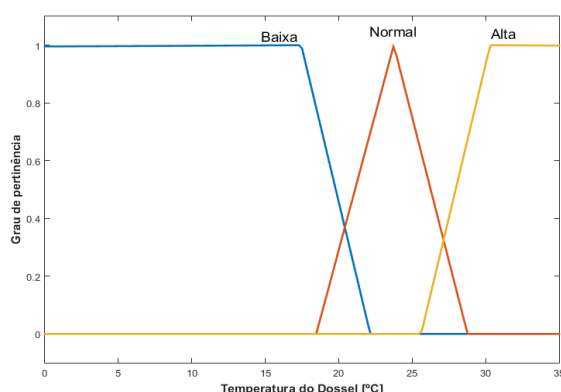


Figura 26- Conjunto fuzzy para a Temperatura do Dossel

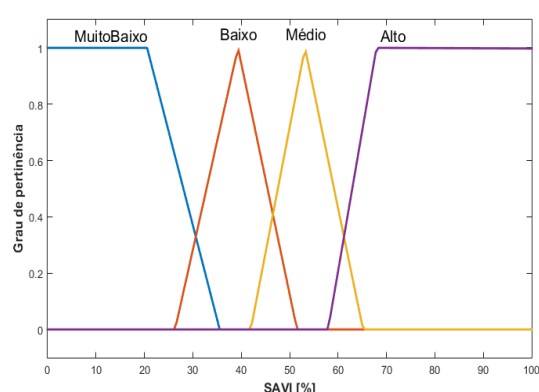


Figura 27- Conjunto fuzzy para o SAVI

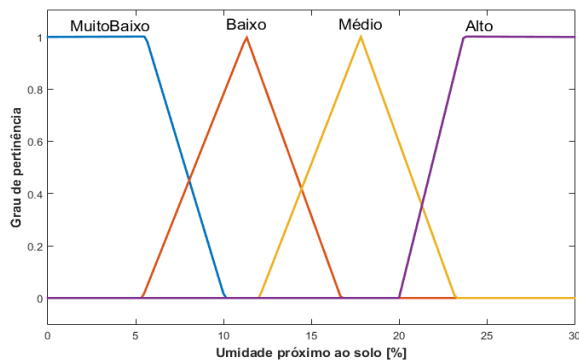


Figura 28- Conjunto fuzzy para a Umidade próxima ao solo

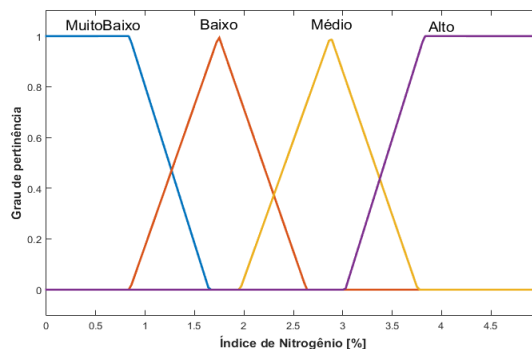


Figura 29- Conjunto fuzzy para o Índice de Nitrogênio

Após os ajustes e a redução das variáveis linguísticas o número de regras a serem construídas baixou para 192, tornando, assim, o ajuste manual do sistema menos trabalhoso.

4.5.2.2 Base de dados das variáveis de entrada do laboratório de campo em Brule, EUA

De posse dos dados de irrigação fornecidos pela Universidade do Nebraska, Lincoln, foi possível solicitar os dados do sensoriamento remoto para a empresa *i-ekbase*. Dessa forma, as variáveis de entrada (Tabela 04) se resumem a sete datas analisadas.

Tabela 4 - Valores máximos e mínimos das variáveis de entrada para campo experimental em Brule, EUA

Variáveis de entrada para cultura de milho								
Data	Índice de nitrogênio (%)		SAVI (%)		Umidade próxima ao solo (%)		Temperatura do Dossel (°C)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
24/jun/2016	2,23	3,92	8,32	42,68	2,85	14,61	30,66	32,42
10/jul/2016	1,90	3,35	14,74	67,56	10,00	20,82	28,12	34,88
26/jul/2016	1,87	2,45	35,3	74,78	11,28	21,36	24,13	27,85
11/ago/2016	1,88	2,91	20,92	72,77	10,78	21,06	26,13	31,03
19/ago/2016	1,87	2,34	38,72	71,86	10,44	18,45	22,81	32,05
12/set/2016	1,91	3,46	11,69	66,15	11,13	23,51	26,73	32,06
20/set/2016	2,03	2,97	20,73	52,63	05,53	20,13	17,04	24,58

Do mesmo modo as funções de pertinências foram construídas usando o método de *grid partition*. Dessa forma, ao selecionar os valores máximos de cada variável de entrada, foi possível estabelecer todo o universo de discurso. As Figuras 30, 31, 32 e 33 a seguir mostram os conjuntos *fuzzy* para cada variável após ajustes.

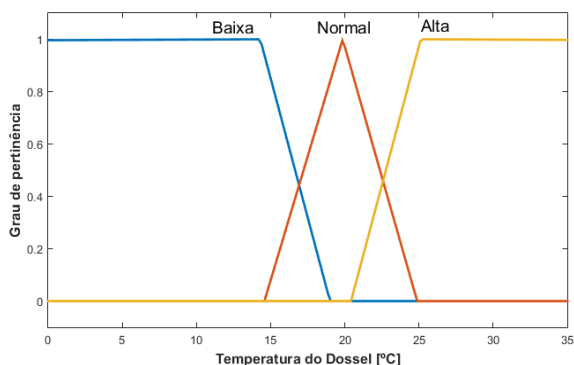


Figura 30- Conjunto fuzzy para a Temperatura do Dossel

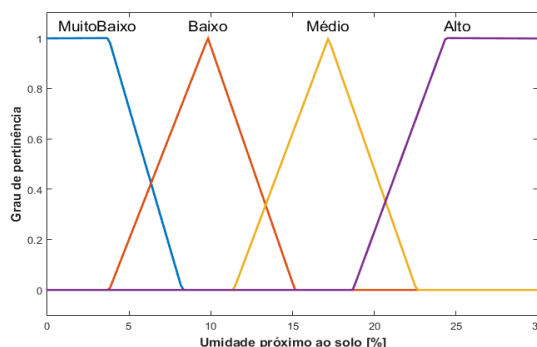


Figura 31- Conjunto fuzzy para a Umidade próxima ao solo

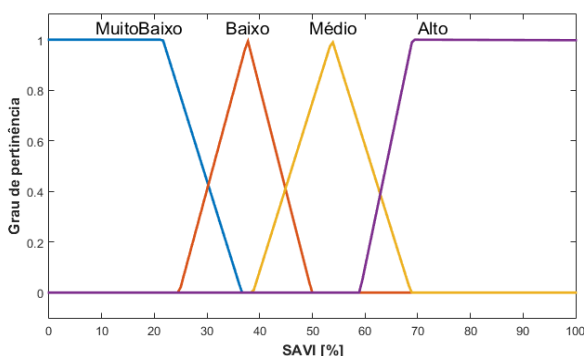


Figura 32- Conjunto fuzzy para o SAVI

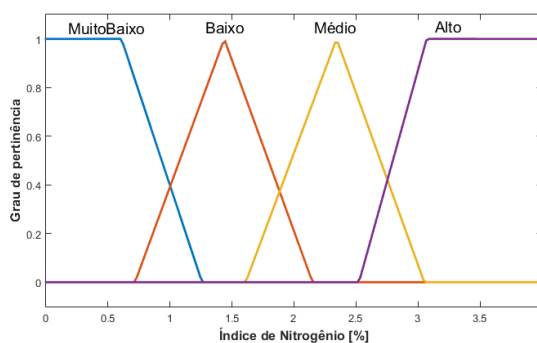


Figura 33- Conjunto fuzzy para o Índice de Nitrogênio

4.5.2.3 Base de dados das variáveis de saída

A elaboração de um projeto de aspersão para um pivô central é muito complexa e não fez parte do escopo do trabalho, assim não foi discutida no texto. Para substituir esse procedimento foi escolhida uma abordagem mais simples que foi desenvolvida em conjunto com a equipe de engenheiros da fabricante brasileira de pivô central – a Fockink, que mesmo não podendo disponibilizar informações de projeto contribuiu com algumas informações para simplificação do processo.

No caso prático, o pivô não tem controle de válvulas, aliás, o fabricante brasileiro ainda não comercializa pivôs centrais com sistema de controle para válvulas. O engenheiro Anderson Ricardo Seitenfus, gerente de negócios internacionais da Fockink, forneceu dados de especificações do equipamento para que fosse possível realizar a fuzzificação dos valores de controle de velocidade e da abertura das válvulas.

4.5.2.3.1 Base dados para Velocidade de giro

O controle de velocidade dos pivôs centrais trabalha com a implicação percentual de velocidade, comumente conhecido como percentímetro (BERNARDO et al., 2006, SILVA e AZEVEDO, 1998). Isso quer dizer que, na velocidade máxima de 100%, o motor da última torre fica continuamente em movimento, e caso seja regulado para 50% da velocidade máxima, isso implicará a situação em que o tempo de parada do motor é igual ao de movimento corresponde. Quanto maior o tempo necessário para o pivô central dar um giro completo, maior será a lâmina aplicada por ele. Desse modo, para aumentar a lâmina aplicada por rotação, tem-se que reduzir a velocidade de rotação do pivô e vice-versa.

Ademais, por não haver na literatura informações sobre as características pontuais sobre a definição do que seria alta velocidade ou baixa velocidade, decidiu-se, com base nos conhecimentos dos especialistas, estabelecer faixas de velocidade para os pivôs centrais instalados na fazenda comercial em Mato Grosso e na área experimental da Universidade do Nebraska (Figuras 35 e 36).

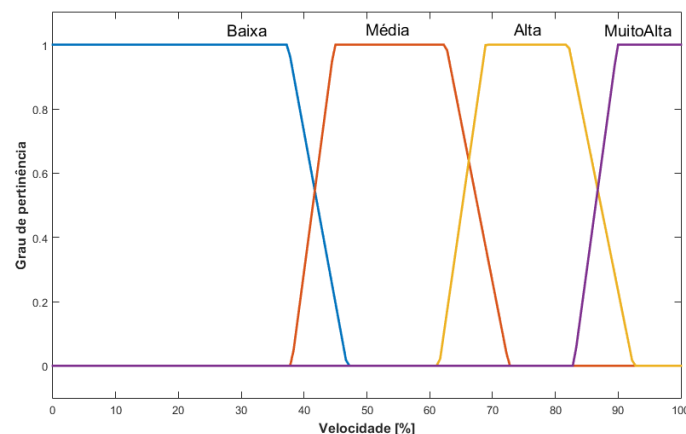


Figura 34- Conjunto fuzzy de saída para Velocidade de giro do pivô central instalado na fazenda comercial em Mato Grosso

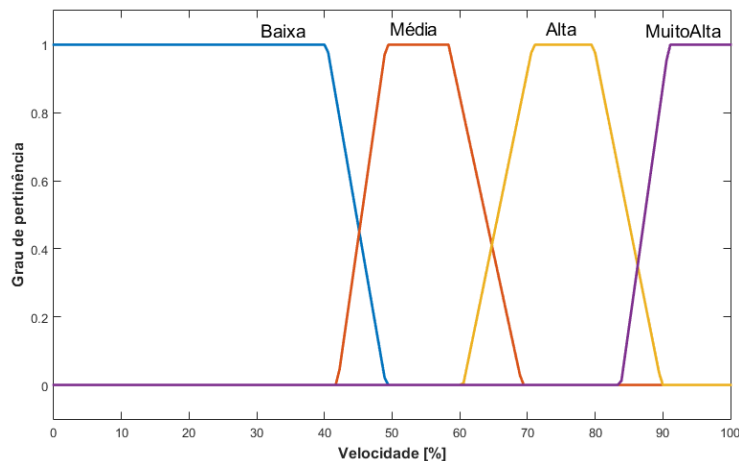


Figura 35- Conjunto fuzzy de saída para Velocidade de giro do pivô central instalado na área experimental no Nebraska, EUA

Dessa forma, devido à variação da velocidade estar condicionada dentro de uma faixa que vai de 0% a 100%, optou-se por variáveis linguísticas: Muito Alta (MA) = 90%-100%; Alta (A) = 70%-80%; Média (M) = 50%-60%; e Baixa (B) = 0%-40%, valores escolhidos inicialmente e com base nas informações obtidas na literatura e de especialistas aqui já mencionados. A escolha de apenas 4 (quatro) variáveis linguísticas está diretamente ligada à limitação do quantitativo de regras. Após os ajustes e sintonias do sistema, os conjuntos *fuzzy* de saída para velocidade para cada um dos pivôs se diferem muito pouco, ficando a maior diferença nas variáveis linguísticas Média e Alta.

4.5.2.3.2 Base de dados para Abertura das válvulas aspersoras

Pivôs, em geral, possuem válvulas com abertura fixas, mas para estudos mais específicos são programadas variações fixas de aberturas (SILVA e AZEVEDO, 1998; BERNARDO et al., 2006; PHOCAIDES, 2007; HEZARJARIBI, 2008; MORENO et al., 2012; O'SHAUGHNESSY et al., 2015; HAGHVERDI et al., 2016; COLAIZZI et al., 2017; SUI e YAN, 2017; BARKER et al., 2018; SHI et al., 2019). Em nenhuma literatura ou estudo foi encontrada uma relação ou controle de válvula da forma que se propõe na Tese.

Dessa forma, decidiu-se, com base nos conhecimentos dos especialistas, estabelecer faixas para as aberturas proporcionais das válvulas aspersoras dos pivôs centrais

instalados na fazenda comercial em Mato Grosso e na área experimental da Universidade do Nebraska (Figuras 37 e 38).

Assim, optou-se por variáveis linguísticas: Grande (G) = 90%-100%; Média (M) = 60%-80%; Pequena (P) = 30%-50%; e Muito Pequena (MP) = 0%-20%, valores escolhidos inicialmente e com base nas informações obtidas na literatura e de especialistas aqui já mencionados. A escolha de apenas 4 (quatro) variáveis linguísticas está diretamente ligada à limitação do quantitativo de regras, também.

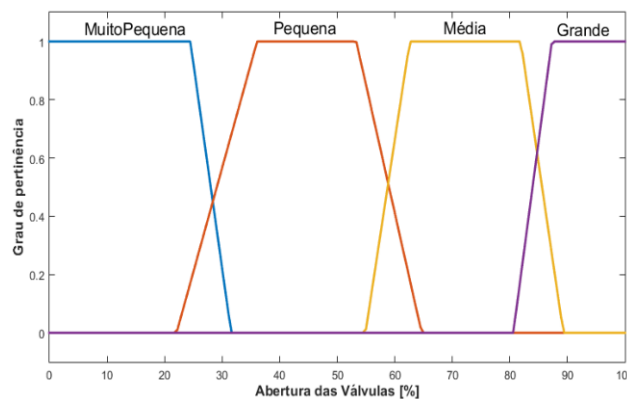


Figura 36- Conjunto fuzzy de saída para controle das Válvulas do pivô central instalado na fazenda comercial em Mato Grosso

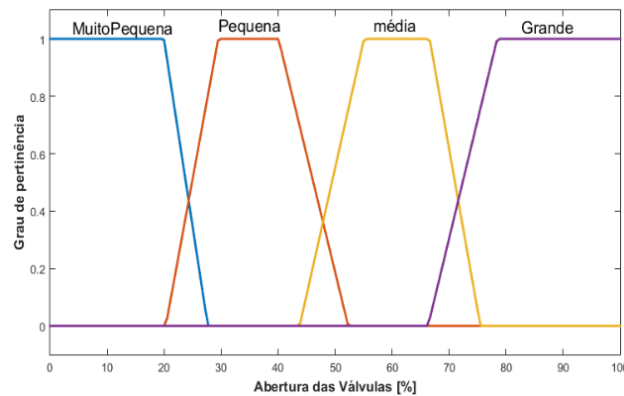


Figura 37- Conjunto fuzzy de saída para controle das Válvulas do pivô central instalado na área experimental no Nebraska, EUA

Após os ajustes e sintonias do sistema, os conjuntos *fuzzy* de saída para controle das válvulas de cada um dos pivôs possuem diferenças importantes. A primeira está nos valores encontrados para a função de pertinência Grande e a segunda está em relação à função de pertinência Média, e a última diferença ficou por conta da variável linguística Pequena.

Essas diferenças impactam no volume de água a ser irrigado, o que confirma a teoria de tipos diferentes de plantações necessitam de diferentes volumes de irrigação (BERNARDO et al., 2006).

4.5.3 Base de Regras

Para a construção da base de regras, do tipo “se-então” do sistema de inferência *fuzzy* desenvolvido, foram analisados os métodos e os procedimentos descritos formalmente nos capítulos anteriores. A Tabela 05 é uma ferramenta auxiliar para a construção das 192 regras (ver Apêndice C), o desenvolvimento dessa tabela contou com ajuda dos especialistas Dr. Derek M. Hereen e Dr. Ritaban Dutta.

Tabela 5 - Implicação das variáveis de entrada para controle da velocidade e das válvulas

Variáveis de entrada		Qual implicação para Velocidade do pivô central				Qual implicação para abertura das válvulas do pivô central			
		Baixa	Média	Alta	Muito Alta	Pequena	Média	Grande	Muito Grande
Índice de Nitrogênio [%]	MuitoBaixo			X		X			
	Baixo			X		X			
	Médio		X				X		
	Alto	X						X	
SAVI [%]	MuitoBaixo	X							X
	Baixo	X						X	
	Médio		X				X		
	Alto			X			X		
Umidade próximo ao solo [%]	MuitoBaixo	X							X
	Baixo	X						X	
	Médio		X				X		
	Alto				X	X			
Temperatura do Dossel [°C]	Baixo				X	X			
	Normal		X				X		
	Alto	X							X

O sistema *fuzzy* desenvolvido constitui um problema multivariável, onde o antecedente de uma regra tem várias partes e o consequente da regra também tem várias partes. Apesar de haver várias formas de se lidar com a construção desse tipo de sistema

(GUPTA et al., 1986; GEGOV e FRANK, 1995; GE et al., 2014), optou-se por uma abordagem direta com a construção do sistema de uma única vez:

*SE Índice de Nitrogênio é **MuitoBaixo** e SAVI é **MuitoBaixo** e Umidade próximo ao solo é **MuitoBaixo** e Temperatura do Dossel é **Baixo** - ENTÃO Velocidade é **Alta** e Abertura da válvula é **Grande**.*

As regras foram criadas de acordo com a implicação (Tabela 05) que cada variável de entrada possui em relação ao estresse hídrico, e foram também levados em consideração os elementos construtivos do pivô central. Não houve mudanças nas regras para aplicação nos dois locais de experimentos. Tanto para a área da fazenda comercial em Mato Grosso quanto para a área de estudos da universidade do Nebraska, EUA, foram usados, no sistema *fuzzy*, a mesma base de regras, pois se deu a mesma interpretação para cada variável de entrada nos dois locais de estudo.

4.5.4 Inferência *Fuzzy*

Para a máquina de inferência (Figura 39), foi escolhido o método de Mamdani (MAMDANI E ASSILIAN, 1975), mais simples e intuitivo do que o método de inferência de Takagi-Sugeno-Kang (TAKAGI e SUGENO, 1985; SUGENO e KANG, 1988). Tal método é utilizado em diversos trabalhos relacionados com sistemas de irrigação (BAHT et al., 2000; YANG et al., 2003; CALVO e ESTRADA, 2009; KWEON, 2012; PAPAGEORGIOU et al., 2016). Neste trabalho, o conectivo lógico “e”, modelado pela t-norma \wedge (mínimo), foi usado.

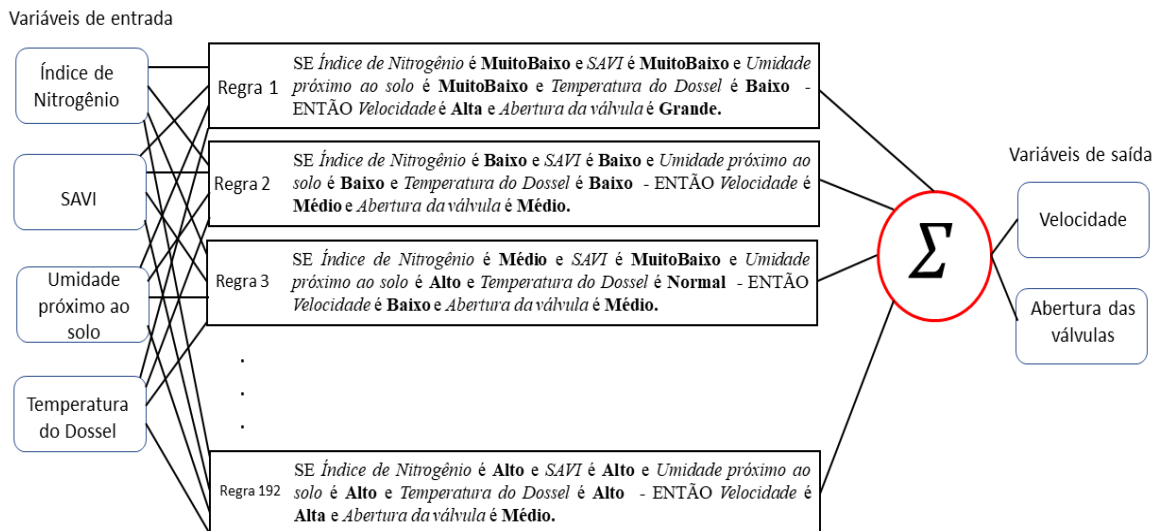


Figura 38- Sistema Fuzzy Mamdani

O processo de construção de um sistema *fuzzy* com método Mamdani pode ser pensado da seguinte forma: primeiro, há a conversão das entradas “*crisp*” em entradas *fuzzy* usando a função de pertinência. Então, (2) determinação das regras *fuzzy* necessárias. Depois, (3) a inferência com base nas regras. Então, (4) o consequente da regra é determinado juntando a força da regra e a saída da função de pertinência. A seguir, (5) todos os consequentes devem ser combinados para obter a distribuição de saída. Finalmente, (6) a distribuição de saída é defuzzificada.

O mapeamento fornece uma base a partir da qual as decisões podem ser tomadas ou os padrões discernidos. Na inferência do tipo Mamdani, as funções de pertinência de saída são conjuntos *fuzzy*, também. Após cada uma das regras “*If-Then*” que geram um conjunto *fuzzy* modificado como saída, o método de agregação é implementado para combinar esses conjuntos difusos que representam as saídas das regras em um único conjunto difuso para tomar uma decisão. O conjunto *fuzzy* combinado final é a saída do processo de agregação, e cada variável de saída do sistema de inferência *fuzzy* terá um único conjunto *fuzzy* combinado correspondente para referência.

A função max, sum e OR probabilístico são aplicáveis à operação de agregação (DUBOIS e PRADE, 1985), mas a função max é escolhida para toda a discussão nesta Tese porque é mais direta e bem aceita. Após o processo de agregação, há um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída que precisa ser defuzzificado.

4.5.5 Defuzzificação

A saída gerada pela Inferência de Mamdani é um subconjunto *fuzzy*. Quando tentamos resolver um problema de decisão, queremos que a saída seja um número (valor “*crisp*”) e não um conjunto *fuzzy*. Por fim, é preciso indicar qual valor real esta saída representa. A última etapa do processo de inferência *fuzzy* é a defuzzificação, através da qual o conjunto *fuzzy* combinado do processo de agregação produzirá uma única quantidade escalar. Como o nome indica, a defuzzificação é a operação oposta da fuzzificação.

Como no primeiro procedimento, os valores nítidos das variáveis de entrada são confundidos com um grau de pertinência com relação aos conjuntos *fuzzy*, o último procedimento extrai uma quantidade precisa do intervalo do conjunto *fuzzy* para a variável de saída. Entre os muitos métodos de defuzzificação propostos na literatura, o Método Centroide (também chamado centro de área ou centro de gravidade), que é o mais prevalente e fisicamente atraente de todos os métodos de defuzzificação (ROSS, 1995), é o único método adotado nesta Tese. Nesse método, calcula-se o centroide da área composta pela união de todas as contribuições de regras, este cálculo é feito de acordo com a Equação (13).

4.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo elucidou a forma que se dará a construção do sistema, apresentando como cada característica fundamental de um projeto de irrigação é adequada para se unir aos elementos básicos de sistema de *fuzzy*. Também, apresentou os métodos e os procedimentos para a construção dos mapas de controle do pivô central, além de estabelecer como se dará o pré-processamento dos vários tipos de dados fornecidos por diversos instrumentos de medidas.

Capítulo 5

5. Experimentos e resultados

Este capítulo expõe os resultados obtidos com o desenvolvimento do *Fuzzy-VRI* e mostra que o sistema é capaz de proporcionar um controle de zonas irrigáveis por meio de *setpoints* de velocidade e de abertura das válvulas dos aspersores para um pivô central apenas usando dados de sensoriamento remoto.

O sistema inteligente de suporte à decisão foi comparado com dois estudos de casos em duas regiões diferentes, com sistema de irrigação do tipo convencional. O primeiro estudo de caso é uma fazenda comercial, localizada próximo da cidade de Ipiranga do Norte, no estado do Mato Grosso, Brasil. E o segundo estudo de é o laboratório de campo de recursos hídricos da Universidade de Nebraska, Lincoln.

5.1 Ipiranga do Norte – Mato Grosso, Brasil

Neste estudo de caso, a área está localizada nas coordenadas 12° 03' 30.7" S, 56° 06' 58.5" W (Figura 40), uma fazenda localizada no município de cidade de Ipiranga do Norte, no estado do Mato Grosso, Brasil, com uma área de aproximadamente 100 hectares. Essa área foi semeada em 15 de junho de 2018 com feijão, 90 dias de cultura. O local é irrigado por meio de um pivô central da Fockink, que leva aproximadamente 14 horas para fazer o giro completo na velocidade máxima e com lâmina mínima de 6,1 mm.

5.1.1 Datas amostradas

Como descrito na metodologia, uma parceria foi estabelecida com a empresa Sistema Irriga®, que disponibilizou os dados de lâmina de irrigação de um cliente, conforme a Tabela 06 (Apêndice B).

O pivô em questão possui válvulas com abertura fixas, assim, possui especificações de tamanho de válvulas que proporcionam uma lâmina de irrigação 6,1 mm quando o

pivô central estiver com velocidade máxima, ou seja, 100% de velocidade. Nesse caso, essa implicação de velocidade faz com que o equipamento realize uma volta em 14 horas, e conforme a lâmina de irrigação aumenta, a velocidade diminui e o tempo para completar uma volta aumenta. Esse tipo de controle é comum em sistemas comerciais aqui no Brasil.

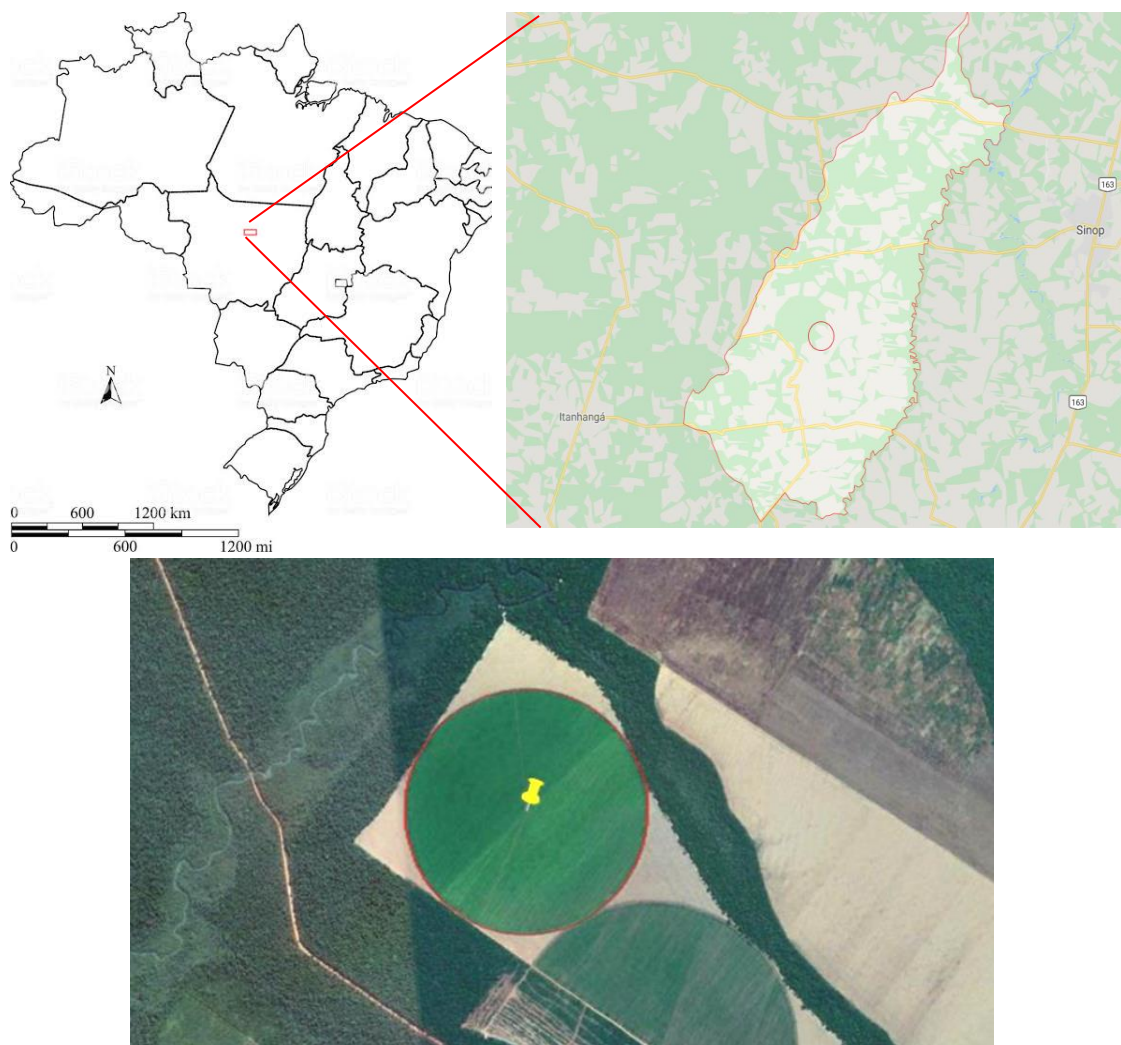


Figura 39- Área de estudo localizado no município de Ipiranga do Norte/MT
fonte: Google Earth

Tabela 6 - Datas dos eventos de irrigação programadas para área de Ipiranga do Norte/MT-Brasil

Datas			
Início do evento de irrigação	Fim do evento de irrigação	Lâmina real aplicada	Tempo para completar 1 giro
		[mm]	[horas]
15/06/2018	16/06/2018	6,1	14
17/06/2018	18/06/2018	6,1	14

23/06/2018	24/06/2018	6,1	14
25/06/2018	26/06/2018	6,1	14
27/06/2018	28/06/2018	6,1	14
30/06/2018	01/07/2018	6,1	14
03/07/2018	04/07/2018	6,1	14
07/07/2018	08/07/2018	8,71	20
10/07/2018	11/07/2018	8,71	20
12/07/2018	13/07/2018	8,71	20
14/07/2018	15/07/2018	8,71	20
16/07/2018	17/07/2018	7,17	16,5
19/07/2018	20/07/2018	7,17	16
25/07/2018	26/07/2018	10,16	24
27/07/2018	29/07/2018	12,22	28
30/07/2018	01/08/2018	13,51	31
02/08/2018	04/08/2018	13,55	31,5
06/08/2018	08/08/2018	13,55	31,5
10/08/2018	12/08/2018	13,55	31,5
12/08/2018	14/08/2018	13,55	31,5
14/08/2018	16/08/2018	13,55	31,5
16/08/2018	17/08/2018	8,93	20,5
18/08/2018	20/08/2018	13,55	31,5
20/08/2018	22/08/2018	13,55	31,5
28/08/2018	30/08/2018	13,55	31,5

Fonte: Adaptado do Apêndice B

Conforme a plantação se desenvolve a necessidade hídrica aumenta e o volume irrigado também deve aumentar. Assim, para alcançar esse objetivo, o tempo de giro aumenta também. Isso implica em aplicações de irrigação que durem mais de um dia, chamada de evento de irrigação, onde a aplicação se inicia em um dia e após completar o giro finaliza aquela aplicação nos próximos dias.

De posse das datas de coleta de dados do estudo de caso fornecido pela empresa Sistema Irriga, foi possível solicitar os dados do sensoriamento remoto para empresa *i-ekbase*. O sistema é um mecanismo autônomo de *Big Data Analytics* com um sistema *CLOUD* (DUTTA et al., 2014), e a Tabela 07 apresenta as datas de coleta das imagens de satélite sem nuvens relacionadas com as datas de estudo no local. É possível verificar para as datas amostradas quatro destaques (diferenciados pelas cores), mesmo que poucas delas tenham sido analisadas, foi possível conseguir uma grande abrangência em relação aos tipos de testes que se poderiam realizar com a metodologia.

Tabela 7 - Datas das imagens de satélite disponibilizadas e as datas dos dados locais

Imagens i-ekbase	Dados locais da empresa Sistema Irriga®		
	Início do evento irrigação	Fim do evento irrigação	Lâmina Aplicada [mm]
17/06/18	17/06/2018	18/06/2018	6,1
27/06/18	27/06/2018	28/06/2018	6,1
	03/07/2018	04/07/2018	6,1
05/07/18	07/07/2018	08/07/2018	8,71
29/07/18	30/07/2018	01/08/2018	13,51
06/08/18	06/08/2018	08/08/2018	13,55
14/08/18	14/08/2018	16/08/2018	13,55
22/08/18	20/08/2018	22/08/2018	13,55
27/08/18	28/08/2018	30/08/2018	13,55

Entretanto, o uso exclusivo de imagens de satélites apresenta desvantagens como, por exemplo, a baixa frequência de imagens de satélite sem nuvens, e ainda no caso específico da parceria estabelecida com a empresa i-ekbase, o uso dos dados foi limitado na ferramenta comercial de sensoriamento remoto. Devido a esses problemas, a análise e a comparação entre os sistemas de gerenciamento das zonas de irrigação, no campo em Ipiranga do Norte, ficaram restritas a apenas 08 (oito) datas.

Dentre as oito datas, têm-se datas coincidentes como primeiro destaque (cor cinza), ou seja, a mesma data de aquisição de dados dos satélites com as datas de início de evento de aplicação programadas para irrigação real, e quatro datas em tempos diferentes. O segundo destaque (cor amarelada) é por causa de duas datas analisadas ocorrem no dia que antecede o início da aplicação da irrigação programada. Já o terceiro destaque (cor azulada) é a data do dia 05 de julho cuja análise ocorre um dia depois do fim do evento de irrigação, e por fim o quarto destaque, (cor esverdeado), cuja análise se dá no último dia do evento de aplicação de irrigação.

Foi possível verificar a sensibilidade do sistema *Fuzzy-VRI* em dias posteriores à aplicação de irrigação, assim, se espera ser possível analisar a capacidade do sistema em perceber se a área está mais úmida devido à irrigação prévia e verificar se o sistema pode acompanhar a evolução da necessidade hídrica.

5.1.2 Resultados para imagens do dia 17 de junho de 2018

Para este estudo de caso não há locais específicos para comparação, visto que a área de plantio possui sistema de irrigação baseado no método de balanço hídrico e usa o modelo Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) para determinar o valor da evapotranspiração. Dessa forma, as estimativas são generalizadas para toda a área com uma distribuição na aplicação da irrigação uniforme para toda plantação, ou seja, mesma lâmina de irrigação para toda plantação.

Para a ilustração da variação que se pode obter com a saída do sistema *Fuzzy-VRI*, a Figura 41 apresenta uma divisão com faixa angular de 30°. Também é apresentada a possibilidade da divisão para as faixas de velocidade de giro do pivô com ângulo menor (Figura 42), onde a faixa angular é de 10°. O sistema *Fuzzy-VRI* pode gerar faixas angulares de 1° até 360°. A leitura dos resultados para os estudos de caso deve ser feita da seguinte forma: as faixas angulares se iniciam no quadrante I e terminam no quadrante IV, com giro no sentido anti-horário. E as divisões das zonas de gerenciamento da irrigação se iniciam do centro da circunferência para fora, indo da zona 1, zona 2, ... zona n, de forma a separar as regiões de irrigação.

Essa forma de seleção do tamanho das faixas e zonas de irrigação constitui um ponto negativo, uma vez que a operacionalização acontece de forma visual com auxílio de um operador. A evolução do sistema desenvolvido seria o uso de uma visão computacional baseada em clusters para uma divisão das faixas e zonas de modo totalmente automático, sem intervenção humana. Hoje, nenhum sistema comercial consegue realizar esse tipo de operação. Há, então, uma perspectiva de estudos futuros.

Para essa análise da data de 17 de junho de 2018, deve-se levar em consideração que essa é a mesma data da programação real de irrigação fornecida pelo Sistema Irriga, e os resultados observados para essa data mostram uma variação de velocidade de 77% a 90% (Figura 41b).

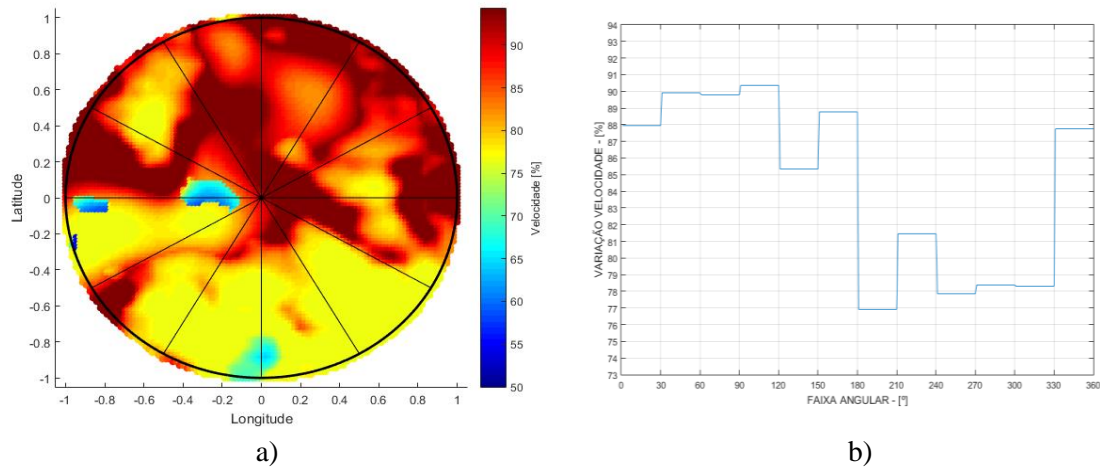


Figura 40- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

O sistema consegue produzir variação de velocidade, o que irá produzir uma variação na lâmina de irrigação. Pode-se ver que existem duas áreas bem distintas, no semicírculo superior, 0° a 180° , e a velocidade estimada para controle do pivô está próxima de 90%. Para o semicírculo inferior, 180° a 360° , tem-se uma velocidade menor. A metodologia desenvolvida para *Fuzzy-VRI* depende parcialmente da quantidade de faixas angulares e zonas de irrigação escolhidas, uma vez que a proposta para extração dos *setpoints* ou valor percentual está baseada no valor médio de cada fatia.

Desse modo, as divisões são apenas uma espécie de máscara colocada sobre a resposta do sistema inteligente de irrigação (Figura 42), assim, o valor percentual extraído pode mudar de acordo com o tamanho da fatia. Uma vez que não há metodologia definida para extrair esse tipo de informação e nesse sentido a metodologia criada nesta Tese se mostra inédita.

Nas Figuras 42 e 43, o que se vê é uma maior quantidade de transições de velocidade, mas o conteúdo da informação não mudou, e pode-se verificar que a mesma variação entre 76% a 92% para a estimação da velocidade é mantida.

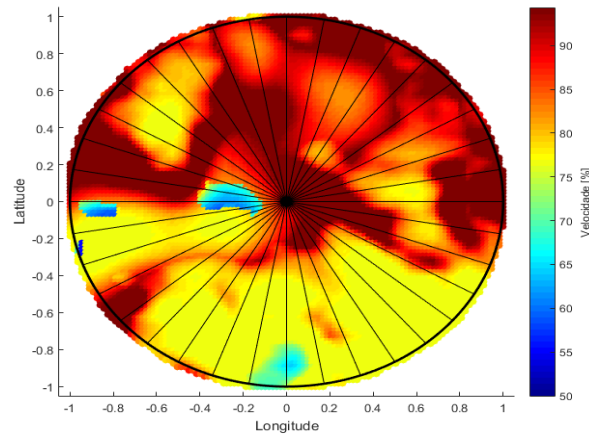


Figura 41- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

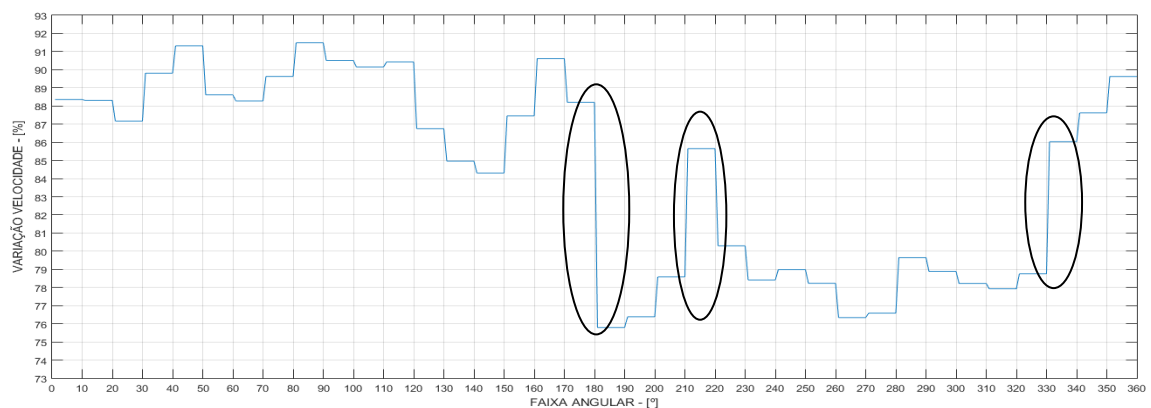


Figura 42- Velocidade média de giro por fatia

Nesse caso, fica ainda mais clara uma discussão, a mesma apontada no estudo em Brule, EUA, sobre a capacidade do equipamento – pivô central – de acompanhar as recomendações de velocidade dentro de uma faixa angular pequena (ver os destaques na Figura 43). Cabe deixar para as próximas pesquisas se a influência de variações relativamente grandes em faixas pequenas poderia levar a uma irrigação diferente daquela que foi estimada inicialmente pelo sistema.

Passando para a análise das divisões em zonas da área em estudo, a Figura 44 apresenta uma divisão em cinco zonas, começando do centro - Z1 e finalizando na borda – Z5. Nota-se que com essa escolha de divisão três pequenas manchas ficam contidas dentro das zonas 1 e zona 2 da fatia 6, outra dentro da zona 5 da fatia 7 e uma terceira mancha dividida entre as fatias 9 e 10 na zona 5.

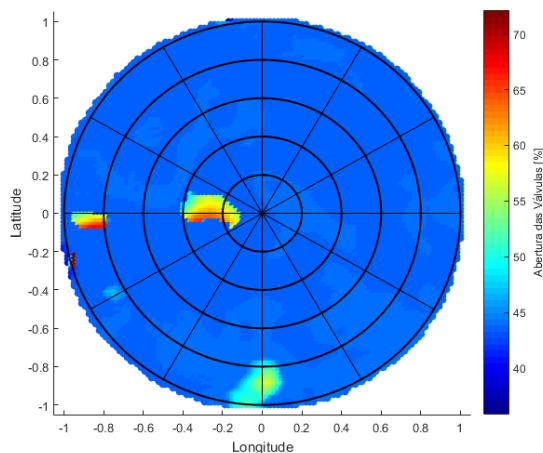


Figura 43- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Existe uma baixa distinção entre as áreas e uma maior uniformidade da distribuição do controle das válvulas. Uma hipótese é que essa falta de sensibilidade pode estar atribuída ao pouco número de entradas, assim é possível que existam outras variáveis que melhor indicariam a variação espacial da área de estudo. O controle da abertura das válvulas é melhor visualizado na Figura 45, em que os pontos que possuem uma diferença em seus valores são as zonas onde existem as manchas mais evidentes.

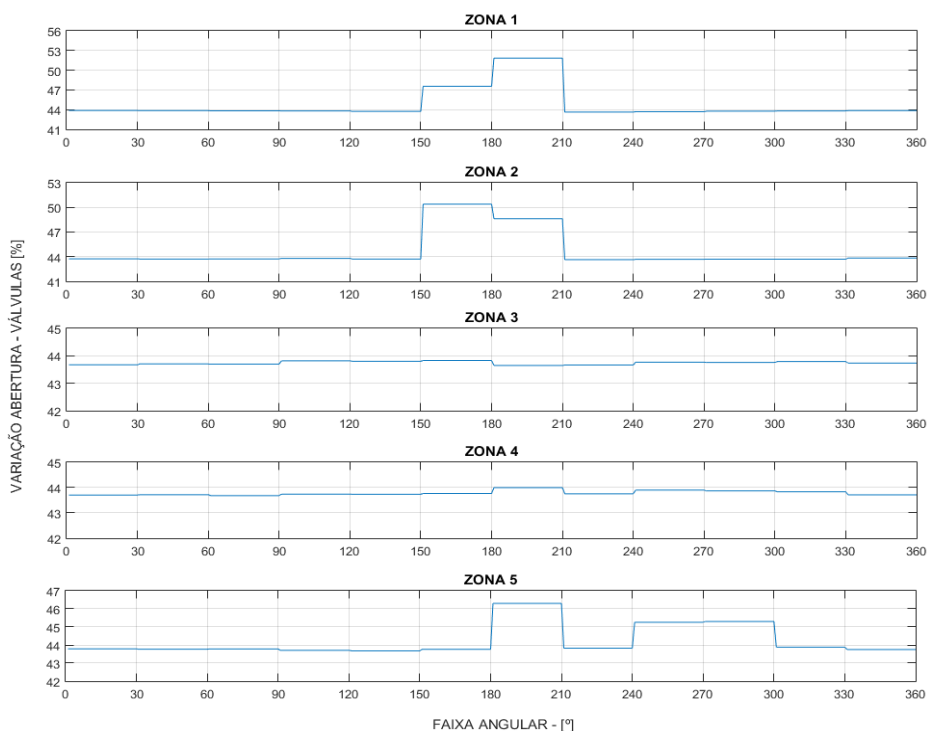


Figura 44- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

As mesmas regiões em destaque na Figura 44 podem ser vistas na Figura 45, e como a extração do controle para as válvulas está baseada na média das estimativas fornecidas pelo *fuzzy*, pode-se perceber que a zona 3 e a zona 4 não possuem variação percentual significativa, entretanto, mesmo uma pequena variação pode levar a irrigação, como um todo, a uma maior eficiência no uso de água na plantação.

Nas Figuras 46 e 47 o que se pretende mostrar é quanto mais divisões, melhor é a localização de regiões com diferentes níveis de necessidades hídricas, elevando ainda mais a eficiência do sistema de irrigação. Porém, visualmente traz um desconforto para a análise dos dados gerados.

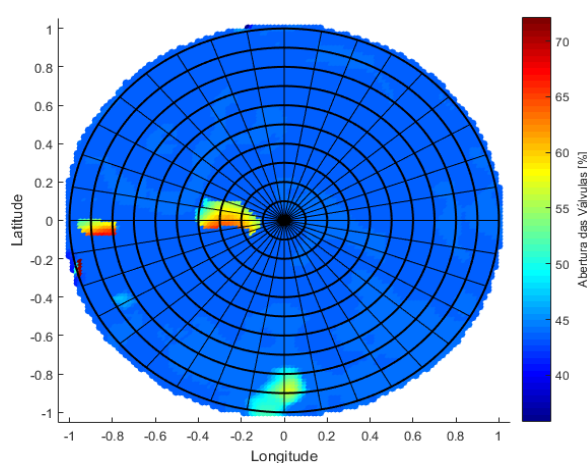


Figura 45- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Com um maior número de regiões de controle fica mais evidente o sucesso do sistema *Fuzzy-VRI* em alcançar a irrigação por taxa variável. Vê-se que, as manchas detectadas pelo sistema agora estão contidas em zonas individuais e com isso a irrigação dessas zonas se tornam mais precisas. O sinal de controle para as válvulas extraído pode ser visto na Figura 47. De fato, as regiões onde não há as manchas não possuem variações percentuais relativas, o que deixa evidente que quanto mais divisões o sistema possuir, mais precisa é a aplicação de água.

Porém, para uma apresentação de resultados deste tipo, a forma com maior número de divisões não é satisfatória, uma vez que as informações podem visualmente ficar confusas aos olhos de quem lê. Assim, os estudos de caso não irão selecionar divisões muito pequenas e, daqui para frente, a escolha das divisões foi feita manualmente, da melhor maneira que se possa visualizar e deixando de lado a eficiência que o controle poderia ter se houvesse mais divisões.

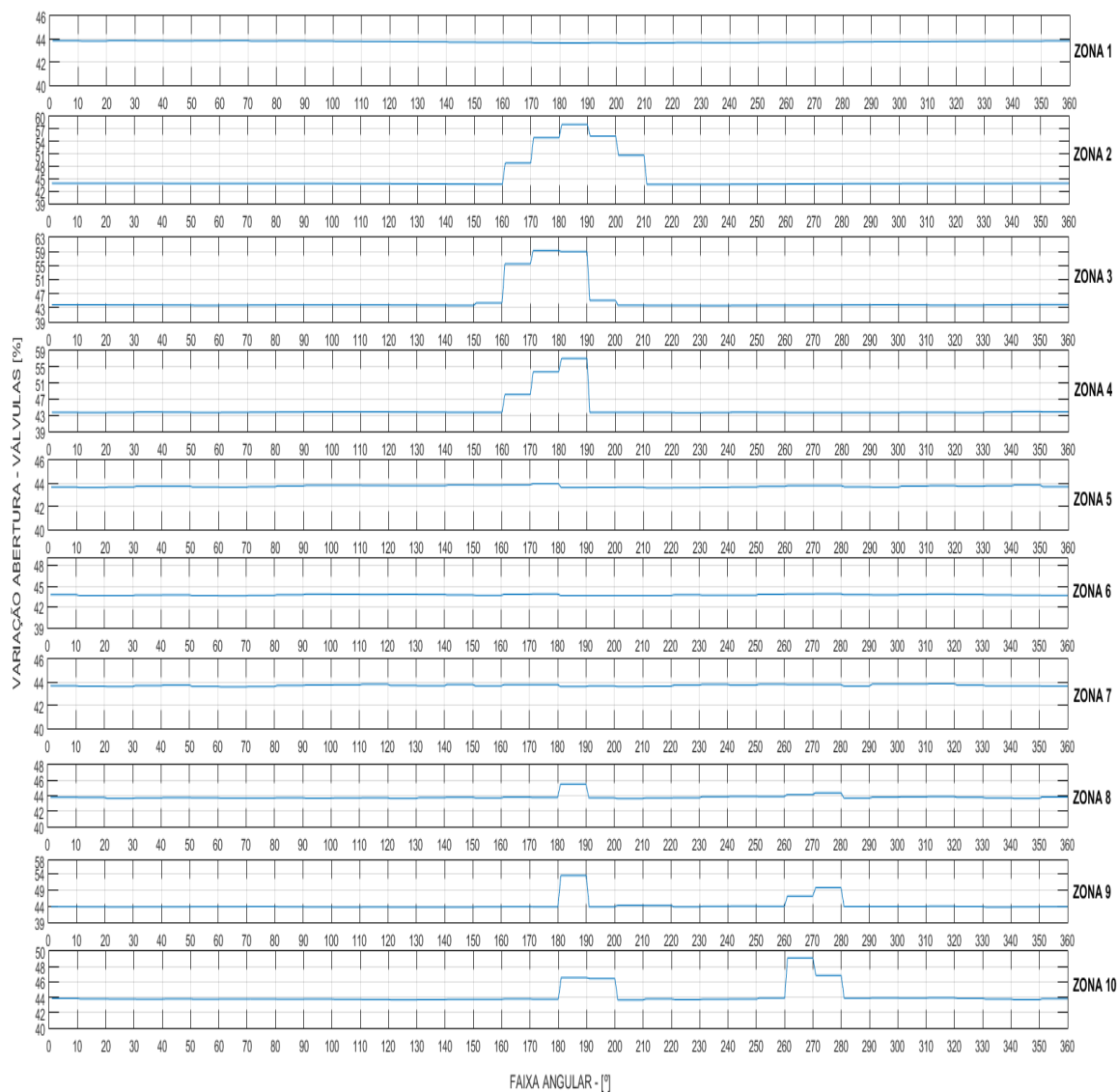


Figura 46- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Essa escolha não compromete a análise global da metodologia desenvolvida. Para analisar a data de 17 de junho é de 30° (Figura 41b), 5 zonas (Figura 45), que são os valores percentuais ou os sinais de *setpoints* que seriam enviados ao controlador central do pivô. Se esses dois sinais fossem executados por um pivô central, produziriam a aplicação de uma lâmina d'água igual a que se apresenta na Figura 48.

Para que seja possível realizar a comparação entre o sistema real de irrigação em operação e as estimativas de *setpoints* do controle de velocidade e da abertura das válvulas gerados pelo *Fuzzy-VRI*, é necessário que sejam relacionados com uma especificação de construção de um pivô. O pivô em questão instalado na fazenda possui válvulas com abertura fixas, cujo projeto e especificações não puderam ser divulgados devido a

questões comerciais. Assim, o que se sabe é que o pivô possui um tamanho de válvulas que proporcionaram uma lâmina de irrigação 6,1 mm quando estiver com velocidade máxima, ou seja, 100% de velocidade setada.

O resultado, caso os sinais de *setpoints* de velocidade e abertura de válvulas fossem enviados para um pivô com características de irrigação de 9mm de lâmina d'água, é visto na Figura 48: a aplicação da irrigação alcançaria uma lâmina de 5mm na média, com algumas regiões com indicação de lâmina superior ao calculado pela empresa de gerenciamento de irrigação.

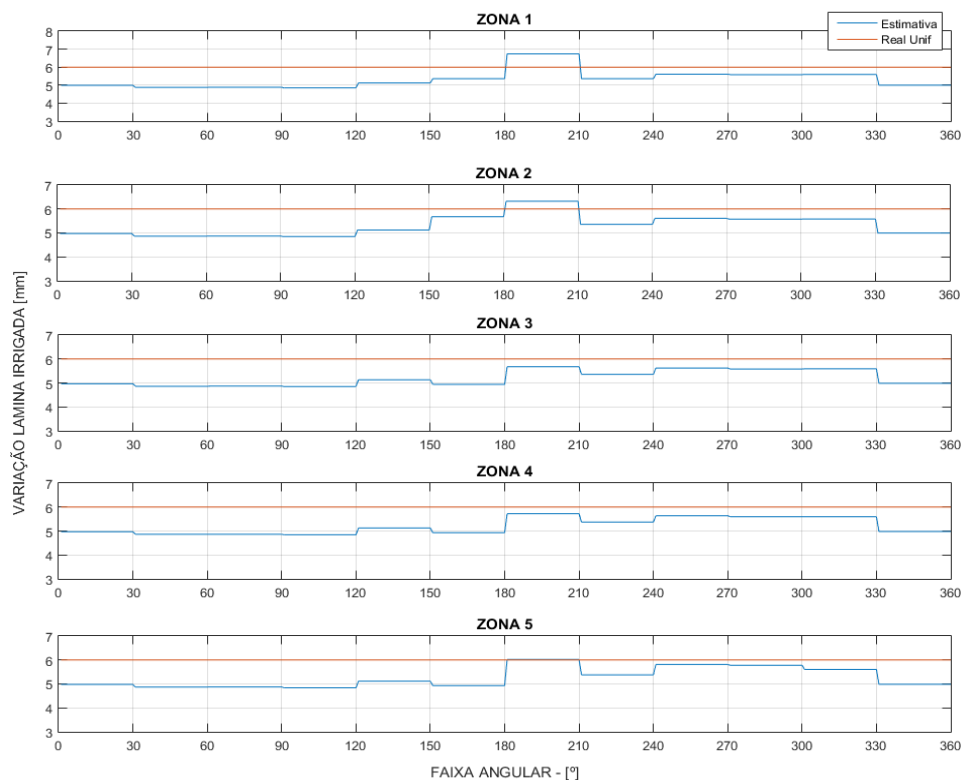


Figura 47- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Para melhorar a visualização da performance desse tipo de controle desenvolvido pela Tese, é apresentado o volume que essa lâmina de irrigada produziria em m^3 . Pode-se ver na Figura 49 que o volume irrigado por fatia fica entre 5% a 20% menor caso fosse possível afirmar que a produção continuaria a mesma e, dessa forma, poder-se-ia afirmar que o *Fuzzy-VRI* consegue reduzir os custos e os gastos com uso de água doce.

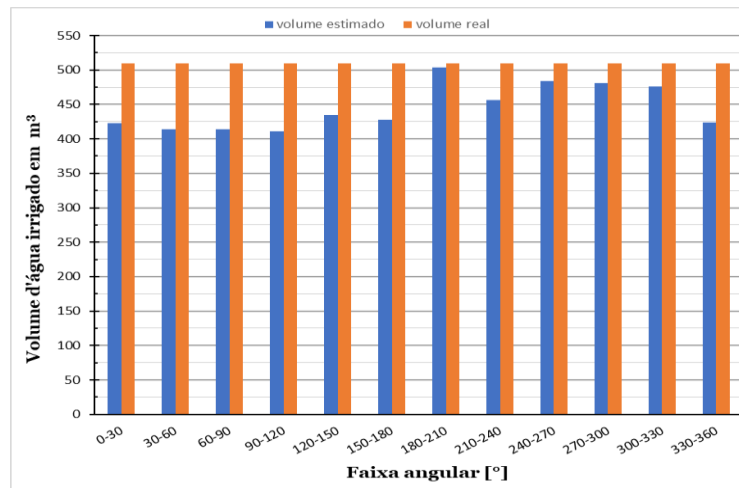


Figura 48- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimados por cada modelo

O resultado gerado pela metodologia desenvolvida é ligeiramente menor do que a lâmina de irrigação real, porém é impossível de determinar se essa redução seria suficiente para manter o nível de produção. Assim, um estudo sobre eficiência na produção é colocado como perspectiva futura de trabalho para aprimoramento da metodologia.

O que se pode destacar nesse resultado é que a aplicação de água produzida pelo sistema *Fuzzy-VRI* obteve sucesso em reconhecer regiões com variação no volume de irrigação, ou seja, o sistema *Fuzzy-VRI* foi capaz de perceber locais ou regiões com mais ou menos necessidade hídricas, sem se distanciar da medida real encontrada por sistema comercial instalado.

5.1.3 Resultados para imagens do dia 27 de junho de 2018

Ao serem analisadas pelo sistema *fuzzy* de irrigação, as informações do sensoriamento remoto produziram uma variação na velocidade, como pode ser vista na Figura 50. Vale lembrar que a escolha da quantidade da faixa seguiu exclusivamente a forma visual, dessa forma, a divisão que melhor separava as diferentes manchas foi a divisão angular de 20°.

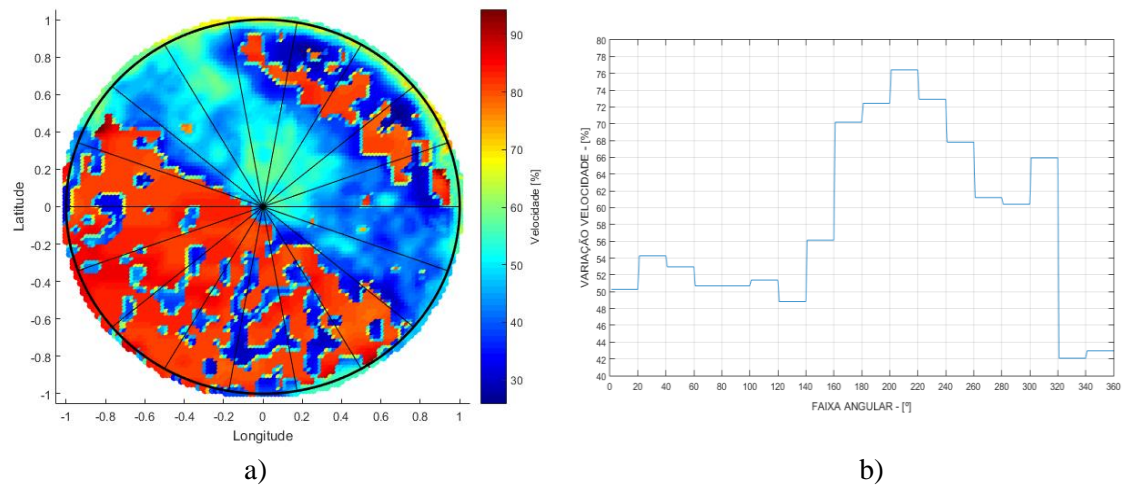


Figura 49- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Depois de 10 dias, foi possível fazer uma nova análise da plantação - lembrando que a irrigação real acontece de acordo com a programação estabelecida na tabela 6. Felizmente, as informações dos satélites coincidiram com a data de uma irrigação programada, no caso, a irrigação real teve uma lâmina de irrigação de 6,1mm. Pode-se ver uma região que vai da fatia 17 (320°) até a fatia 07 (120°) bem definida como de baixa velocidade, e outra região em vermelho, definida como de alta velocidade. Na Figura 50b, a visualização do sinal fica mais evidente, e é possível verificar uma variação percentual elevada de 42% até 76% para velocidade. Mais uma vez, o sistema *Fuzzy-VRI* obteve sucesso em determinar regiões com diferentes indicativos de volume para irrigar.

Quando se verifica o segundo sinal de *setpoint*, controle de abertura de válvulas, não há dúvidas quanto à capacidade do sistema desenvolvido em gerar sinais para controle de pivô com a prescrição de irrigação por taxa variável (Figura 51). O que se vê é a confirmação da mesma região central com uma necessidade de irrigação maior, para este estudo, possivelmente a escolha de um maior número de divisão das zonas de irrigação traria melhores resultados, pois existem muitas regiões ou manchas com indicação para uma variação no volume irrigado.

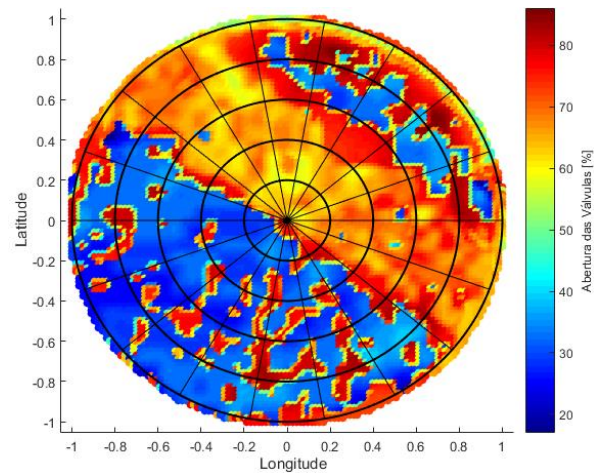


Figura 50- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Houve uma grande variação percentual no sinal de controle para válvulas (ver Figura 52) nas regiões com coloração em laranja para as regiões do semicírculo inferior. Infelizmente, não há informações se houve algum problema nessa região, mas o *Fuzzy-VRI* foi sensível o suficiente para detectar essa diferença. As zonas de 1 a 5 mostram uma grande variação para a abertura das válvulas, um indicativo de que há uma grande variação no volume de água a ser aplicada. Assim, o pivô central ao receber os sinais de *setpoint* (Figuras 50b e 52) irá aplicar uma lâmina d'água próxima ao estipulado pelo método de balanço hídrico adotado pela empresa parceira.

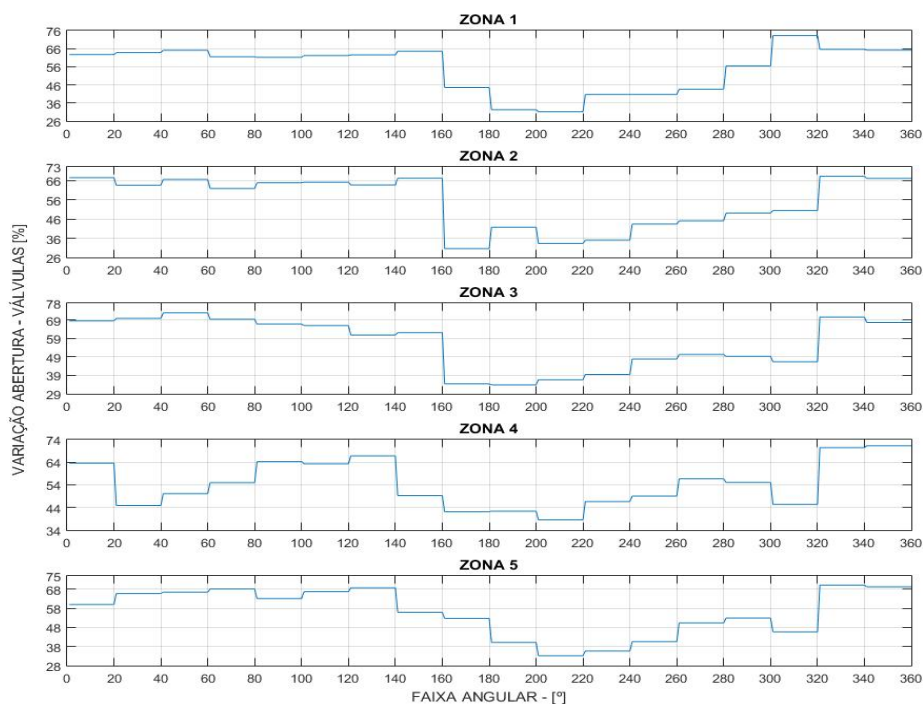


Figura 51- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Quando se analisa a Figura 53, pode-se afirmar que há em alguns pontos uma superestimação da indicação de volume a ser irrigado e outras regiões com valores iguais aos praticados. Mesmo com essa variação, o sistema consegue entregar o que se propõe: uma determinação de irrigação variável espacialmente.

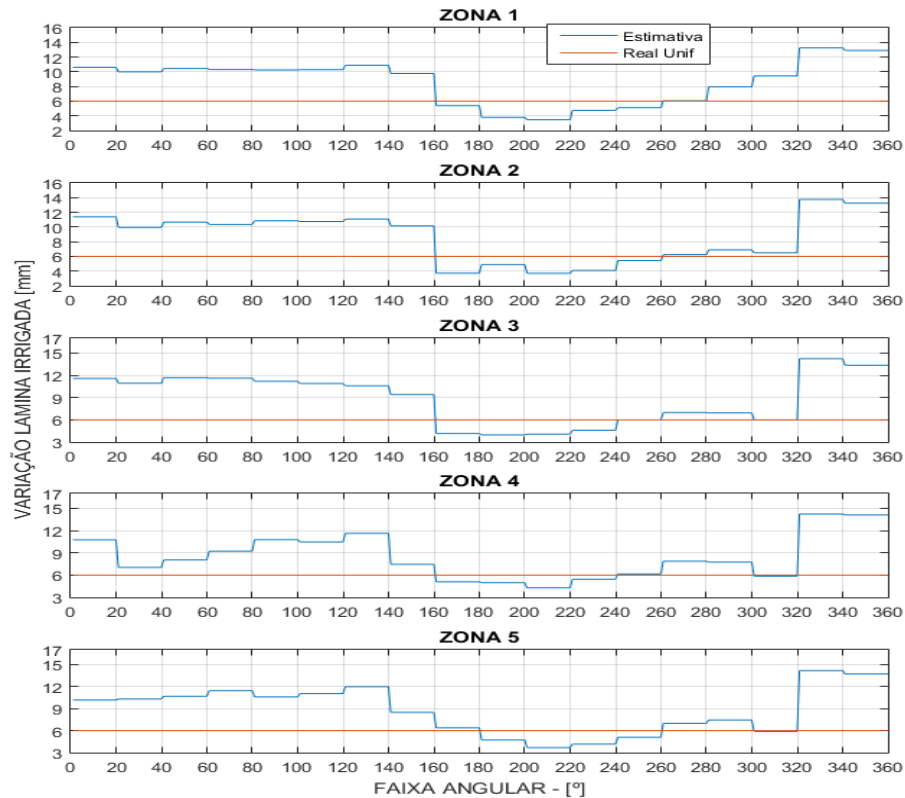


Figura 52- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Mesmo com a desvantagem de não possuir todas as variáveis mais significativas para a análise de estresse hídrico de uma plantação, o sistema *fuzzy* desenvolvido foi capaz de inferir valores próximos aos praticados pela metodologia usada pela empresa comercial. Entretanto, existem regiões em que a estimativa de lâmina d'água produzida pelo *setpoint* do sistema *fuzzy* de irrigação é o dobro, uma variação de 100% do valor real praticado.

Para esses volumes superestimados (Figura 54), não é possível afirmar a real causa desse distanciamento, porém, uma hipótese provável seria a falta de variável de entrada que aponte o nível de água no solo ou uma variável de normalização das condições ambientais do dia analisado. Essa hipótese sobre a normalização das condições ambientais é explorada em um dos casos-estudo para a região de Burle, EUA, mais a frente.

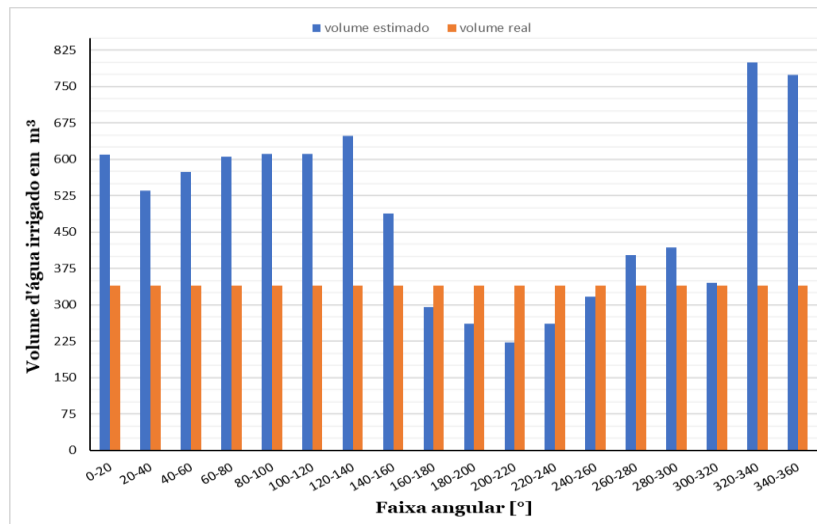


Figura 53- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimado por cada modelo

O resultado mostrado deixa bem claro o quanto a superestimação da lâmina de irrigação impacta no volume de água usado. Apesar de o sistema *fuzzy* possuir poucas entradas e ter uma estrutura com poucas regras, a forma criada de sintonia se mostra adequada e consegue obter resultado significativo.

5.1.4 Resultados para imagens do dia 05 de julho de 2018

Os resultados observados para essa data mostram que ainda é possível encontrar a mancha, agora um pouco menor, no centro do semicírculo superior, o que confirma ali um problema que a irrigação uniforme ainda não foi capaz de corrigir.

O destaque para essa análise não é apenas pela detecção de uma zona de maior necessidade hídrica, cuja metodologia desenvolvida foi capaz de encontrar, mas sim por ser uma data cuja análise se deu dois dias após a programação de irrigação e dois dias antes da próxima irrigação. A data de irrigação foi 03 de julho de 2018, com lâmina indicada de 6,1mm, e a irrigação seguinte foi no dia 07 de julho de 2018, com lâmina indicada de 8,71mm. A data de coleta de dados por sensoriamento remoto ficou entre esses dois dias, 05 de julho de 2018.

Antes de apresentar os resultados, cabe uma pergunta para verificação da sensibilidade do sistema *fuzzy* desenvolvido: qual deveria ser o comportamento do sistema? De forma simples e direta, se houve irrigação dois dias atrás e a análise está dois

dias antes da próxima irrigação, o resultado esperado seria de uma indicação com baixo volume, pelo menos abaixo das indicações programadas para as próximas datas.

O resultado apresenta o sinal de controle para velocidade, e é possível perceber a ligeira semelhança com resultado da data anterior, elemento já discutido. A mesma faixa aparece também aqui (Figura 55). Mesmos com algumas regiões com velocidades diferentes, a definição de uma velocidade média é muito parecida com o estudo do dia 27 de junho, em que há uma indicação de velocidade menor para a mancha central do semicírculo superior. Entretanto, a variação percentual é menor.

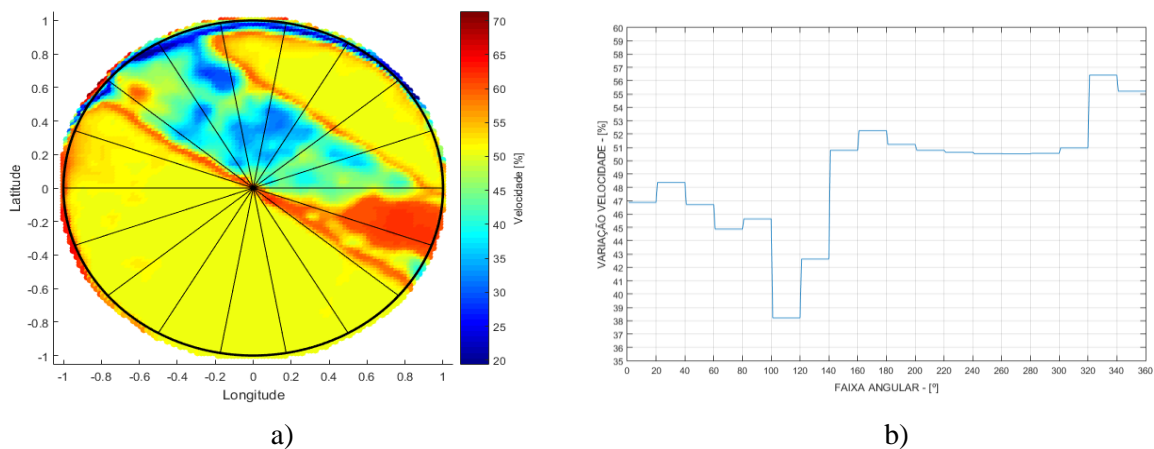


Figura 54- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Para o sinal de controle gerado para as válvulas (Figuras 56 e 57), a mesma mancha aparece, o que confirma que aquela mancha realmente necessita de uma atenção especial e possui um indicativo de maior necessidade hídrica. Quando extraída a informação da saída gerada pelo sistema, o sinal de controle para válvulas para cada zona é mostrado na Figura 57.

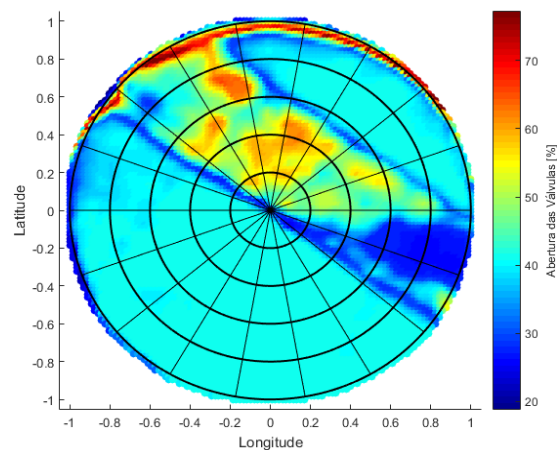


Figura 55- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Mesmo ao usar a média dos valores por zona, o sinal encontrado reflete o resultado inferido pelo sistema *Fuzzy-VRI*, mostrando claramente duas regiões: uma região com indicação para menos água e outra região com indicação de mais água, e para cada região, uma variação percentual distribuída entre as zonas delimitadas. Lembrando que a zonas vão do centro (zona 1) para a borda (zona 5) por fatia angular.

Com as análises das datas até agora, é possível verificar que os sinais de saída do sistema *Fuzzy-VRI* apresentam coerência com a dinâmica da evolução da plantação. Tanto nos sinais de controle para velocidade como para controle das válvulas, a percepção ou a inferência que o sistema desenvolvido apresenta traduz a realidade.

Assim, o resultado da inferência que o sistema fornece da análise dessa data pode ser visto nas Figuras 55a e 57, porém, em termos práticos, para uma melhor identificação e comparação, a Figura 58 mostra uma lâmina de irrigação que o pivô produziria se esses sinais fossem enviados para o controle central.

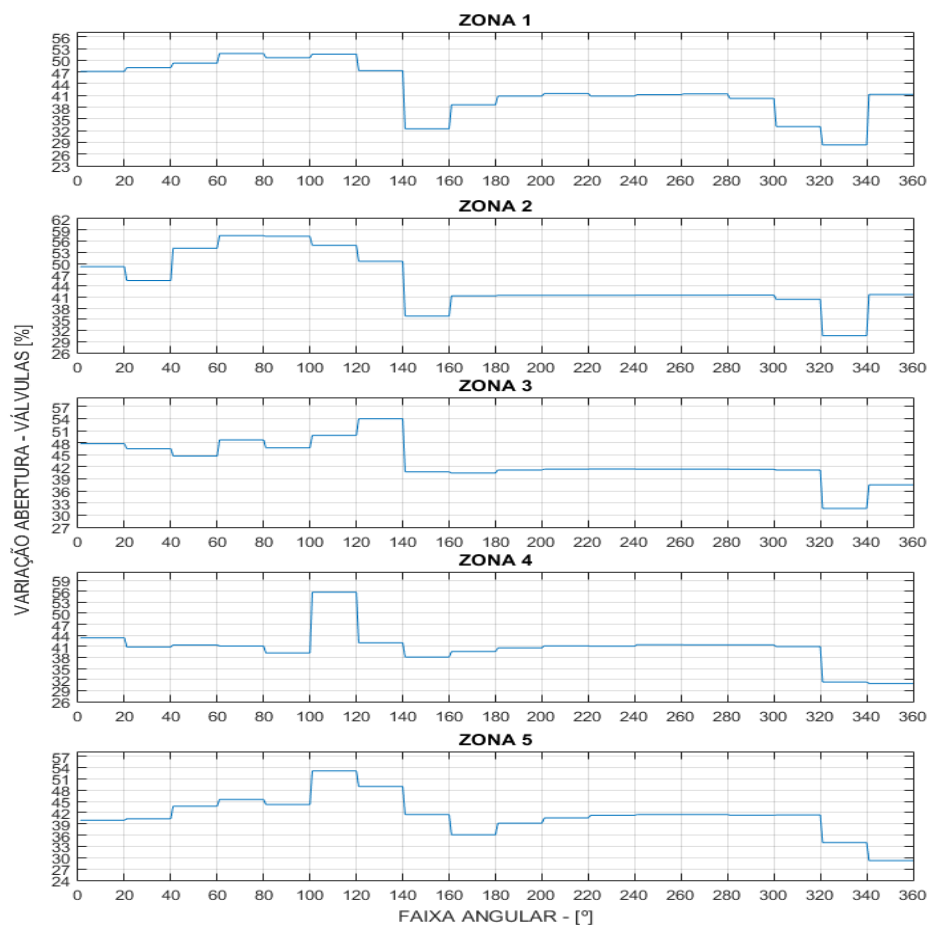


Figura 56- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Observa-se que há uma subestimação da lâmina de irrigação para o semicírculo inferior, e as estimativas para a área superior da plantação e que estão com uma mancha possuem um indicativo de irrigação muito semelhante ao determinado pelo método convencional. Quando colocamos no contexto da análise da data anterior, quando essa mesma região apresentou indicações de volume superestimado, o resultado para data de 05 de julho se traduz em uma indicação de irrigação com baixo volume, o que se esperaria para uma data logo após um dia de aplicação de irrigação.

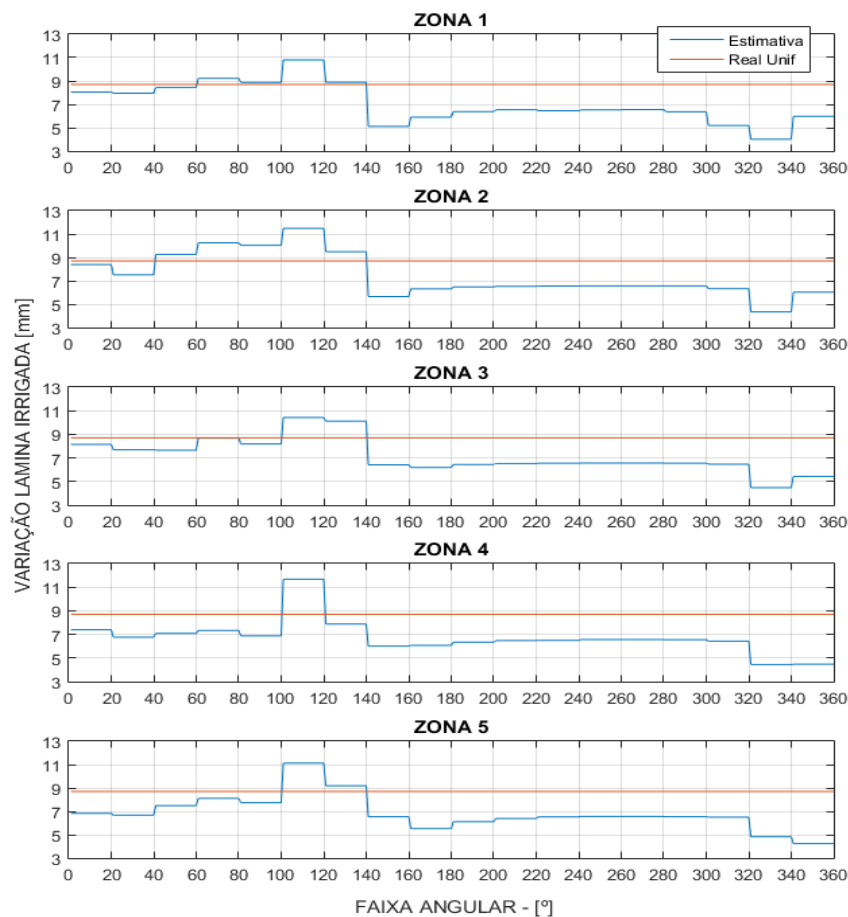


Figura 57- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Logo, o sistema foi capaz de encontrar a variação espacial da área de plantação e também obteve sucesso em se sensibilizar para uma aplicação de uma lâmina de irrigação programada de 6,1 mm, anteriormente. Para uma melhor identificação dessa subestimativa de volume irrigado, a Figura 59 apresenta as informações para o volume irrigado em m^3 para cada fatia.

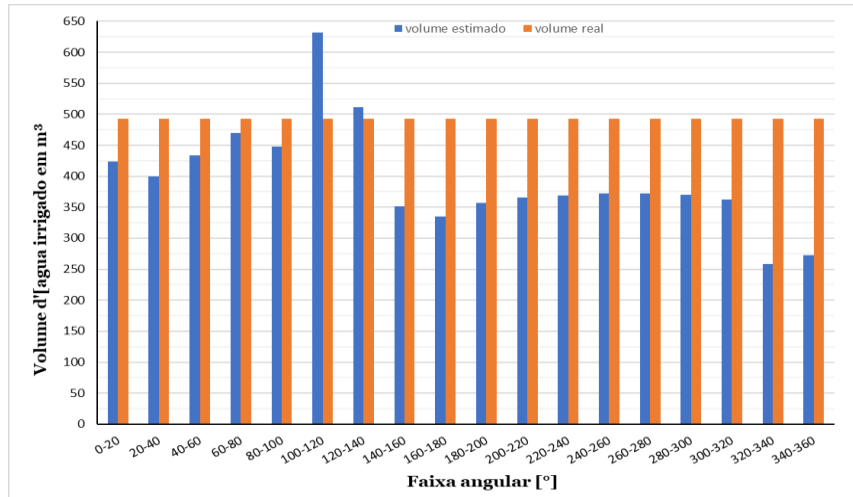


Figura 58- Comparação entre os volumes irrigados estimados por cada modelo por faixa

O que se vê é uma variação do volume irrigado abaixo do que foi estimado em outras datas, o que mostra que o sistema *fuzzy*, quando bem sintonizado e com base de regras que expressa de forma correta as relações entre as variáveis, consegue inferir a realidade em que está inserido.

5.1.5 Resultados para imagens do dia 29 de julho de 2018

A data de análise em questão acontece um dia antes da data da programação da irrigação, ver a Tabela 7. Além disso, a região central da área de plantio já não necessita de uma maior irrigação, como se vê na Figura 60, o que pode ser um indicativo de que a irrigação programada pelo método convencional atingiu seu objetivo.

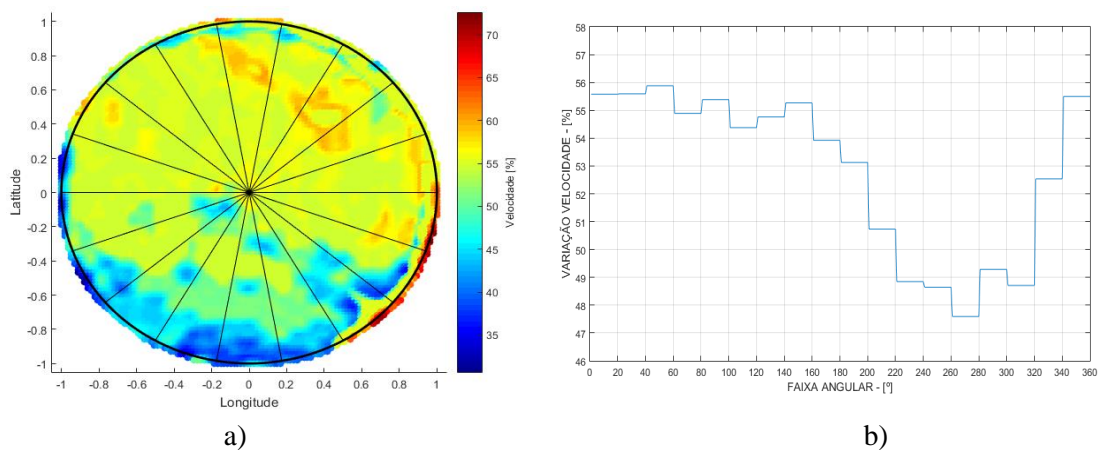


Figura 59- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

O importante no resultado apresentado é verificar se o sistema *Fuzzy-VRI* consegue inferir as velocidades e a abertura de válvulas próximo ao comportamento esperado para uma irrigação, dentro de uma perspectiva de data antecipada. Para essa data, o método usado pela empresa aponta que no dia 30 de julho de 2018 foi necessária uma irrigação com volume de 13,51mm.

O resultado para o controle da velocidade determinada pelo sistema *Fuzzy-VRI* indica que a região central não precisaria mais de uma maior irrigação e assim estimando uma velocidade de aproximadamente 55%. Entretanto, as regiões externas ou nas bordas da área plantada necessitam de uma atenção maior, visto que a indicação do sistema é para uma redução da velocidade, o que se traduziria em uma indicação de maior volume de irrigação.

O sinal de saída para controle de válvulas apresentou ser menos variável, como pode ser percebido no sinal de saída do controle de válvulas das Figuras 61 e 62. A inferência do sistema mostrado na Figura 61 aponta pequenas regiões centrais com uma necessidade de maior irrigação, e mostra as mesmas regiões nas bordas apontadas pela saída de controle de velocidade.

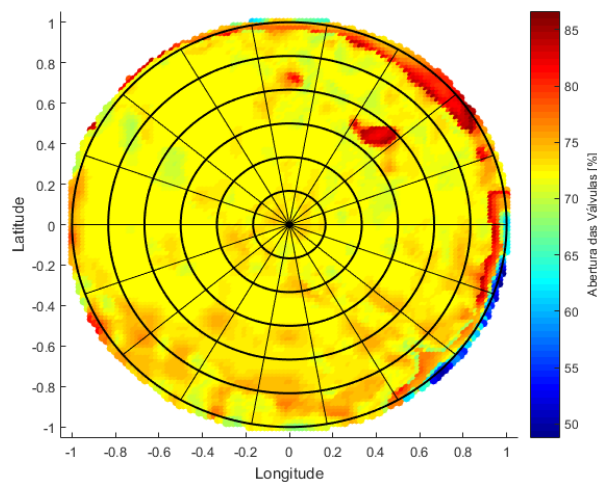


Figura 60- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Porém, quando extraídas as informações para gerar o *setpoint*, é possível verificar que não há uma grande variação percentual relativa dentro das zonas (Figura 62).

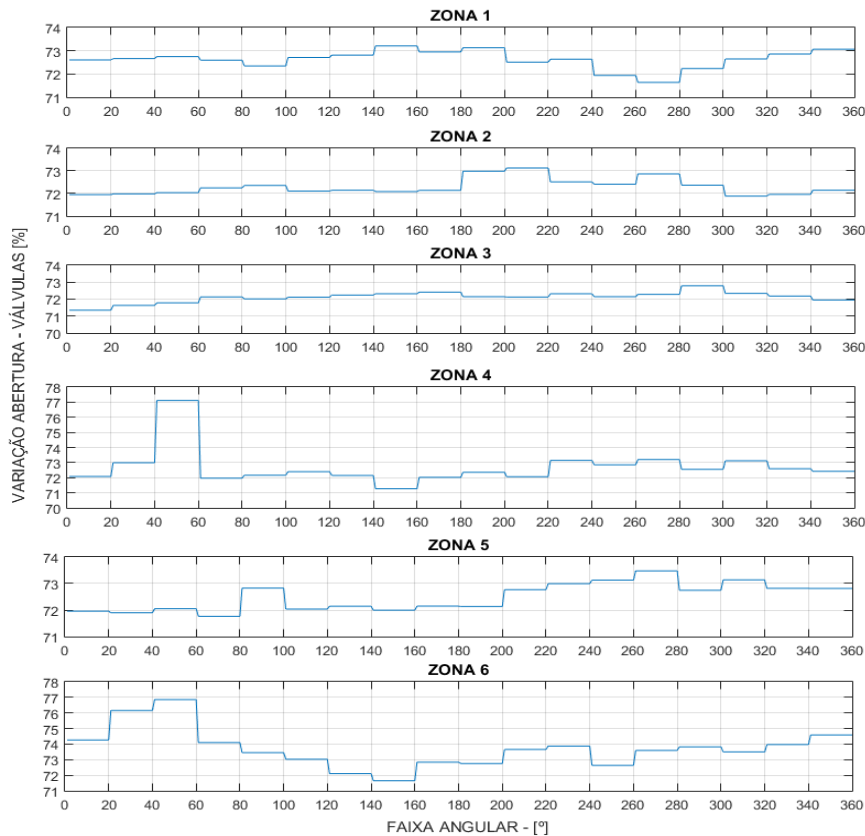


Figura 61- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Os sinais de controle para as zonas não possuem uma grande variação relativa. Como se vê, os valores estão dentro de um mesmo patamar de aproximadamente 72%, com uma ligeira elevação em relação às zonas 4 e 5, cuja inferência do sistema aponta para um maior volume de água.

Para que seja possível comparar as metodologias, os sinais encontrados pelo sistema *Fuzzy-VRI* devem ser traduzidos em lâmina de irrigação, uma vez que não é possível verificar como são os sinais de controle reais. Assim, os sinais gerados pelo sistema são entendidos como reais movimentações de um pivô com características e especificações de irrigação com lâmina de 9mm. Ou seja, ao enviar esses sinais de controle de velocidade e controle de abertura das válvulas para esse pivô, o resultado é a aplicação de uma lâmina d'água mostrada na Figura 63.

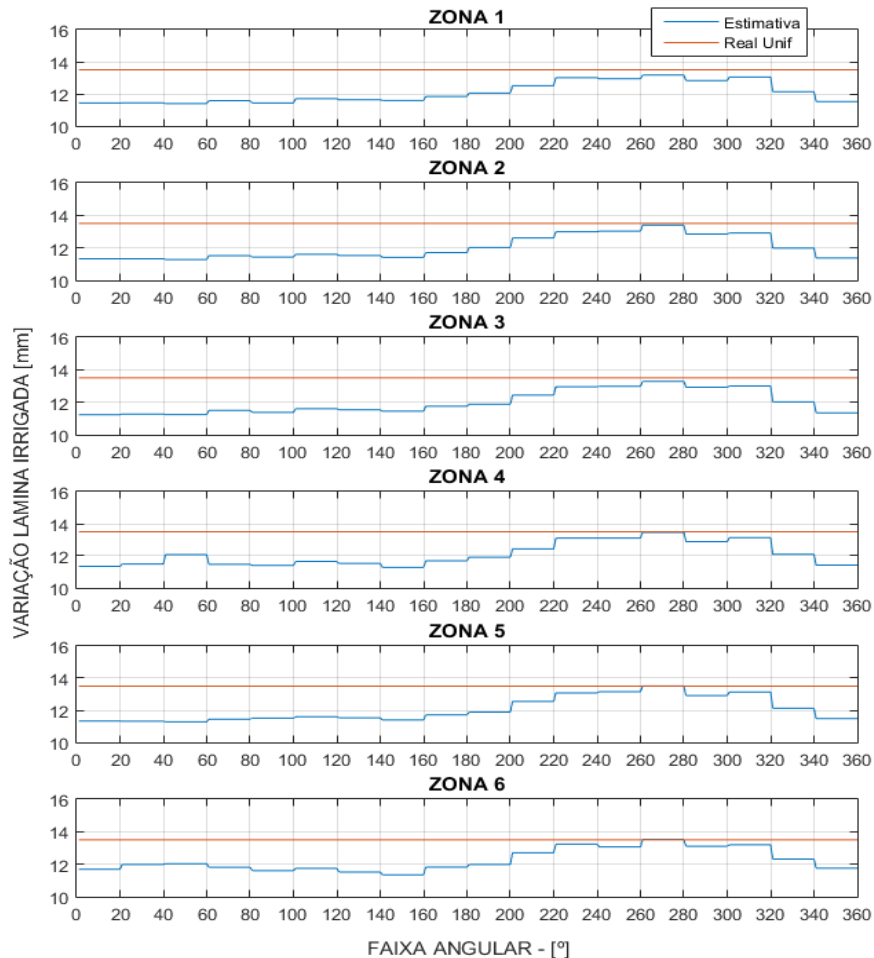


Figura 62- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Ao comparar os resultados da lâmina de irrigação entre o método convencional/uniforme e o método de aplicação por taxa variável, nota-se que existem regiões com menores necessidades hídricas o que levaria a uma redução no uso de água, e dessa forma geraria uma diminuição de custos. Entretanto, as datas não são coincidentes, o que prejudica a relação de comparação em questões quantitativas.

O real valor aqui nesta comparação é verificar que a baixa estimativa no volume irrigado (Figura 64) gerada pelo sistema *Fuzzy-VRI* está dentro de uma expectativa. De certa forma, é possível constatar que o sistema desenvolvido possui a sensibilidade suficiente para inferir um volume menor. A Figura 64 apresenta os valores por m^3 da irrigação teoricamente aplicada pelo sistema e o volume real que foi aplicado. As regiões da faixa angular entre 220° a 320° apresentam valores muito próximos aos reais.

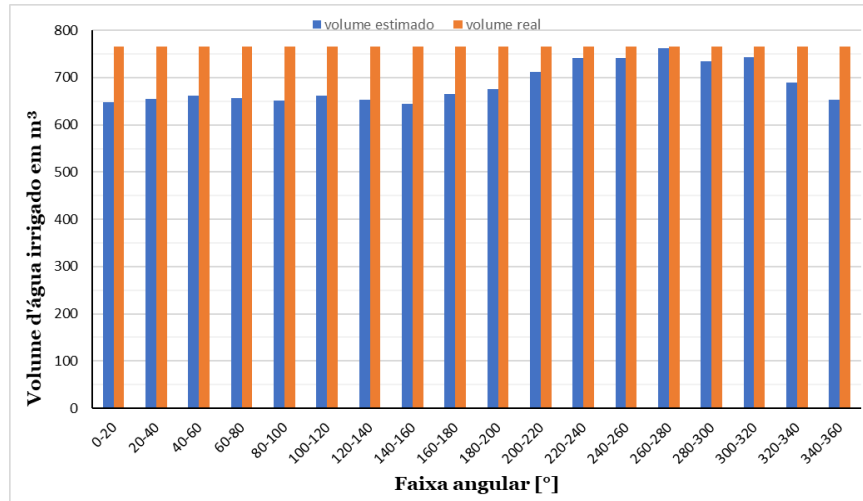


Figura 63- Comparação entre os volumes irrigados estimados por cada modelo por faixa

5.1.6 Resultados para imagens dos dias 06 e 14 de agosto de 2018

A análise conjunta das datas do dia 06 e 14 de agosto servem para apresentar os resultados observados em datas coincidentes, o que aconteceu também nas datas de 17 e 27 de junho. Dessa forma, fica mais fácil visualizar e entender o comportamento do sistema *Fuzzy-VRI*.

O tempo para colheita já se aproxima, assim, as imagens de satélite ou sensoriamento remoto começam a apresentar dados com distribuição mais uniforme, uma vez que toda a área cultivada apresenta um desenvolvimento igualmente distribuído. Nesse sentido, o sistema possui uma deficiência em relação à área com boas performances no que diz respeito ao crescimento, pois a metodologia que é usada no desenvolvimento do sistema *Fuzzy-VRI*, detecta apenas a superfície das folhas desta plantação.

O uso de sensoriamento remoto e sensoriamento local apresenta características mais apropriadas para o acompanhamento do início ao fim de plantação. A Figura 65 apresenta o resultado para saída do sistema *fuzzy* para a velocidade, percebe-se que não há grandes variações para as regiões ou fatias, apenas uma região com um leve aumento na velocidade. Quando se extrai o sinal para o *setpoint*, confirma-se que a velocidade encontrada é praticamente uniforme em toda a área.

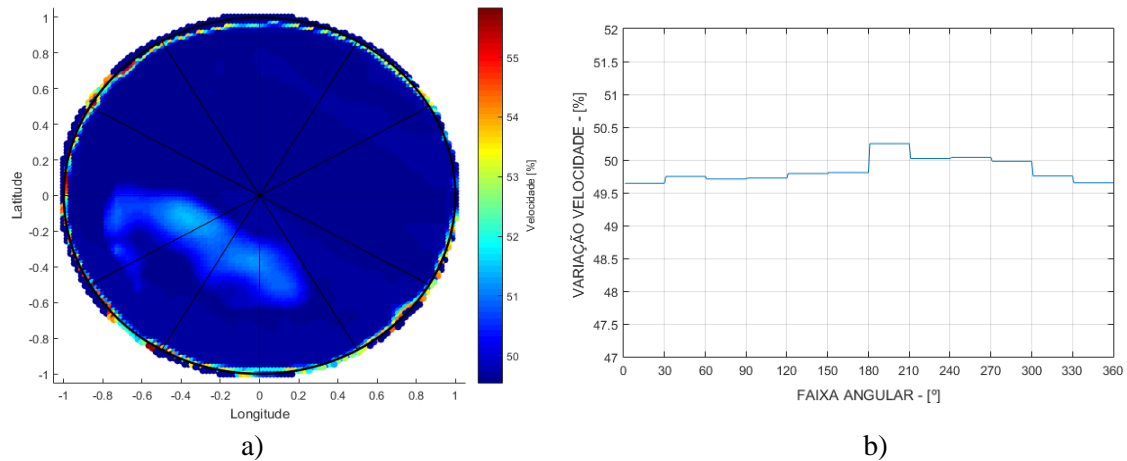


Figura 64- a) Velocidade de giro do pivô central para dia 06 de agosto; b) Velocidade média de giro por fatia para o dia 06 de agosto

Uma pequena alteração das regiões com necessidade hídrica é vista na Figura 65b. Todavia, por se tratar de datas próximas ao final da colheita, pouca variação percentual relativa é detectada. O resultado indicado pelo *Fuzzy-VRI* para o sinal de controle para velocidade do dia 14 de agosto (Figura 66b) apresenta uma maior variação percentual relativa em relação ao dia 06 de agosto, porém muito pequena em relação ao todo. A variação é de apenas de 47% a 53% para velocidade, o que ainda é muito próximo de uma velocidade constante, como o que foi percebido na data do dia 06 de agosto.

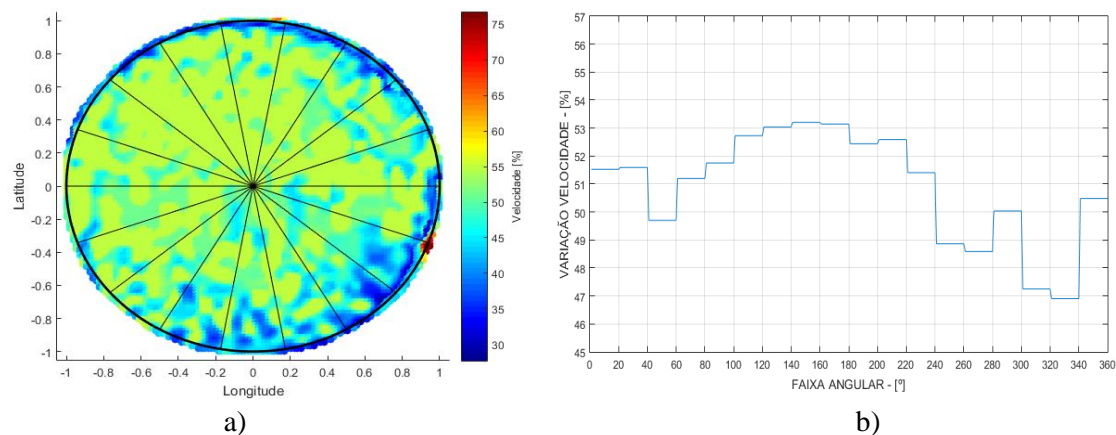


Figura 65- a) Velocidade de giro do pivô central para dia 14 de agosto; b) Velocidade média de giro por fatia para dia 14 de agosto

Quando se analisam os sinais de controle para válvulas para data do dia 06 de agosto (Figura 67), pode-se confirmar a pouca variação espacial detectada pelo sistema - um ponto negativo já discutido, uma vez que o sistema *Fuzzy-VRI* é baseado apenas por sensoriamento remoto.

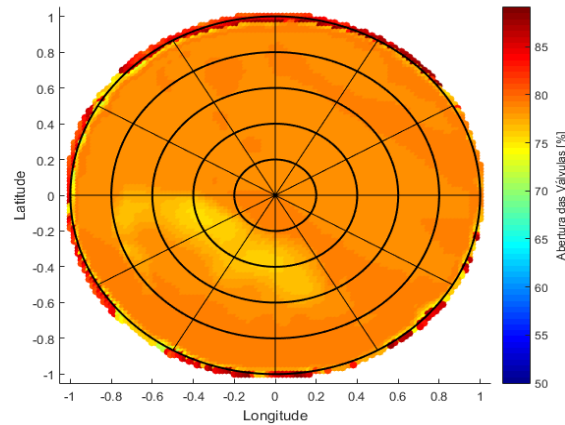


Figura 66- Abertura proporcional das válvulas solenoides para o dia 06 de agosto

As imagens geradas são concentradas na superfície das folhas e, assim, quando há desenvolvimento por igual da plantação, o sistema *fuzzy* projetado perde a capacidade de encontrar regiões com pequenas variações. Tal efeito é amplificado para o sistema desenvolvido, pois sua construção é limitada em relação ao número de funções de pertinência e número de variáveis de entrada. Comprovadamente, ao produzir o sinal de *setpoint* para o controlador do pivô, pode-se ver (Figura 68) que é praticamente uniforme a abertura inferida pelo sistema *fuzzy* para a data do dia 06 de agosto.

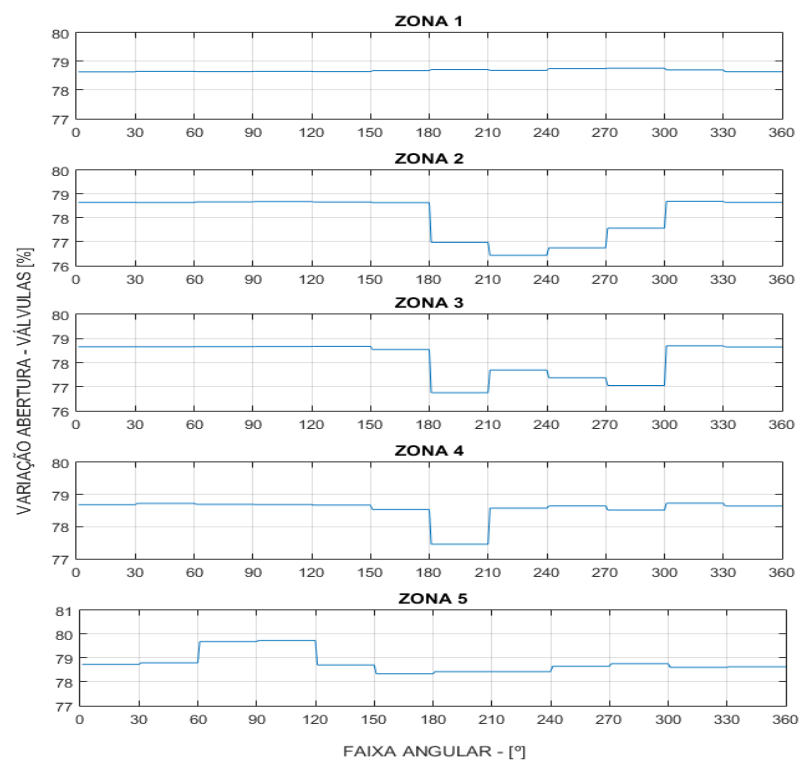


Figura 67- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação para o dia 06 de agosto

O destaque da Figura 68 fica apenas para as fatias angulares em que há existência de uma mancha, como visto na Figura 67. Mesmo assim, a variação entre 77% e 79% é relativamente muito pequena, o que leva novamente à discussão sobre o desenvolvimento tecnológico do equipamento. Será possível atingir esse nível de variação com os equipamentos fabricados hoje? É economicamente viável aplicar esse tipo de controle? Essas problemáticas estarão como perspectivas de trabalhos futuros.

Para o dia 14 de agosto, os sinais de controle para válvulas (Figuras 69 e 70) apresentam os mesmos indicativos de maior necessidade de irrigação para as zonas externas, zonas 4 e 5. Ainda que de forma mais ampla, toda área apresenta variações percentuais relativas muito pequenas, mas o sistema consegue diferenciar regiões, confirmando que a metodologia é válida para sistemas de irrigação por taxa variável.

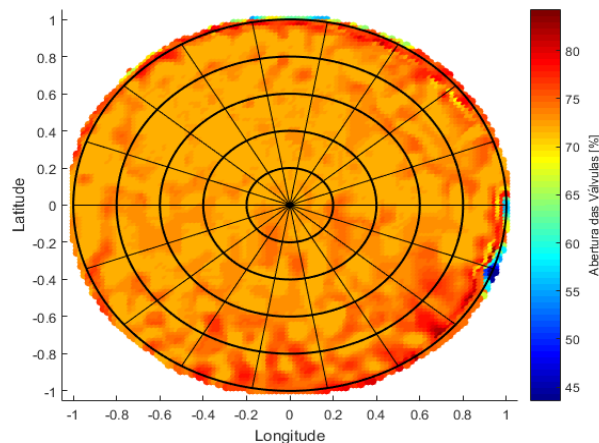


Figura 68- Abertura proporcional das válvulas solenoides para o dia 14 de agosto

As regiões dentro do IV quadrante possuem as maiores variações, fica mais evidente quando se analisa a Figura 70 e é possível ver uma variação percentual maior para o sinal de *setpoint* nessas fatias angulares.

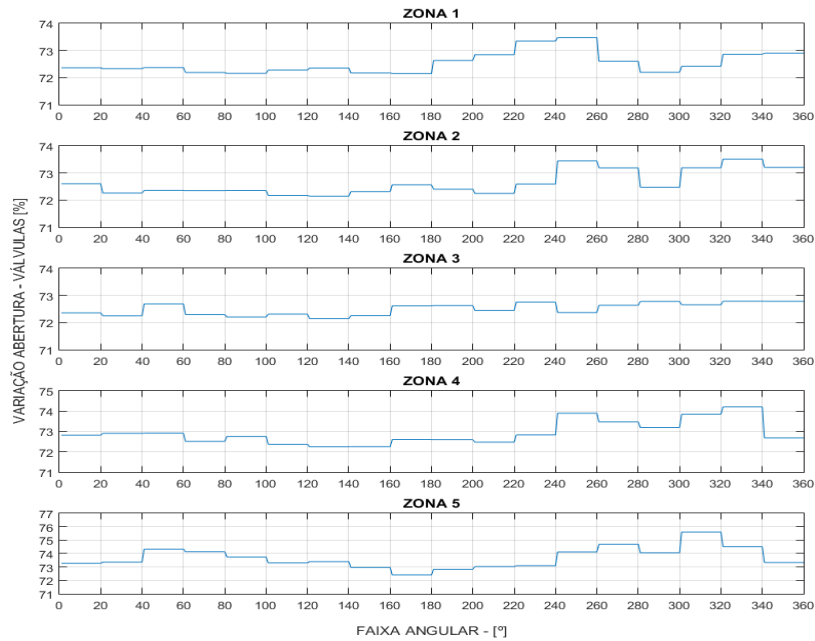


Figura 69- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação para o dia 14/08

Se os sinais de controle fossem enviados para um equipamento do pivô central, de características e especificações de 9 mm, o resultado seria o que é apresentado na Figura 71, que mostra a comparação entre a lâmina de irrigação determinada pelo modelo convencional uniforme e a lâmina de irrigação estimada indiretamente pelo sistema *Fuzzy-VRI* para a data do dia 06 de agosto de 2018.

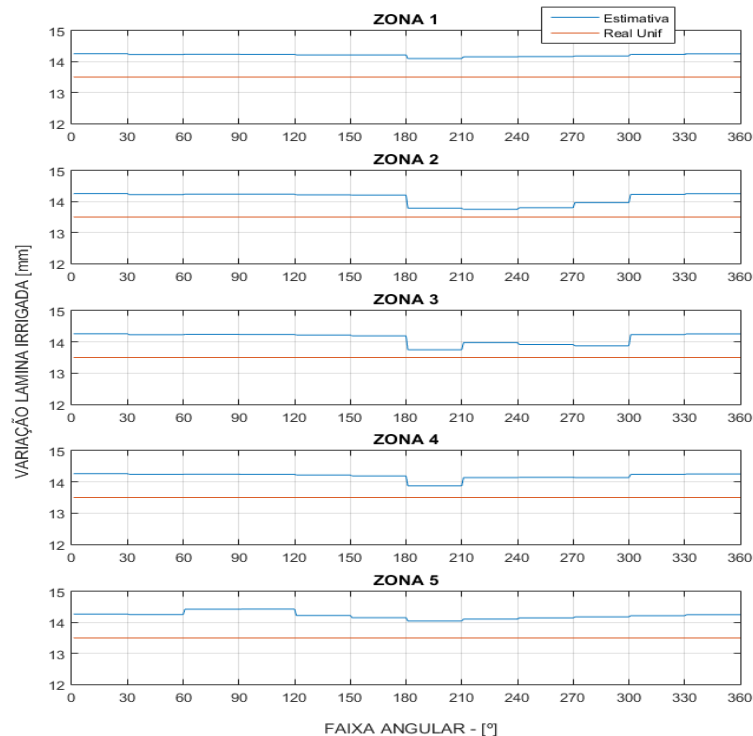


Figura 70- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo para o dia 06 de agosto

Nessa Figura, é possível ver claramente a tendência uniforme das estimativas geradas pelo sistema *fuzzy* e o quanto são próximas são das estimativas reais. A Figura 72 mostra as lâminas estimadas para a data do dia 14 de agosto, que foram determinadas por cada metodologia.

Nas Figuras 71 e 72, as lâminas estimadas pelo sistema *Fuzzy-VRI* estão muito próximas às que foram determinadas localmente pela metodologia convencional, um indicativo de que a metodologia desenvolvida é capaz de acompanhar a evolução da necessidade hídrica igualmente feita pelo balanço hídrico, método usado para a determinação real da lâmina de irrigação na área estudada.

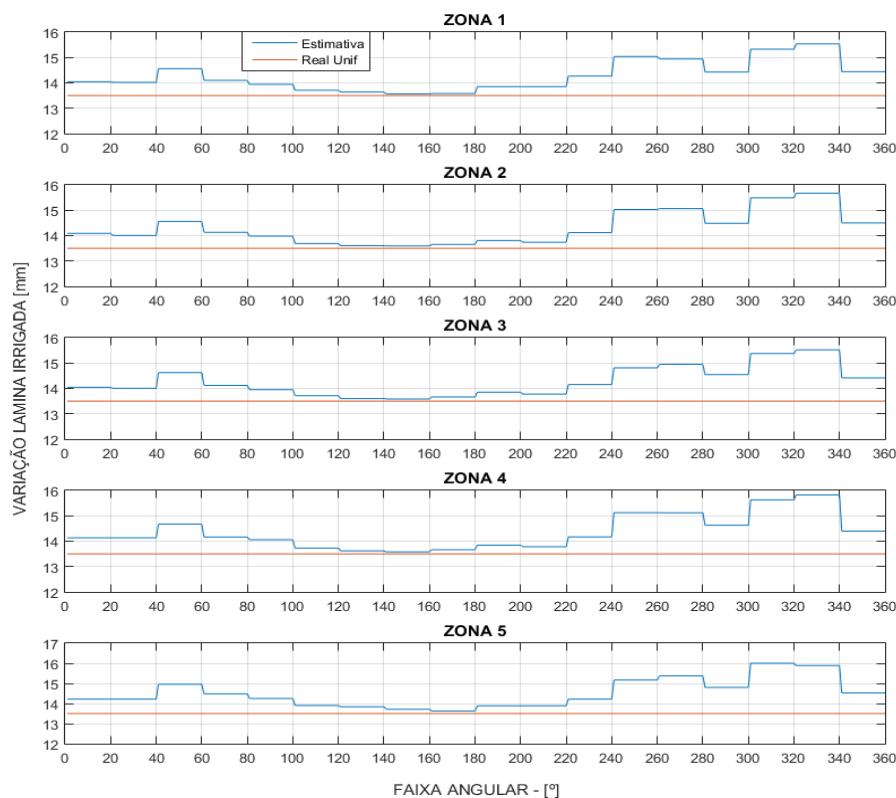


Figura 71- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo para o dia 14 de agosto

5.1.7 Resultados para imagens do dia 22 de agosto de 2018

A análise para esse dia é semelhante ao caso estudado no dia 05 de julho, em que a data disponível pelo sensoriamento remoto acontece depois da data de irrigação real. Nesse caso, a data da irrigação teve início no dia 20 de agosto de 2018, com determinação de uma lâmina fixa ou uniforme de 13,55mm para toda a área.

Os resultados observados para essa data mostram que, de fato a colheita está próxima. Isso pode ser confirmado devido a uma maior uniformidade das imagens registradas e dos sinais de controle gerados pelo sistema *Fuzzy-VRI* (Figura 73). Toda a área apresenta uma mesma tonalidade de cor, um indicativo de que a variação percentual global varia muito pouco, e isso pode ser confirmado na Figura 73b. O percentual da variação de velocidade de giro encontrado pelo sistema *fuzzy* fica entre 67% e 70,5%.

Apesar da pouca mudança na variação relativa da velocidade, o sistema desenvolvido consegue encontrar uma variação espacial da área de irrigação, atingido assim o objetivo principal na determinação de irrigação por taxa variável.

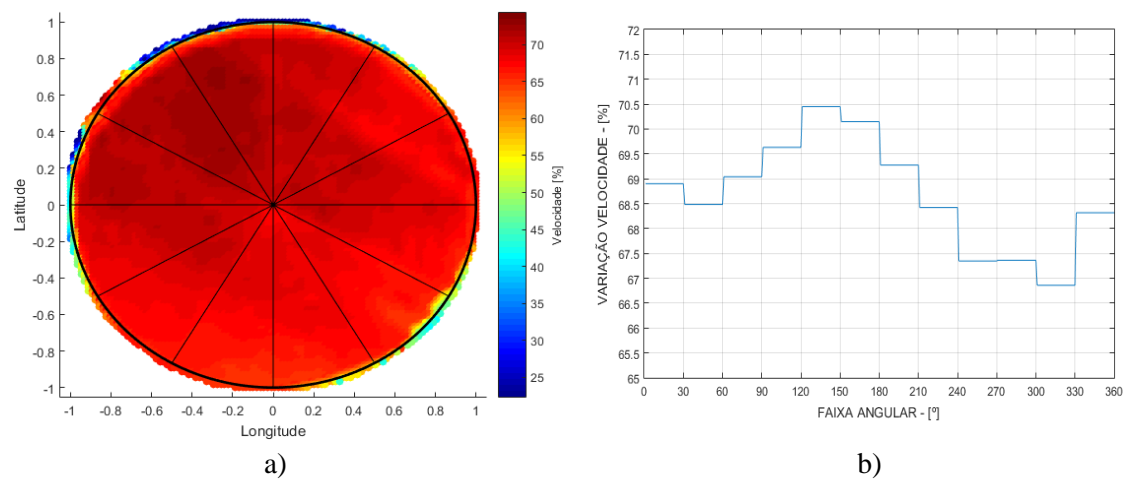


Figura 72- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Esse resultado é confirmado na saída do controle para as válvulas (Figura 74), com uma distribuição uniforme em a toda área. Pode-se perceber na região do II quadrante uma leve alteração ou uma maior variação com uma possível indicação de aumento na irrigação, e essa mesma mancha é percebida na Figura 73a.

Também na Figura 74 foi dado destaque para uma região do IV quadrante, fatia angular de 300° a 330°, que pelos indicativos apontados seria uma região de atenção ou percebida pelo sistema *fuzzy* como uma zona para um maior volume de irrigação. Essa questão é retomada na análise do dia 27 de agosto.

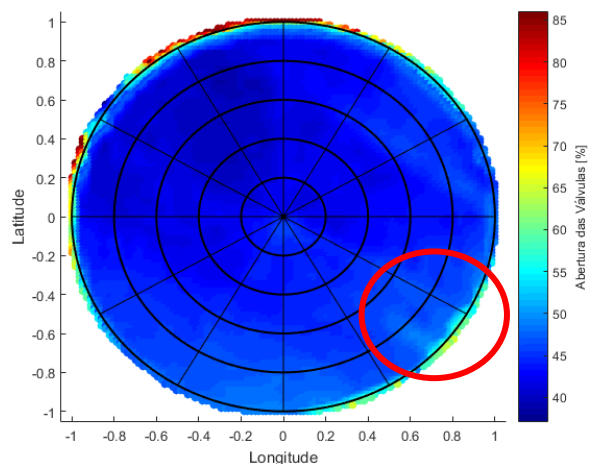


Figura 73- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Essa baixa distinção entre as áreas pode estar atribuída ao número de entradas que o sistema *Fuzzy-VRI* possui, mas é possível que existam melhores variáveis que indicariam a variação espacial da área de estudo. Outra hipótese surge para explicação da uniformidade nos resultados, a de que sensoriamento remoto baseado apenas no desenvolvimento vegetativo pode não ser suficiente para detectar a variação espacial de uma plantação de alta performance.

As imagens de satélites ou sensoriamento remoto possuem a características apenas de obter informações sobre as áreas com mais folhagens, mesmo que, com algumas variáveis que possuam características para determinar informações como a umidade relativa próxima ao solo e proporção de nitrogênio, essas informações tendem a ser menos relevantes ao se deparar com áreas de plantios completamente desenvolvidas.

Dessa forma, as informações como SAVI e temperatura de dossel assumem papel principal na tomada de decisão realizada pelo sistema *fuzzy*. Entretanto, apesar dessa desvantagem, o sistema *Fuzzy-VRI* obtém sucesso ao encontrar variação espacial, mesmo que pequena, na área de estudo. Porém, como dito e esclarecido esse controle inferido pelo sistema *Fuzzy-VRI* só pode ser validado quando enviados ao pivô e verificado seu comportamento.

Os resultados até esse ponto trazem consigo a informação de que a abertura das válvulas (Figura 75) de áreas com necessidades hídricas diferentes, porém com uma variação percentual pequena.

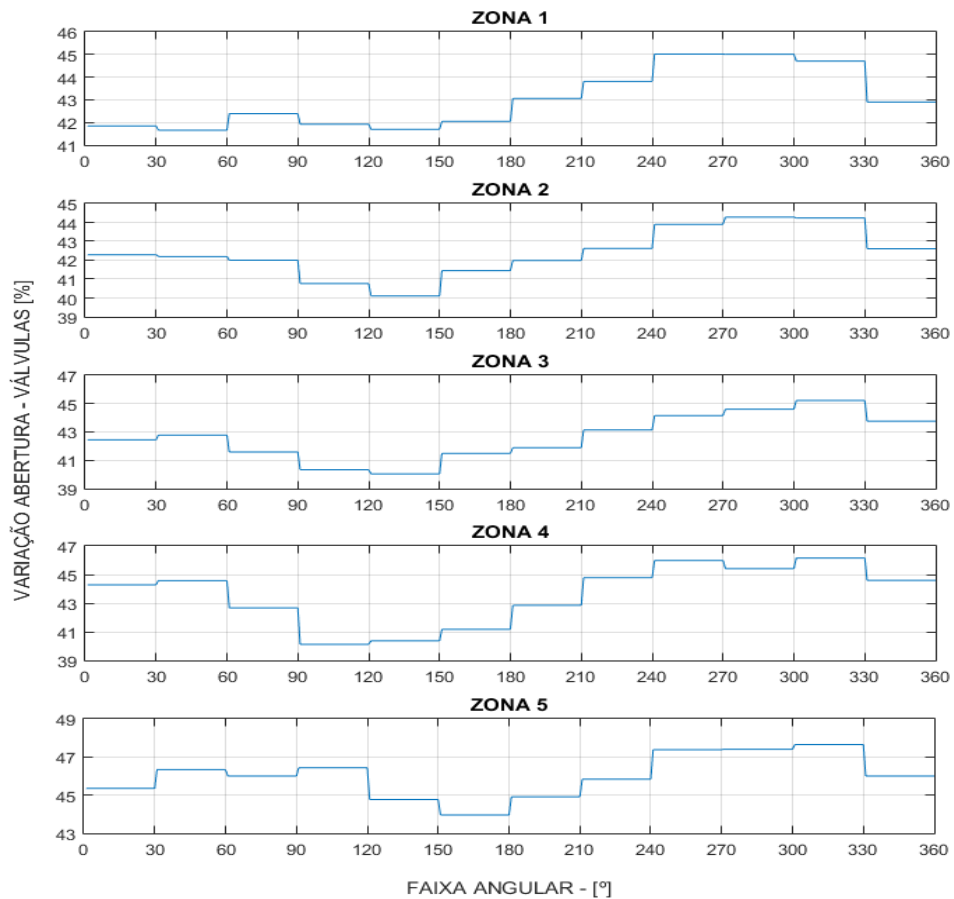


Figura 74- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Dessa forma, em conjunto com a fabricante do equipamento, foi estipulada uma maneira de realizar tal simulação. Se enviado para um pivô central com características e especificações de construção para uma irrigação convencional de 9 mm, esse sinal irá gerar o resultado mostrado na Figura 76. O valor apresentado para os dados reais são de um pivô com características e especificações para uma irrigação convencional de 6,1mm, o que levaria o pivô a girar com velocidade fixa de aproximadamente 45% de sua velocidade máxima para atingir o volume de 13,55mm.

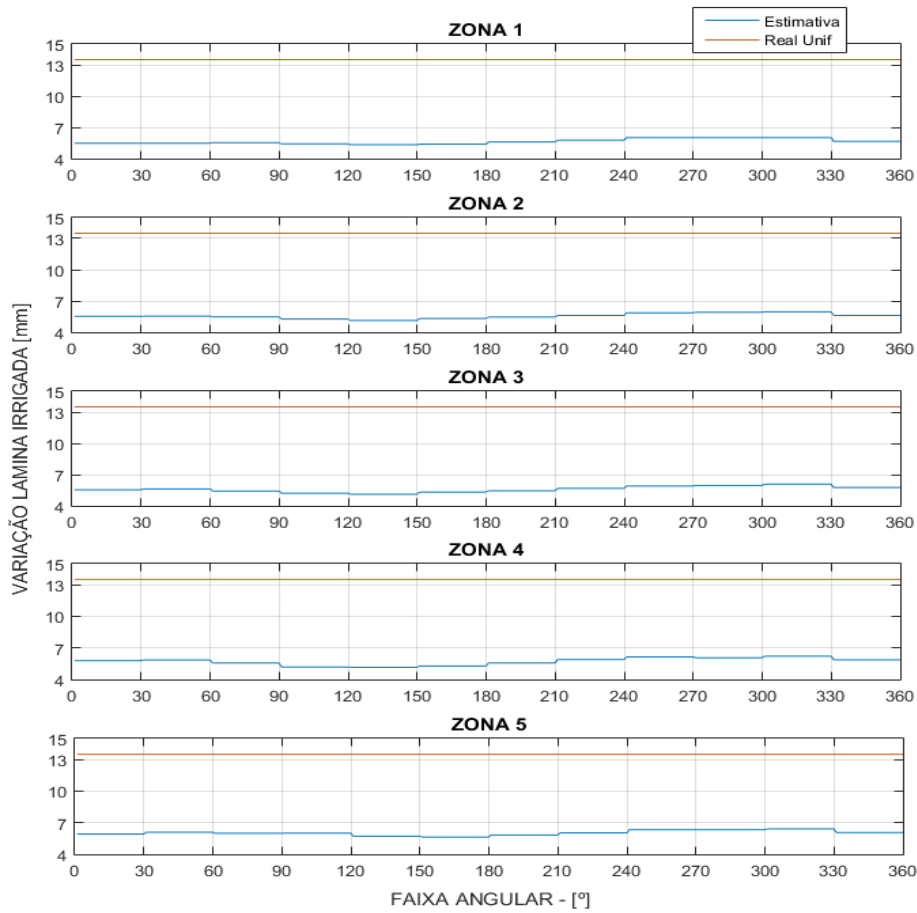


Figura 75- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

A irrigação de uma lâmina praticamente fixa é confirmada. Como se vê, o mesmo valor de volume seria aplicado pelo pivô se recebesse os *setpoints* encontrados pelo sistema *fuzzy*. O valor da lâmina encontrado indiretamente pelo *Fuzzy-VRI* é de aproximadamente 6 mm, e é esse valor que chama a atenção, pois se trata de uma estimativa de irrigação indicada pelo sistema desenvolvido aproximadamente 55% menor do que a lâmina real aplicada. Lembrando que a data que se iniciou aplicação real de irrigação foi no dia 20 de agosto e completou o giro na data do dia 21, e a imagem de satélite disponível para análise foi no dia 22.

A explicação reside na característica de os sistemas *fuzzy* conseguirem agregar muitas informações e, a partir desse conjunto de dados, realizar inferências que não seriam fáceis para um operador humano. Uma das variáveis que compõem o sistema *fuzzy* é a informação sobre a umidade próxima do solo, que sozinha não tem relevância para uma análise de estresse hídrico, mas quando analisada de forma conjunta com mais

variáveis, torna possível para o sistema identificar condições ou comportamentos de estresse de ambiente estudado.

Para essa data, o sistema interpretou o ambiente como muito úmido, o que de fato ocorre, pois houve irrigação um dia antes. A regra criada para esse tipo de situação é simples: se o ambiente ou a região estiver muito úmida, então se aumenta a velocidade e se diminui a abertura de válvulas, o que leva à indicação MAIOR a velocidade, MENOR o volume irrigado, MENOR a abertura de válvulas, MENOR o volume irrigado.

5.1.8 Resultados para imagens do dia 27 de agosto de 2018

No dia 28 de agosto de 2018 foi realizada a última aplicação real da irrigação para a área em estudo. Porém, o sistema i-ekbase só conseguiu disponibilizar as imagens do dia 27 de agosto de 2018, ou seja, a análise do resultado foi um dia antes da real aplicação. O que se espera é que o sistema indique a velocidade e a abertura de válvulas proporcionalmente ao necessário para repor as perdas hídricas até aquela data. A data programada e calculada pela metodologia convencional pode ser usada como parâmetro de comparação dessa inferência esperada.

A velocidade estimada para o pivô está relativamente menor se comparada com a data anterior, o que pode ser um indicativo de maior volume de irrigação. A Figura 77 destaca o dado na região que fica no IV quadrante e detectado na análise anterior.

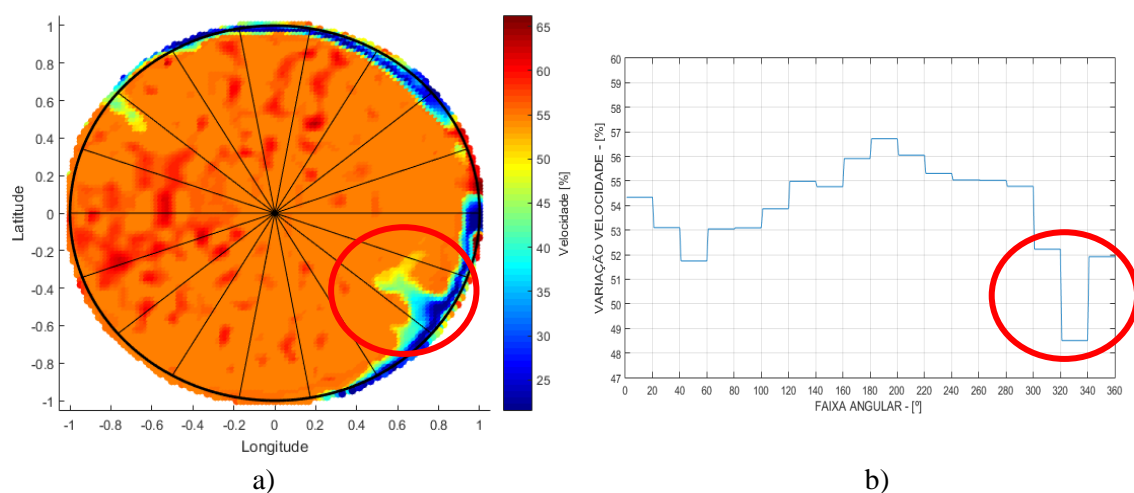


Figura 76- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

O sistema *fuzzy* possui sensibilidade suficiente, apesar da limitação de variáveis de entrada, para antecipar o acontecimento de um possível problema na área de plantação. Infelizmente não há mais informações para corroborar essa hipótese, pois a empresa que cuida da gestão da irrigação não informou problema algum com essa área específica. Dessa forma, o problema é tratado como variação de necessidade hídrica, como já vinha sendo tratado em outras análises. O sinal de saída para a abertura das válvulas (Figura 78), além de apresentar a mesma característica de uma distribuição espacial mais uniforme, mostra também a mesma região ou zona com uma maior necessidade de aumento na irrigação.

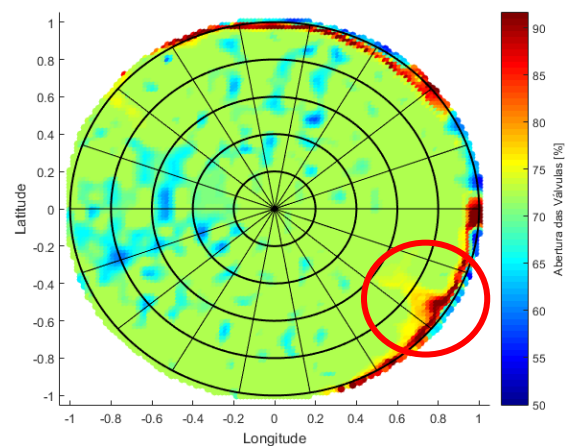


Figura 77- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Cabe ressaltar, e até agora não discutido, que a zona 1 em todas as análises traz um comportamento que na prática pode ser desconsiderado, uma vez que aquela área do entorno do centro do pivô não é cultivada. Porém, para efeito de análise, os resultados foram apresentados. Na Figura 79, vê-se que a zona 1 não há variação espacial estimada pelo sistema *Fuzzy-VRI*, entretanto, o que chama atenção é a zona 5 na fatia entre 320° a 340°, com maior variação percentual para abertura da válvula. A mesma variação percentual foi verificada para o controle da velocidade (Figura 77b).

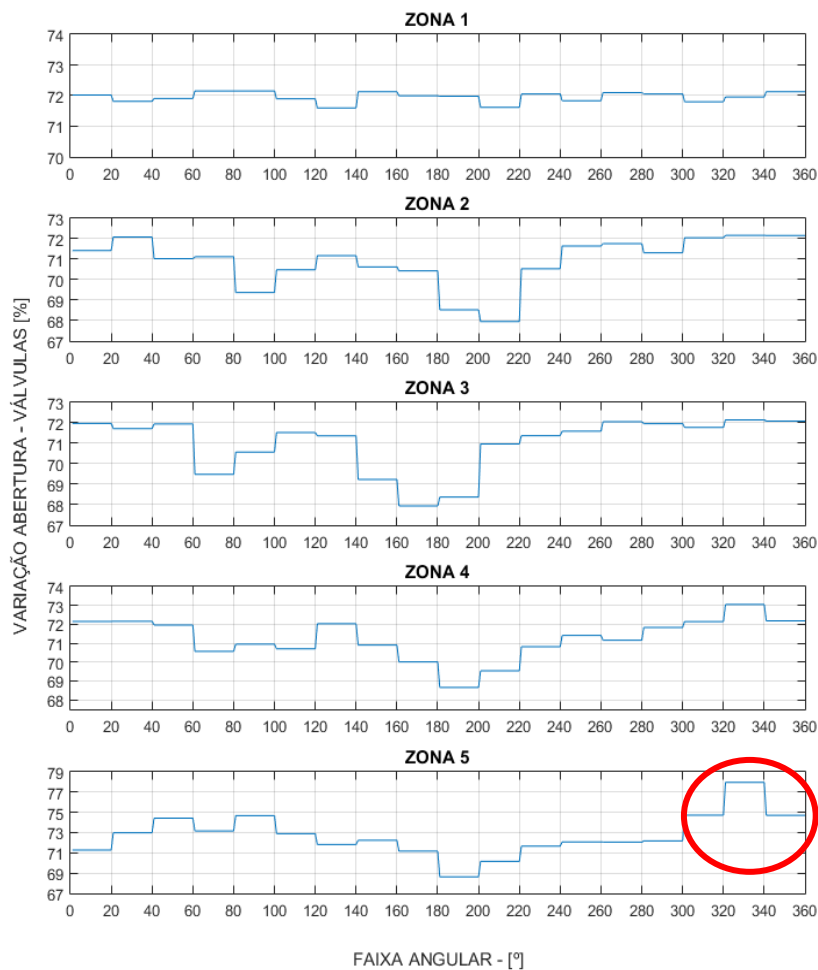


Figura 78- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Nítidamente, o valor é superior aos encontrados para as outras zonas. Enquanto as zonas 1, 2, 3 e 4 possuem valores aproximadamente 73% na sua máxima variação, a zona 5 obteve um valor próximo de 79%. Nessa questão, sobre a indicação de uma zona com maior necessidade de atenção, se assim for possível fazer essa afirmação, faz com que o sistema atinja seu objetivo de determinar zonas espacialmente distribuídas com diferentes níveis de indicação para o volume de água a ser aplicada, atendendo, dessa forma, à metodologia de irrigação por taxa variável.

Para confirmar a sensibilidade do sistema *Fuzzy-VRI* na determinação de uma evolução no volume de água a ser irrigada, de forma indireta, a Figura 80 traz os valores comparativos entre a aplicação real com modelo convencional uniforme e a estimativa indireta gerada pelo sistema.

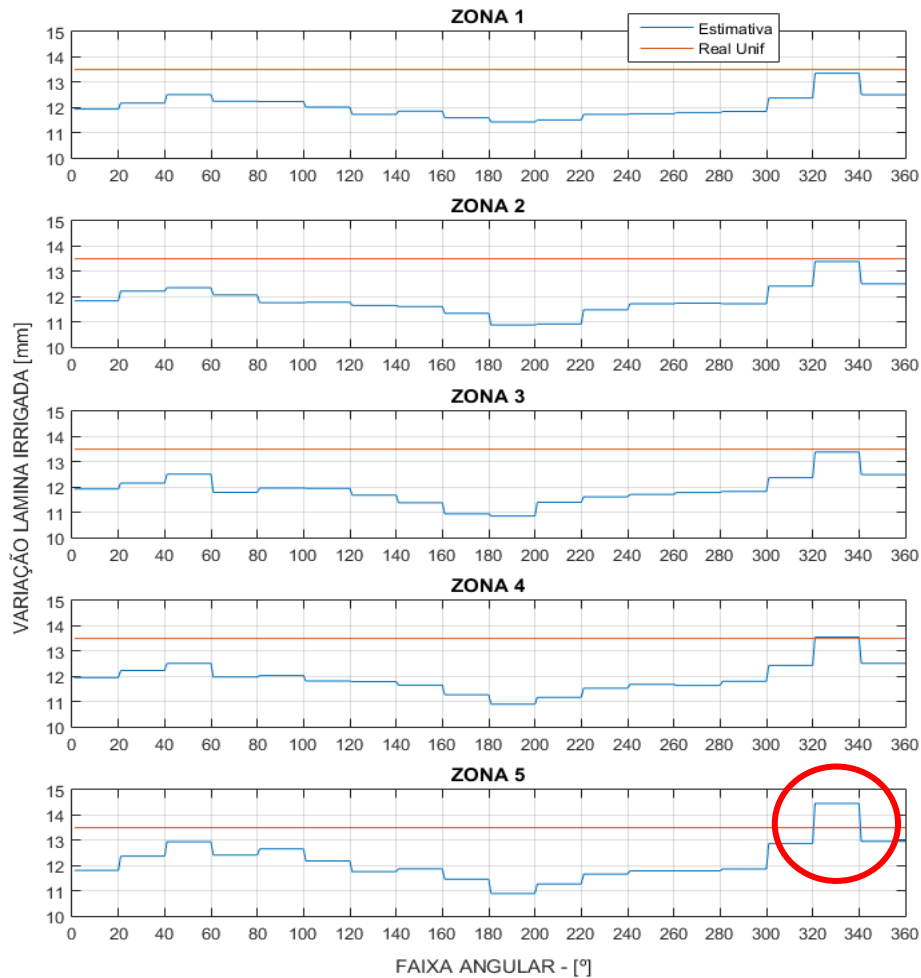


Figura 79- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

A zona 5 – fatia angular de 320° a 340° – é confirmada como zona de atenção, com a maior indicação de volume a ser irrigado, dessa forma é seguro afirmar que o sistema *Fuzzy-VRI* é capaz tanto de inferir a variação espacial da área de plantio quanto obter sucesso em estimar indiretamente a variação temporal do volume de irrigação a ser aplicado. E ainda o sistema, da forma como foi construído, é capaz de acompanhar a evolução da necessidade hídrica da plantação.

5.1.9 Discussão sobre estudo de caso em Ipiranga do Norte, MT, Brasil

Devido ao uso comercial dessa área, algumas características do comportamento do desenvolvimento da plantação não puderam ser conhecidas. Por exemplo: não foi possível determinar porque algumas regiões possuíam alto indicativo de variação ou manchas, ou

seja, não foi possível afirmar se as regiões destacadas pelo sistema *fuzzy* eram realmente problemas relacionados apenas com necessidades hídricas.

Contudo, comprovou-se que o sistema *Fuzzy-VRI* é capaz de acompanhar a evolução da necessidade hídrica de todo o ciclo de plantação e atende à metodologia de irrigação por taxa variável, ou seja, o sistema foi capaz de perceber locais ou regiões com mais ou menos necessidade hídricas sem se distanciar da medida real encontrada por sistema comercial instalado.

O ponto positivo em se analisar uma área com acompanhamento ou gerenciamento profissional da irrigação é que a plantação terá comportamento de alta performance com desenvolvimento esperado e previsível, evidenciando assim as vantagens e desvantagens da metodologia.

Um aspecto que deve ser melhorado é em relação ao uso apenas de sensoriamento remoto ou imagens de satélites, quando o sistema se deparou com situação de pleno desenvolvimento foliar e não obteve resultado satisfatório com a determinação da variação espacial.

Para pesquisas futuras, dever-se-ão incluir maior frequência de imagens sem nuvens e incorporação de medidas locais como, por exemplo, a mediação de água no solo, além de experimentos de longo prazo, incluindo estudos sobre aumento ou diminuição da produção para proporcionar uma melhor perspectiva de quanto o VRI pode aumentar a eficiência do uso da água de irrigação.

Apesar das limitações, o sistema conseguiu atingir o objetivo proposto inicialmente.

5.2 Brule – Nebraska, EUA

A área de cultivo em Brule foi projetada como um sistema contínuo de plantio direto de milho, servindo como base de pesquisas para universidade de Nebraska, Lincoln (Figura 81). O local possui um pivô central Modelo 8500 Zimmatic (Lindsay NE), equipado com a opção de irrigação de taxa variável, incluindo controle individual das válvulas proporcionais. (Barker et al., 2018).

Os estudos em Brule apresentam características diferentes das encontradas no estudo de caso em Ipiranga do Norte. Os pesquisadores aplicaram volumes de irrigação maiores para atingir uma profundidade maior e assim reduzir as perdas por evaporação,

dessa forma, o evento de irrigação foi maior, e realizaram planejamentos da irrigação semanalmente. Com essas medidas, os autores não precisaram monitorar diariamente a área de estudo.



Figura 80- Área de estudo localizado na região de Brule, Nebraska, EUA
Fonte: Google Earth

A área de plantio foi dividida em blocos com base na capacidade de água disponível no solo ou capacidade de campo. O estudo desenvolvido por Barker et al., (2018) foi estruturado com dois tipos de sistemas de gerenciamento de irrigação, um é o sistema de irrigação por taxa variável baseado em sensoriamento remoto e balanço hídrico (VRI-RS), e o outro é um sistema de irrigação uniforme usando sonda de nêutrons (Uniforme) (Figura 82).

O estudo de caso que se seguirá corresponde a uma análise dos níveis de lâmina d'água estimados pelo modelo VRI-RS, modelo convencional Uniforme, em comparação com a lâmina d'água estimada de maneira indireta pelo modelo *Fuzzy-VRI*, para diferentes datas amostradas ao longo do ciclo da plantação. Para facilitar as observações

e análises dos resultados obtidos pelo sistema *fuzzy* de irrigação, optou-se por dividir a área de Brule em fatias 30°, fazendo em cada fatia uma subdivisão em três zonas: z1, z2 e z3.

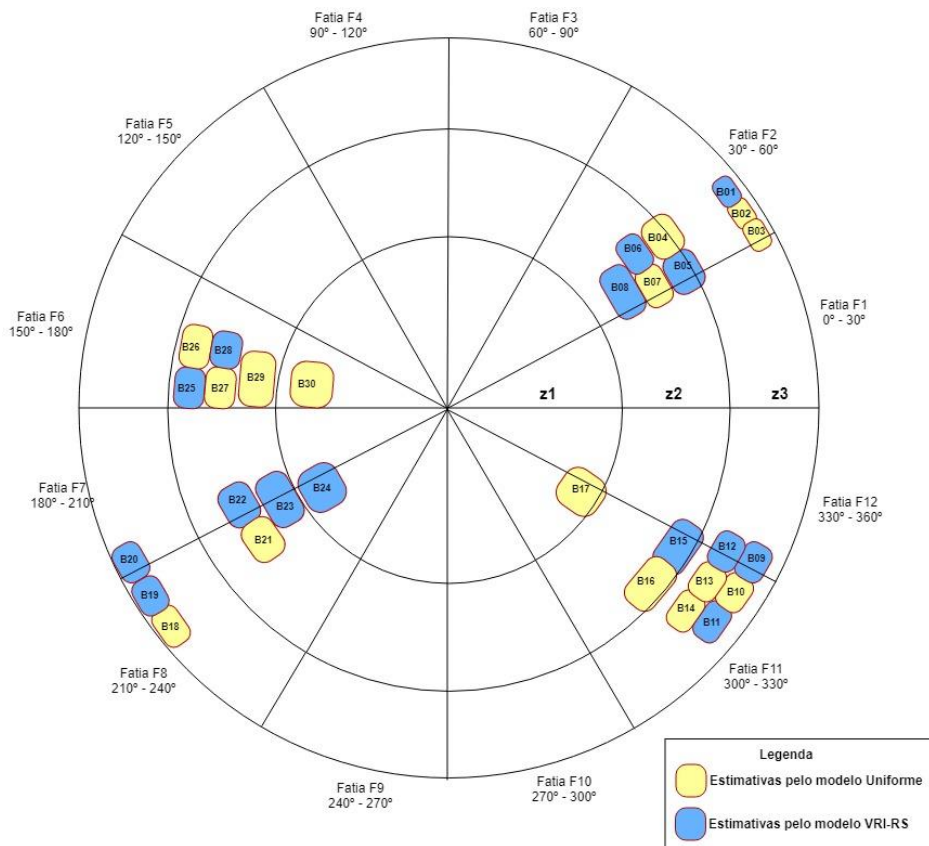


Figura 81- Área de plantio em Brule com as regiões de gerenciamento de irrigação
Fonte: Adaptado de Barker et al., 2018.

5.2.1 Datas amostradas

Uma vez estabelecida a parceria de trabalho com Universidade de Nebraska, Lincoln, os dados gerados pela pesquisa de Barker et al., 2018 ficaram disponíveis para análise; bem como uma grande participação do professor Dr. Derek M. Heeren na interpretação das informações e resultados. Com isso, os dados sobre os eventos de irrigação estabelecidos pela equipe de pesquisa da Universidade do Nebraska são apresentados resumidamente na Tabela 08, e os dados completos podem ser encontrados no Apêndice A.

Tabela 8 - Datas de evento de irrigação e volume aplicado em Brule

Datas		Lâmina real aplicada	
Início do evento irrigação	Fim do evento irrigação	Uniforme [mm]	VRI-RS [mm]
24/05/2016	25/05/2016	12,7	12,7*
23/06/2016	25/06/2016	15,24	15,24*
04/07/2016	06/07/2016	15,24	15,24*
07/06/2016	09/07/2016	20,574	20,574*
12/07/2016	14/07/2016	20,574	20,574*
15/07/2016	16/07/2016	20,574	20,574*
17/07/2016	19/07/2016	20,574	20,574*
24/07/2016	26/07/2016	20,574	20,574*
31/07/2016	02/08/2016	20,574	20,574*
05/08/2016	07/08/2016	20,574	20,574*
10/08/2016	12/08/2016	25,4	25,4*
20/08/2016	22/08/2016	25,4	25,4*
24/08/2016	26/08/2016	25,4	5,08 ~20,32**
31/08/2016	02/09/2016	25,4	10,16 ~25,4**
11/09/2016	13/09/2016	5,08	20,32 ~25,4**
19/09/2016	21/09/2016	15,24	25,4*
23/09/2016	25/09/2016	13,55	31,5

Fonte: Adaptado de Barker et al., 2018.

* Valores de lâmina de irrigação igual em todas as zonas de gerenciamento, valores podem ser verificados na planilha fornecida pelos pesquisadores no Apêndice A. ** Valores de lâmina de irrigação variável encontrados nas zonas de gerenciamento.

De posse das datas de coleta de dados do estudo de caso fornecido pelos autores foi possível solicitar os dados do sensoriamento remoto para empresa *i-ekbase*. Por se tratar de dados comerciais, a parceria estabelecida para uso das imagens de satélite foi limitada, e somado a isso problemas com nuvens no momento de coleta das informações de sensoriamento fez com que a análise e a comparação entre os sistemas de gerenciamento das zonas de irrigação ficassem restritas a apenas 07 (sete) datas, como mostra a Tabela 09.

Tabela 9 - Datas das imagens de fornecidos pelo sistema *i-ekbase* e os dados locais

Imagens <i>i-ekbase</i>	Datas		Lâmina real aplicada	
	Início do evento irrigação	Fim do evento irrigação	Uniforme [mm]	VRI-RS [mm]
24/06/16	23/06/2016	25/06/2016	15,24	15,24
10/07/16	07/06/2016	09/07/2016	20,574	20,574
	12/07/2016	14/07/2016	20,574	20,574

26/07/16	24/07/2016	26/07/2016	20,574	20,574
11/08/16	10/08/2016	12/08/2016	25,4	25,4
19/08/16	20/08/2016	22/08/2016	25,4	25,4
12/09/16	11/09/2016	13/09/2016	5,08	20,32 ~25,4
20/09/16	19/09/2016	21/09/2016	15,24	25,4

Observa-se ainda na tabela 9 que nenhuma das datas de análise do sensoriamento remoto fornecidas pela empresa i-ekbase coincidia com datas de início de evento de irrigação. Entretanto, esse fato não compromete as análises, pelo contrário: irá ajudar a determinar o grau de assertividade do sistema desenvolvido. Para melhor compreensão de como ficaram distribuída as datas do sensoriamento remoto dentro da programação estabelecida pela pesquisa de Barker (Tabela 10).

Tabela 10 - Distribuição das datas analisadas pelo sistema *Fuzzy-VRI*

		Início da irrigação	Fim da irrigação	
jun/16		23	24	25
jul/16		7	8	9
		24	25	26
ago/16		10	11	12
	19	20	21	22
set/16		11	12	13
		19	20	21

Diante do cenário apresentado o sistema *Fuzzy-VRI* analisará quatro datas que ocorreram dentro do evento de irrigação, ou seja, inicia se o evento de irrigação um dia após se tem os dados da imagem de satélite e um dia depois se finaliza o evento de irrigação. Como pode ser visto no dia 24 de junho de 2016 fornecida pela empresa i-ekbase, essa data ocorre logo após o evento de aplicação dia 23 de junho que possui fim do giro do pivô no dia 25 de junho.

O sistema *fuzzy* de irrigação também analisará uma data que ocorreu um dia depois do evento de irrigação e realizará a inferência em uma data que ocorre um dia antes do início da irrigação. Além da data do dia 26 de julho de 2016 que ocorre no último dia do evento. Como dito anteriormente essas amostras são suficientes para testar o grau de assertividade do *Fuzzy-VRI*.

5.2.2 Resultados para imagens do dia 24 de junho de 2016

O sistema inteligente obteve os resultados da variação da velocidade do giro do pivô (Figura 83) e da variação da abertura da válvula solenoide (Figura 84) dos aspersores. Pode-se observar diferentes regiões com diferentes valores de velocidade de giro do pivô, em que as regiões avermelhadas possuem uma maior velocidade percentual estimada e as regiões azuladas são zonas onde o pivô deverá diminuir a velocidade.

Dentro da área de plantio, a velocidade de giro varia entre os valores de 46% e 59% da velocidade máxima que o pivô central pode desenvolver (Figura 85b). Esse resultado encontrado corresponde aos valores de referência que deverão ser enviados ao controlador do pivô central, uma vez que os sistemas de controle desses equipamentos trabalham com percentual de velocidade de giro.

O sistema *Fuzzy-VRI* estima valores de velocidade para cada ponto ou pixel de resolução da imagem. Dessa forma, a informação ou controle determinado pelo sistema não pode ser enviado diretamente ao pivô, que devido à sua fabricação possui braço lateral, ou barra de pulverização, que gira ao mesmo tempo em toda sua extensão. Então, para que o resultado encontrado pelo sistema pudesse ser enviado para um controlador do equipamento, foi necessário calcular a média de velocidade por fatia. Não há na literatura metodologia indicada para esse cálculo.

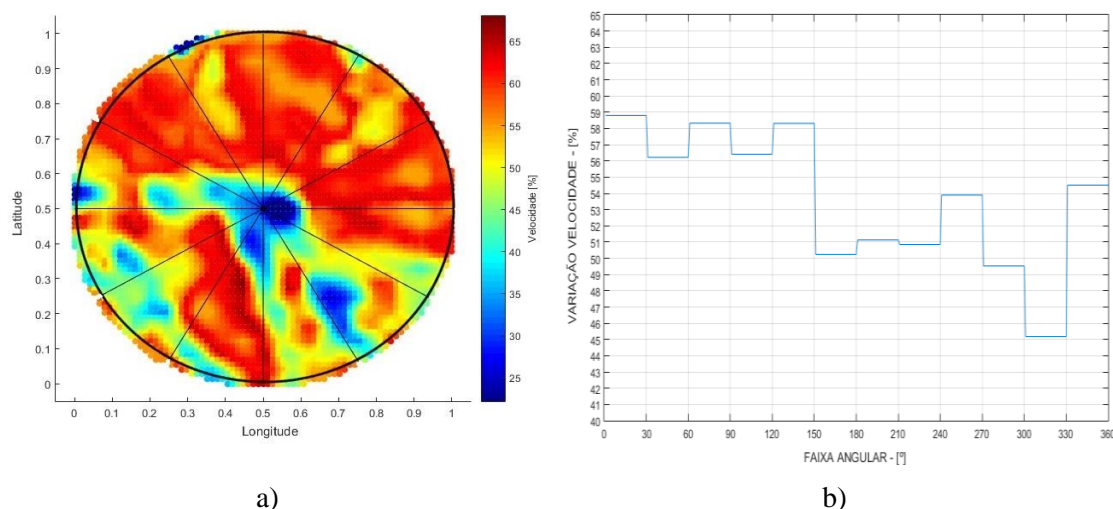


Figura 82- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Observam-se na Figura 84 diferentes regiões com diferentes valores para as aberturas proporcionais das válvulas em cada zona (z1, z2 e z3), em que as regiões

avermelhadas possuem uma maior abertura percentual estimada e as regiões azuladas são zonas onde o pivô deverá diminuir a abertura das válvulas solenoides.

Na Figura 84 é possível perceber a inversão das colorações de cada controle, isso se deve à implicação de que quanto maior a velocidade, **menor a quantidade de água** aplicada pelo irrigador e quanto maior a abertura das válvulas, **maior a quantidade de água** aplicada pelo irrigador.

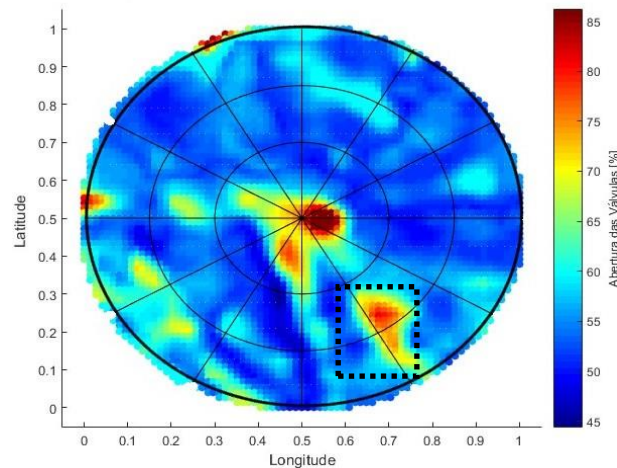


Figura 83- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Para encontrar uma zona de gerenciamento de irrigação, em destaque, a orientação deve estar baseada na Figura 82, e leva à seguinte delimitação: a zona 1 (z1) é toda a área contida dentro da menor circunferência; a zona 2 (z2) é a área entre a circunferência menor e o segundo círculo é a zona que fica entre as circunferências; e a zona 3 (z3) é a borda externa da área de cultivo analisada. Dessa forma, as faixas angulares se iniciam no quadrante I e terminam no quadrante IV, indo de 0° a 360°. Por exemplo, existe uma mancha de coloração laranja na z2 da Figura 84, e essa marcação representa uma mudança na abertura da válvula. Nesse caso, o sistema está indicando para aumentar o percentual de abertura.

A localização: fatia 11 ou faixa anular de 300° - 330° - z2. Essa mudança no controle de abertura das válvulas pode ser vista também nas Figuras 85 e 86. O resultado visto na Figura 85 corresponde aos valores de referência que deverão ser enviados ao controlador do pivô central. Os sistemas de controle desses equipamentos trabalham com percentual de abertura de válvulas, também conhecidos como ciclo de operação, e o destaque encontrado na Figura 85 é o resultado da mancha encontrado na Figura 84.

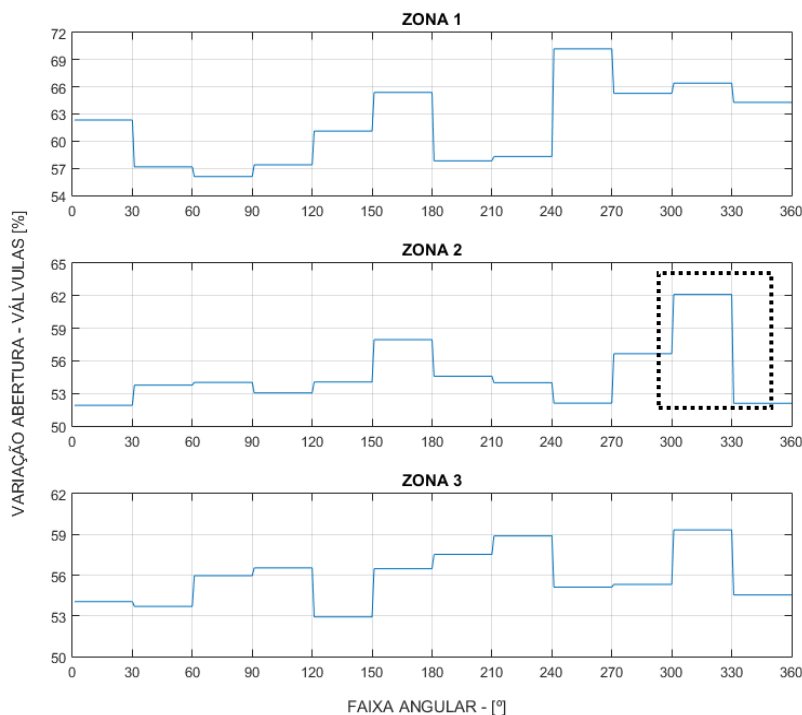


Figura 84- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Ao executar os sinais enviados pelo sistema de irrigação inteligente *Fuzzy-VRI*, o pivô central irá se movimentar na velocidade e com a abertura da válvula estabelecida, conseqüentemente produzirá a irrigação necessária ou estimada para aquele local. A lâmina d'água que o pivô irá irrigar a partir dos *setpoints*, como visto na metodologia, depende da construção ou especificação do pivô (Figura 86).

No caso do estudo, o tamanho do aspersor escolhido é aquele com a abertura de 15 mm, ou seja, caso a válvula solenoide receba o sinal para abrir 100% e o controle de velocidade de giro esteja com valor de 100%, o pivô irá aplicar o volume de 15mm de lâmina d'água na zona. Os valores das lâminas d'água obtidos no estudo de Barker estão identificados como Unif (distribuição de irrigação uniforme) e VRI-RS (distribuição de irrigação por taxa variável). O modelo VRI-RS usa sensoriamento remoto em conjunto com medidas do balanço hídrico, e para o modelo Unif os autores usaram uma sonda de nêutrons (ROBOCK, 2015), um dispositivo usado para medir a quantidade de água presente no solo.

As lâminas de irrigação estimadas indiretamente pelo sistema inteligente *Fuzzy-VRI* possuem variação espacialmente dentro das zonas de manejo divididas conforme apresentadas na Figura 86, e pode-se concluir que este resultado é de característica da irrigação por taxa variável.

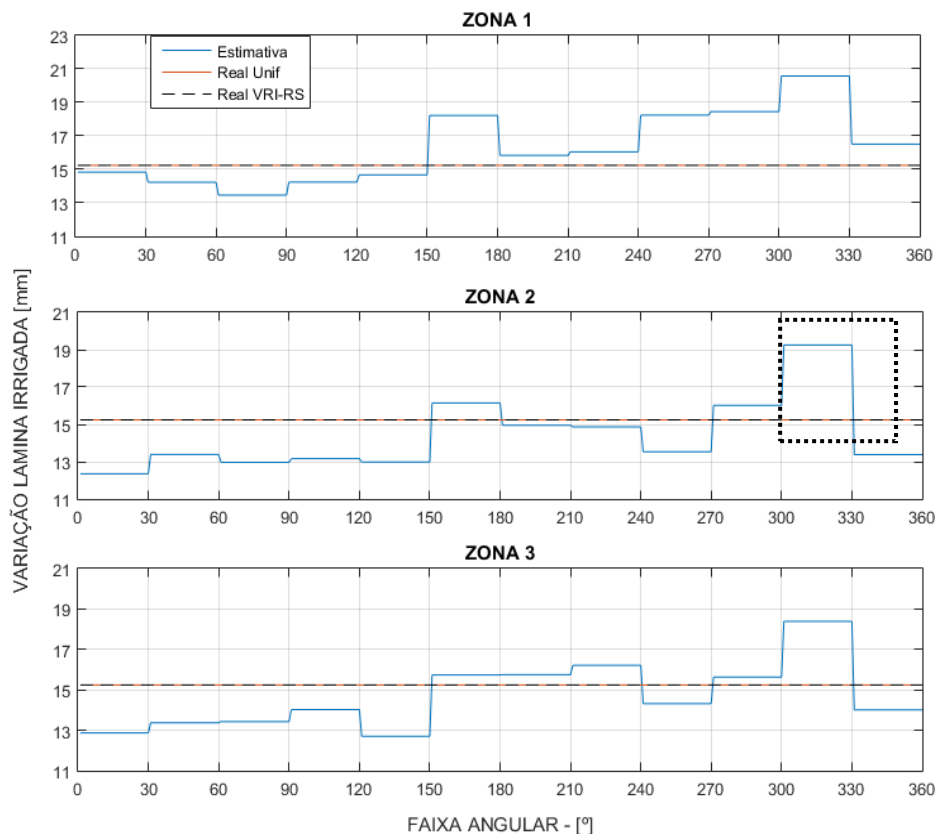


Figura 85- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Dentro da z2 da faixa angular 300°-360°, há uma estimativa elevada aproximadamente 23% maior em relação às estimativas do estudo de Barker, levando à conclusão de que essa região possui uma demanda maior por água. Para o estudo desse dia há, então, regiões em que o pivô já havia realizado a irrigação, o que possivelmente é apontado pelo *Fuzzy-VRI* entre as faixas 0° a 120°, e regiões que ainda seriam irrigadas, faixa entre 150° a 360°. Com isso, é possível concluir o sistema desenvolvido obteve sucesso em distinguir regiões mais úmidas de regiões com maior necessidade de irrigação.

O sistema *Fuzzy-VRI* obteve resposta mais apropriada em se tratando de metodologia de irrigação por taxa variável, veja a faixa angular de 300°-330°, mesmo local destacado nas Figuras 84, 85 e 86. O volume de água estimado pelo sistema *fuzzy* foi diferente do que estimado tanto pelo equipamento sonda de nêutrons quanto pelo modelo VRI-RS. Essa região está claramente identificada pelo sistema desenvolvido e possivelmente apresenta algum problema que deveria ser melhor investigado – no caso, o apontamento é para um déficit de água.

Pelos dados colhidos no estudo de Barker et al., Apêndice A, vemos que mesmo o modelo proposto pelos autores para irrigação por taxa variável não possibilitou a identificação dos locais onde possivelmente haveria uma necessidade maior de irrigação. Dentro desse aspecto, é possível verificar que a metodologia desenvolvida alcança esse objetivo e apresenta valores com variações espaciais de necessidade hídrica, e ainda consegue obter valores próximos ao obtidos pela sonda de nêutrons, equipamento clássico para a obtenção das necessidades hídricas da plantação.

Para que se possa discutir o uso eficiente de água na agricultura, a Figura 87 apresenta os valores do volume de água por faixa angular, respectivamente. O volume de aproximadamente de 584 m³ de água irrigada por fatia em apenas um dia de análise.

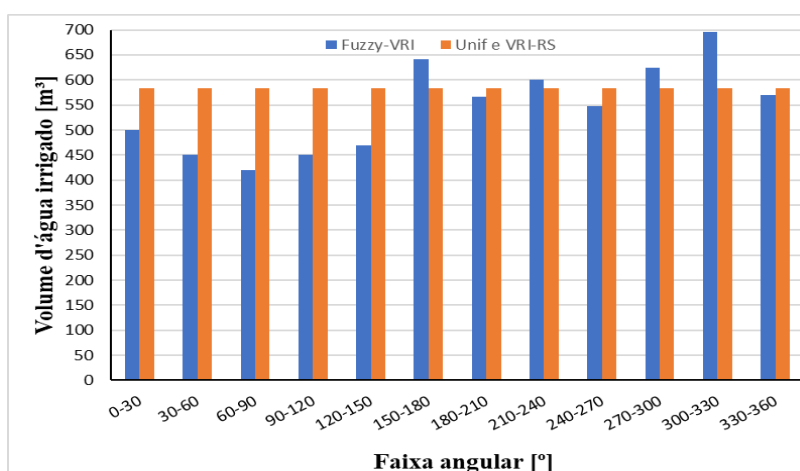


Figura 86- Comparação entre os volumes irrigados por fatia angular estimado por cada modelo

A área total de Brule é de aproximadamente 46 hectares. Assim, a área de uma fatia angular é 38.333 m², e levando em conta que o volume de 1 mm de lâmina d'água é o equivalente a 1 L/m², 15,24 mm irrigado em uma fatia dá o resultado de 584.200 L ou 584,2 m³. Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), 110 litros de água por dia é suficiente para atender as necessidades básicas de uma pessoa. Em 2013, o consumo médio per capita era de 166 litros por dia no Brasil, segundo o Sistema Nacional de Informações de Saneamento Básico do Ministério das Cidades. (SNSA, 2016).

Calcular o volume de água que se consome por faixa angular ajuda a entender que se a irrigação não for gerenciada de maneira correta, a agricultura pode se tornar uma grande vilã ou uma grande “gastadora de água”. A quantidade de água que se consome

nessa área também está atrelada ao tipo de plantação, por isso, vale destacar que cada tipo de planta necessita de uma quantidade diferente de água. A área de estudo apresenta características únicas e muito diferentes de área comerciais, tendo em vista que a área de Brule é experimental, os resultados demonstram que essa discussão sobre consumo de água não se aplica. Assim, os valores para o volume de água irrigado em m^3 não serão apresentados daqui em diante.

5.2.3 Resultados para imagens do dia 10 de julho de 2016

Esse dia de análise ocorre logo após o início do evento de irrigação e dois dias antes da próxima irrigação, como visto na tabela 9. O resultado expresso na Figura 88a e a extração do sinal *setpoints* (Figura 88b) estão de acordo com a característica de irrigação por taxa variável, ou seja, o sinal enviado para o controlador do pivô central terá variação da velocidade.

A inferência *fuzzy* para velocidade aponta regiões com baixa velocidade, em torno de 39%, e regiões com velocidades com médias de 50%, o que pode levar a uma indicação de elevado volume de água e um tempo maior para completar todo o evento de irrigação. Isso elevaria os gastos com energia elétrica, também.

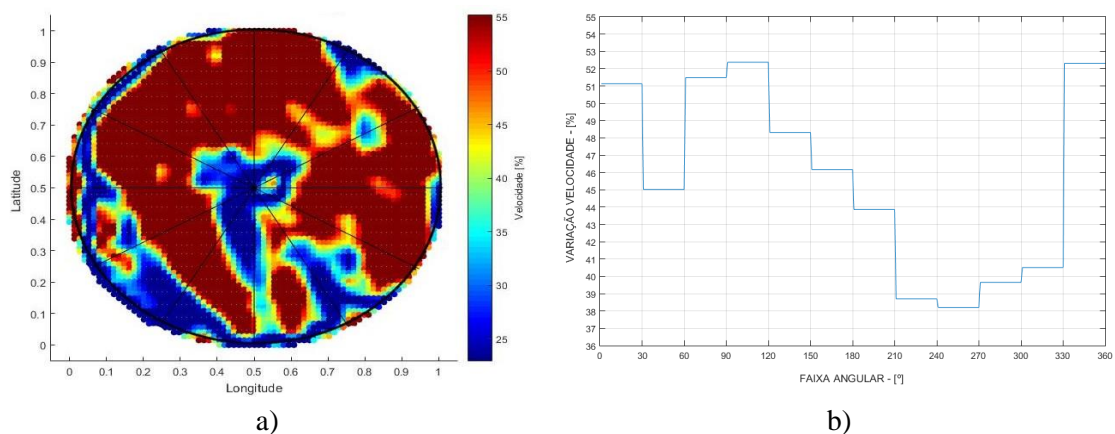


Figura 87- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Talvez uma evolução do sistema desenvolvido fosse a limitação do tempo excessivo para completar uma volta, ou seja, limitar a velocidade mínima e assim estabelecer um parâmetro de restrição com base no custo da energia elétrica.

Voltando para análise do dia 10 de julho, quando se observa o controle de abertura proporcional das válvulas (Figura 89), notam-se diferentes regiões dentro da área de

cultivo com diferentes valores. Pode-se verificar a existência de duas regiões que apresentam problemas relacionados com uma maior necessidade de irrigação.

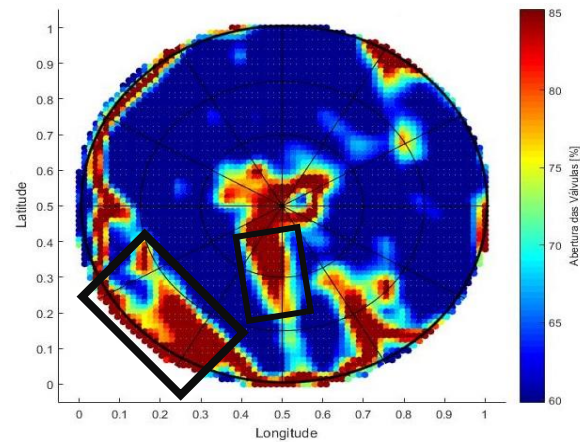


Figura 88- Abertura proporcional das válvulas solenoides

A saída do sistema para o controle das válvulas usa lógica inversa à lógica criada para o controle da velocidade (Figura 90), assim, o que se observa é que a geração de sinais com uma menor variação espacial proporcional e dessa maneira garantiu que todo o controle se mantivesse com característica VRI dentro do que foi determinado.

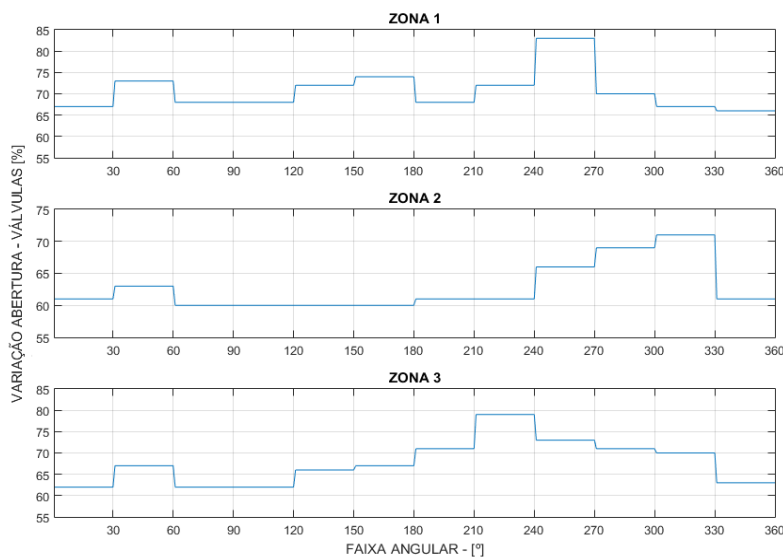


Figura 89- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

As zonas destacadas na Figura 89 também estão destacadas na Figura 91. A combinação do sinal de controle da velocidade e o sinal do controle das válvulas indicou que essas zonas deveriam ser irrigadas com volume superior aos dos métodos empregados

por Barker e que inicialmente foram detectados pelo sistema *Fuzzy-VRI*. Assim, o sistema desenvolvido apresenta uma vantagem em relação aos modelos comparados.

Na zona de irrigação z1 da faixa angular 240°-270°, a indicação é para um volume de irrigação 40% superior ao da estimativa determinada pelos modelos Uniforme e VRI-RS. Já a zona de irrigação z3 da faixa angular 210°-240° estimou um volume de 30% superior. São valores locais com irrigação excessiva para as referências estabelecidas no estudo, entretanto não se pode afirmar que essa irrigação levará a uma diminuição ou aumento na produção, uma vez que esse teste ou estudo não foi realizado.

Mais uma vez, a metodologia é superior em relação ao modelo clássico (Unif), pois existem locais com diferentes níveis de irrigação que a metodologia por sonda de nêutrons não consegue alcançar. Porém, a data apresenta uma indicação excessiva para o volume que deveria ser irrigado. A data é após um evento de irrigação, o que deveria levar a região a possuir uma umidade maior e assim ser detectada pelo sistema. Porém, a data antecede o próximo evento programado em dois dias, o que pode fazer com que região de fato esteja com uma maior necessidade de irrigação.

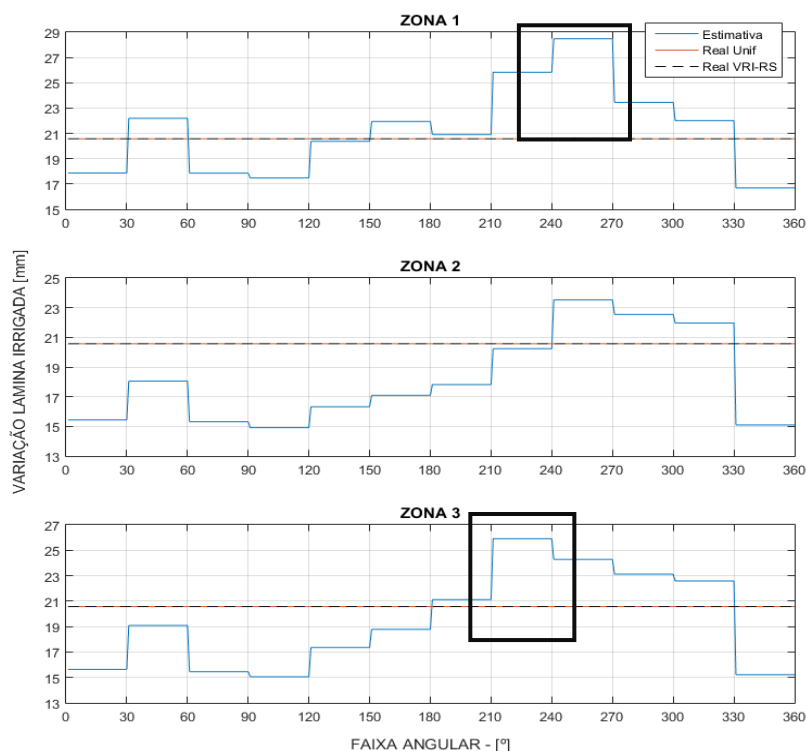


Figura 90- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

5.2.4 Resultados para imagens do dia 26 de julho de 2016

A análise desta data revelou que existe uma diminuição das regiões com maior necessidade de irrigação, mas ainda é possível verificar as mesmas zonas da data anterior com uma indicação de maior irrigação (Figura 92). As variações entre as faixas angulares possuem uma ligeira variação percentualmente, com variação de 52% e 62%.

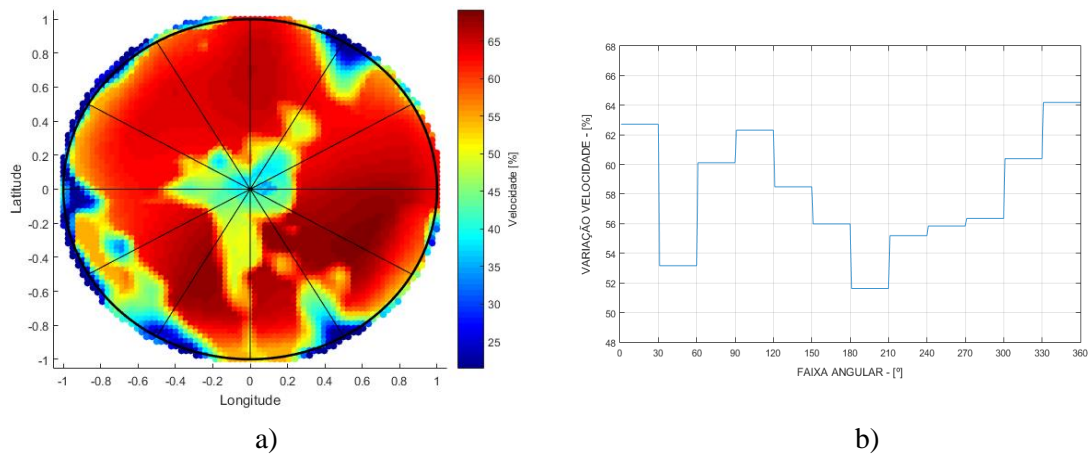


Figura 91- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Uma diminuição na amplitude da variação também é observada no resultado do controle da abertura das válvulas (Figura 93). O destaque fica para zona 3, que possui maior variação percentual detectada. Mesmo proporcionalmente pequena, houve variação espacial no sistema *Fuzzy-VRI*, e a mesma mancha que foi detectada na saída da velocidade pode ser vista no sinal de saída da abertura das válvulas.

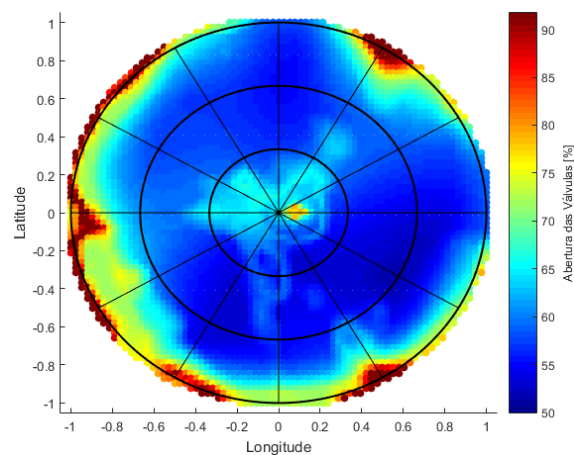


Figura 92- Abertura proporcional das válvulas solenoides

O resultado para o controle das válvulas é mais expressivo em relação à uniformidade. Observe a Figura 94: a variação proporcional entre as zonas, a máxima e a mínima, é pequena. Os valores para abertura variam entre 57% e 64% para zona 1, e entre 54% e 60% para zona 2 e a zona 3 é a região que possui maior variação percentual relativa apontando variações entre 58% e 73%.

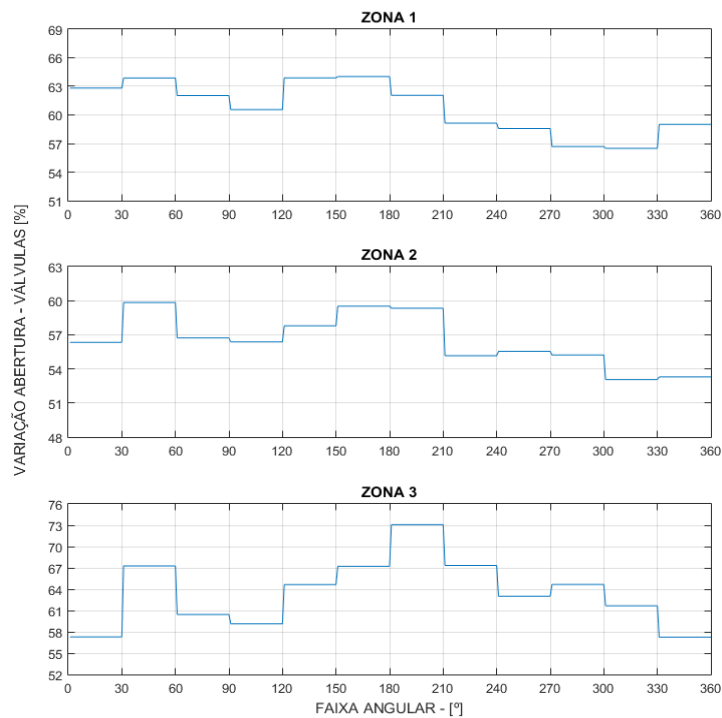


Figura 93- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

A variação percentual dos sinais de saída do *Fuzzy-VRI*, a qual define a velocidade e o a abertura das válvulas nas zonas de manejo, reflete-se na lâmina de irrigação produzida (Figura 95) caso os sinais fossem enviados, por um equipamento do tipo pivô central, caso este possua características e especificações construtivas para aplicação de uma lâmina de 15 mm.

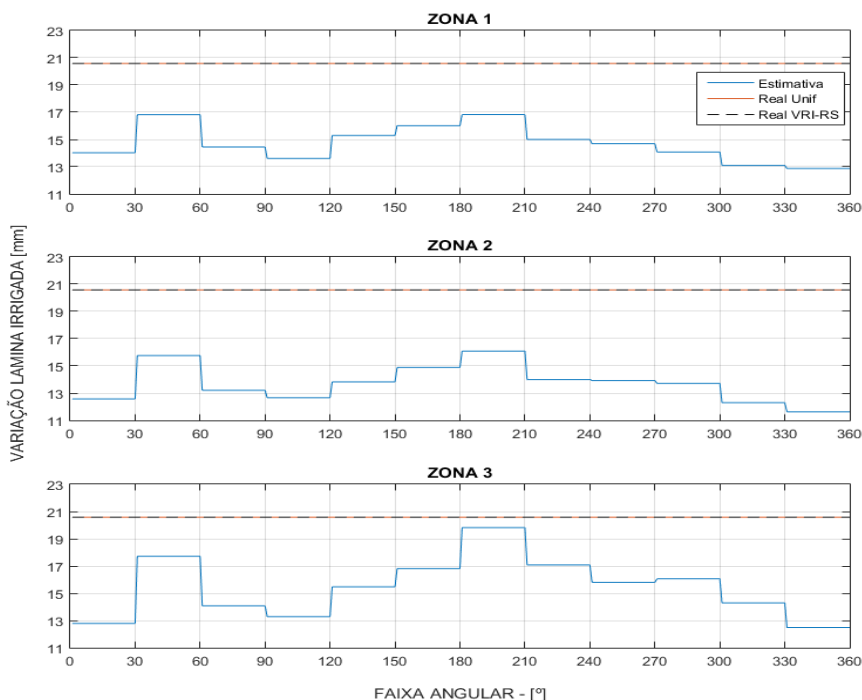


Figura 94- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

A indicação de volume a ser irrigado encontrada pelo sistema *fuzzy* foi menor do que os valores determinados no estudo de Barker et al., aproximadamente 30% menor para algumas regiões. O dia 26 de julho de 2016 é o último dia do evento de irrigação que se iniciou no dia 24/07, e a análise das informações de sensoriamento remoto ocorre nesse dia e possivelmente se traduz em uma área mais úmida. Considerando que a área plantada ainda estava sendo irrigada, ou seja, o evento de início de irrigação é no mesmo dia de análise dos dados do sensoriamento remoto, pode-se considerar como os resultados dentro de um valor esperado.

Entretanto, a confirmação dessa hipótese seria possível se o sistema possuísse uma variável de entrada no local que apontasse o nível de água no solo. O sistema desenvolvido consegue fazer apontamentos cuja variação espacial se faz presente e quando outros métodos não conseguem. O fato de se fazer uma análise em toda área é uma vantagem que *Fuzzy-VRI* apresenta.

5.2.5 Resultados para imagens do dia 11 de agosto de 2016

A análise desta data ocorre no meio de um evento de irrigação, iniciado em 10 de agosto e com final da aplicação sendo no dia 12 de agosto, o mesmo tipo de programação

observado também no dia 24 de junho. Os resultados observados para essa data mostram que a região do III quadrante possuem as maiores variações espaciais (Figura 96).

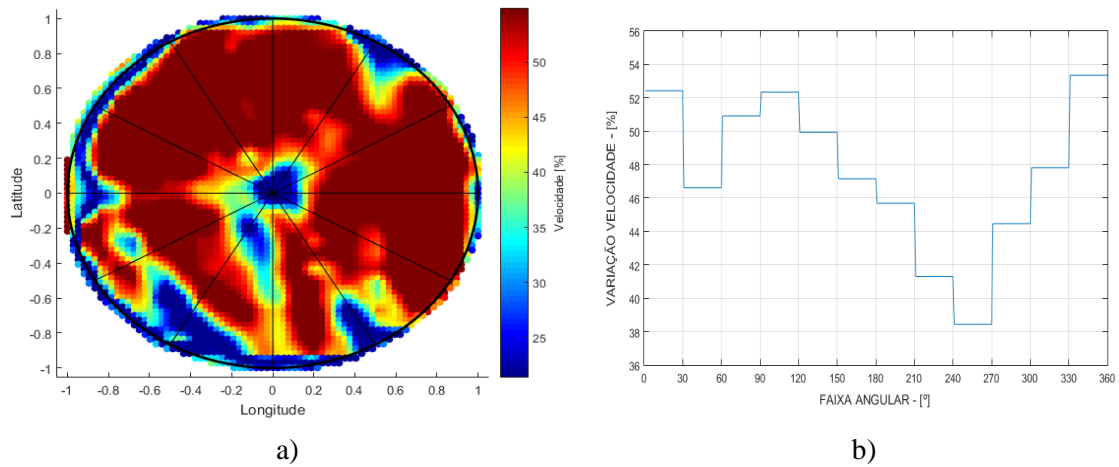


Figura 95- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

O *setpoint* inferido pelo sistema terá as mesmas características encontradas em outras datas: valor mínimo de 38% e a máxima em 52%. As regiões da faixa angular de 180° a 300° são as zonas com maior indicativo para o aumento na aplicação da irrigação. Não é reportada na pesquisa do estudo em Brule a existência de problemas relacionados a outras variáveis, como, por exemplo, solo ou pragas. Assim, para o estudo da Tese foi seguida a hipótese de haver problemas apenas com a necessidade hídrica nestas regiões indicadas pelo sistema *fuzzy*.

Quando se observa a Figura 97, fica evidente que as regiões da zona 3 são as mais problemáticas, seguidas pelas regiões da zona 1. Entretanto, cabe ressaltar que a zona 1 é uma região de pouca ou nenhuma planta, uma vez que essa zona fica próxima ao centro do pivô.

Há uma maior variação na abertura das válvulas das faixas angulares de 150° a 300°, e ao se empregar a análise por setor ou zona, possibilita-se uma irrigação em que essas regiões recebam uma quantidade de água diferente do restante da área.

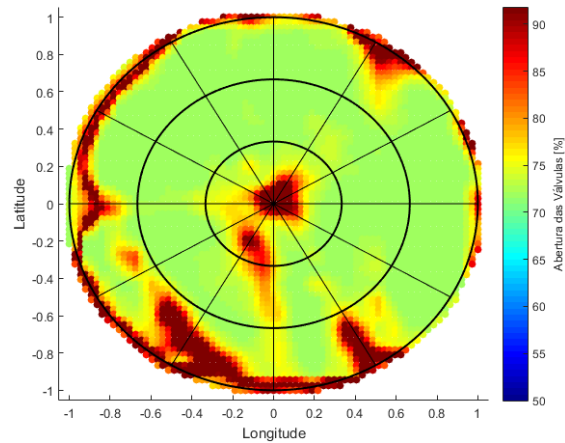


Figura 96- Abertura proporcional das válvulas solenoides

A baixa distinção entre as áreas pode estar atribuída ao pouco número de entradas que o sistema *Fuzzy*-VRI possui. A limitação de variáveis de entrada é uma desvantagem desse sistema.

As faixas angulares em destaques são as regiões que apresentaram variação no volume com o qual se deveria irrigar; locais onde o sistema *Fuzzy*-VRI indicou mudança na abertura das válvulas para uma maior irrigação (Figura 98), ou seja, uma estimativa de que essas zonas precisariam de uma atenção para o nível desejado de volume d'água.

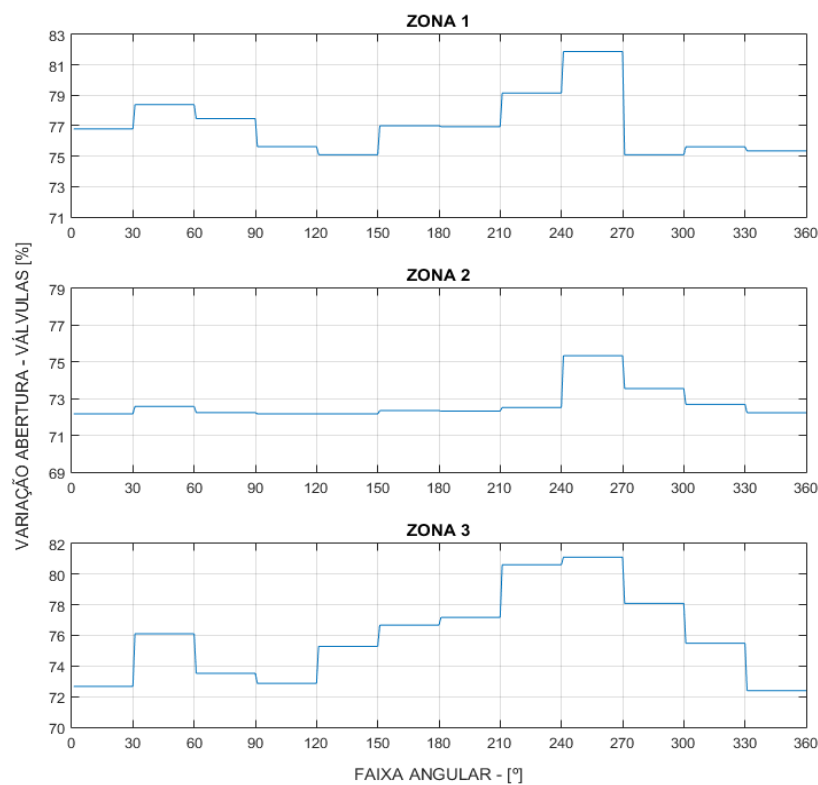


Figura 97- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Mesmo com a desvantagem de não possuir algumas variáveis mais significativas para análise do estresse hídrico em plantação, o sistema *fuzzy* desenvolvido foi capaz de inferir valores próximos (Figura 99) aos praticados pela sonda de nêutrons. Outra característica encontrada pelo sistema *fuzzy* foi a estimativa de irrigação aproximadamente 20% menor do que os valores estimados no estudo de Barker.

Esse resultado é devido à data de análise que coincidiu com a data do evento de irrigação. Assim, haveria regiões que ainda não foram irrigadas e regiões cuja irrigação já haveria ocorrido. O que se esperava era um baixo valor de volume a ser irrigado para essas regiões, e possivelmente a variável de entrada usada para indicar umidade não foi eficaz nesse caso.

Logo, pode-se afirmar que, se essas análises ocorrem quando a plantação está com um maior desenvolvimento, as informações obtidas por meio da medida de umidade próxima ao solo, perdem significado.

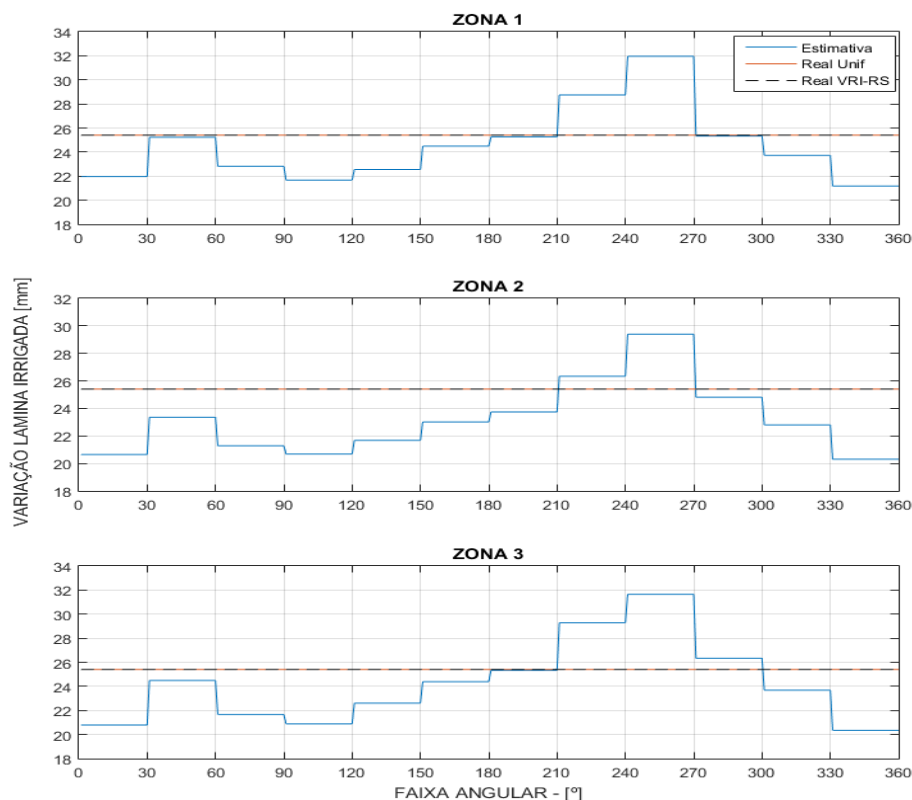


Figura 98- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

5.2.6 Resultados para imagens do dia 19 de agosto de 2016

Oito dias após a análise anterior, os resultados apresentam um leve aumento na variação da velocidade, especificamente uma maior velocidade determinada para a faixa angular de 0° a 180° , mas com as mesmas características do resultado da data anterior – um semicírculo com velocidade maior do que a velocidade encontrada para o semicírculo inferior (Figura 100).

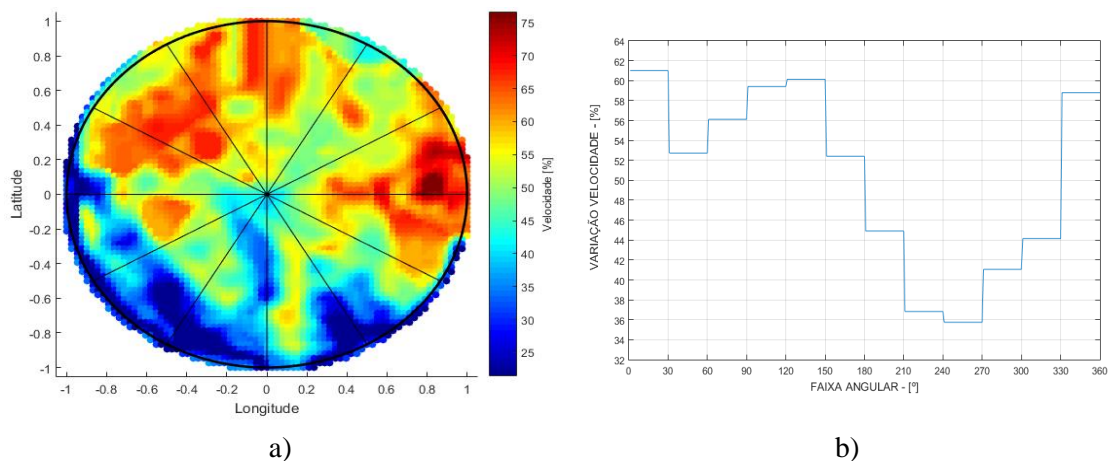


Figura 99- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Quando se verifica o resultado encontrado para o controle da abertura das válvulas, percebe-se que o resultado não é nada parecido com a data anterior: surge uma mancha que muda o comportamento do sistema *Fuzzy-VRI*, basicamente separando a interpretação em duas regiões, uma no semicírculo superior, com uma indicação menor no volume irrigado e a outra no semicírculo inferior, com uma indicação elevada para a aplicação da irrigação (Figura 101).

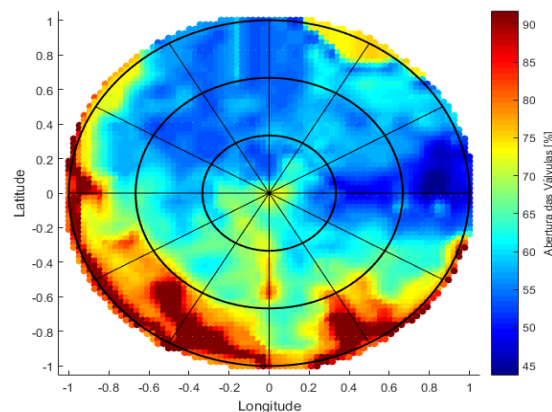


Figura 100- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Na análise desta data, o sistema *fuzzy* apontou uma grande mancha entre a faixa angular de 0° - 180°, e é possível verificar a resposta inferida para os dois semicírculos (Figura 102): para a parte superior, uma redução no valor percentual de abertura, e para a parte inferior, um aumento no valor percentual de abertura. Desse modo, a indicação que o sistema *fuzzy* está apresentando é de que essa região que vai de 0° a 180° deverá ter um volume irrigado bem menor que a zona que fica no semicírculo inferior.

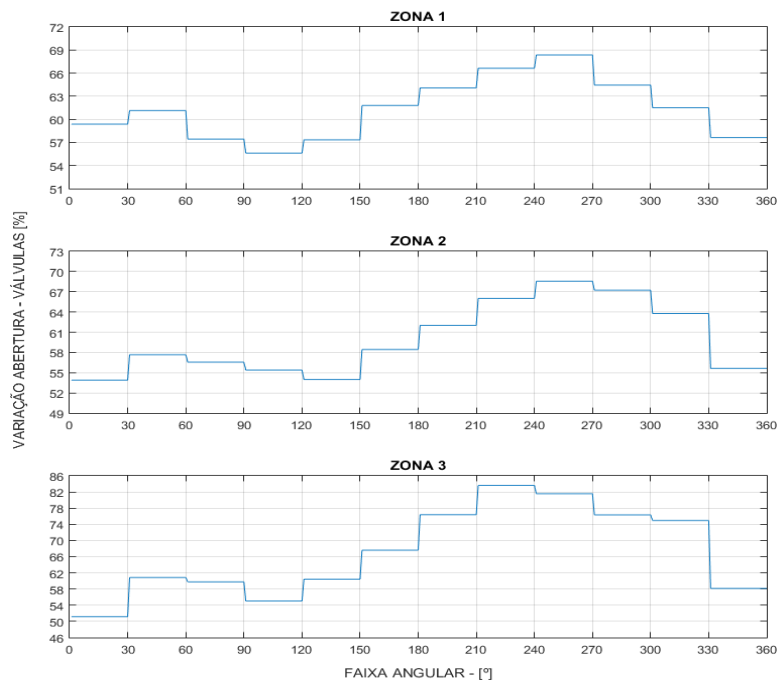


Figura 101- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

De acordo com o estudo de campo, não há qualquer indicação de problemas com a plantação que justificasse essa mancha. Finalmente, ao combinar esse controle de abertura de válvula e o de velocidade (Figura 103), pode-se ver que o volume estimado, indiretamente, em lâmina de irrigação é menor do que os valores estimados pela sonda de nêutrons e o modelo desenvolvido por Barker et al. A diferença de estimacão é mais significativa na região em que a mancha foi detectada.

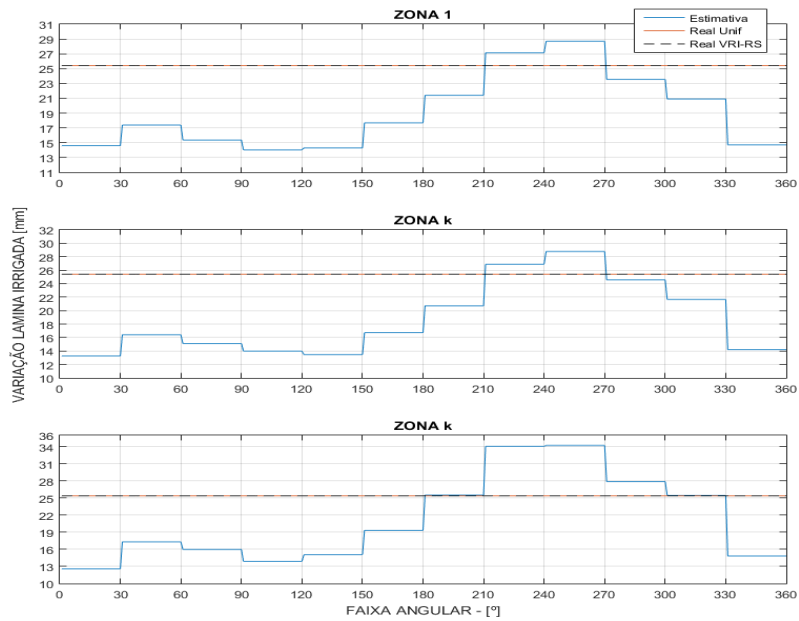


Figura 102- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Ao se verificar os dados das imagens de satélites e as informações fornecidas pela ferramenta i-ekbase de sensoriamento remoto, mais especificamente os dados da temperatura de dossel das datas de 11 de agosto e 19 de agosto (Figuras 104 e 105 respectivamente), foi possível detectar uma mancha de cor amarelada que representa uma menor temperatura em relação às outras regiões. Nas zonas em que não houve cobertura das nuvens, o sistema *Fuzzy-VRI* obteve uma estimacão dos valores de controle de velocidade e uma abertura de válvula dentro de uma faixa esperada.



Figura 103- Imagem de satélite da temperatura de dossel na data de 19/agosto
Fonte: Web ferramenta de sensoriamento remoto da empresa i-ekbase.

Na faixa angular de 0° a 180° existe um bolsão de baixa temperatura. Pelas regras estabelecidas na construção do sistema *fuzzy*, se houver uma menor temperatura, então uma maior velocidade de giro dever ser estabelecida. Assim, a saída do sistema (Figura 104) teve de fato a resposta de acordo com a base de regras estabelecida. O mesmo não aconteceu na data de 11 de agosto, como visto na Figura 103. Esse bolsão com baixa temperatura, ou cobertura parcial de nuvens, não foi detectado no sensoriamento remoto do sistema i-ekbase.

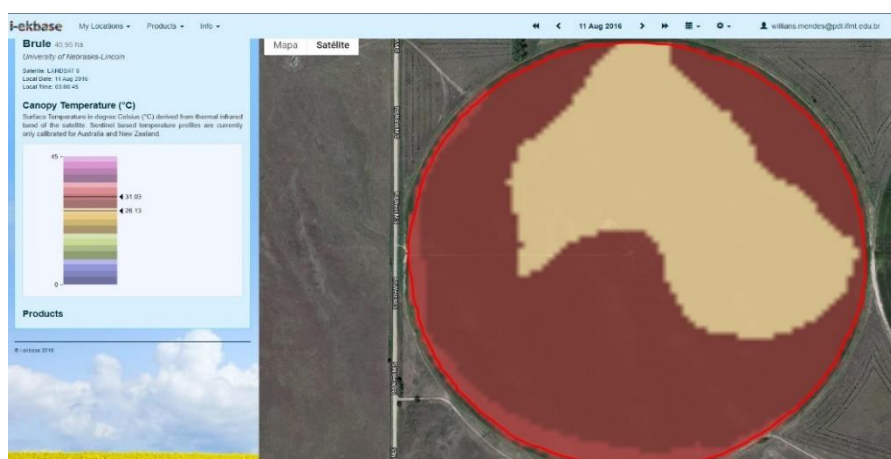


Figura 104- Imagem de satélite da temperatura de dossel na data de 11/agosto
Fonte: Web ferramenta de sensoriamento remoto da empresa i-ekbase.

A formação de nuvens pode alterar a interpretação dos valores estimados pelas metodologias de sensoriamento remoto via satélite, uma desvantagem ao se usar apenas imagens de satélites para sistema de irrigação. Dessa forma, é necessário que os sistemas de irrigação possuam variáveis de entrada coletadas localmente para garantir resultados condizentes com a realidade do solo.

5.2.7 Resultados para imagens do dia 12 de setembro de 2016

Devido às limitações quanto à quantidade de datas que puderam ser analisadas, existe uma diferença de 24 dias entre a análise desta data com a anterior no dia 19 de agosto de 2016. O dia 12 de setembro é um caso especial dentro da análise geral do trabalho, já que a partir do resultado visto para o dia, foi possível concluir que o sistema

fuzzy necessita de uma variável de entrada local para balancear as outras variáveis de entrada.

A Figura 106 apresenta o resultado do sistema *Fuzzy-VRI* para controle da velocidade, e vê-se que a área apresenta as mesmas regiões de atenção com inferência de redução da velocidade e que as mesmas zonas foram identificadas nas análises das outras datas. Na Figura 106b aparece uma grande redução de velocidade sobre a fatia angular de 240° a 270°, uma redução na velocidade para 28% é um grande indicativo de que a zona terá um grande volume de água a ser aplicado.

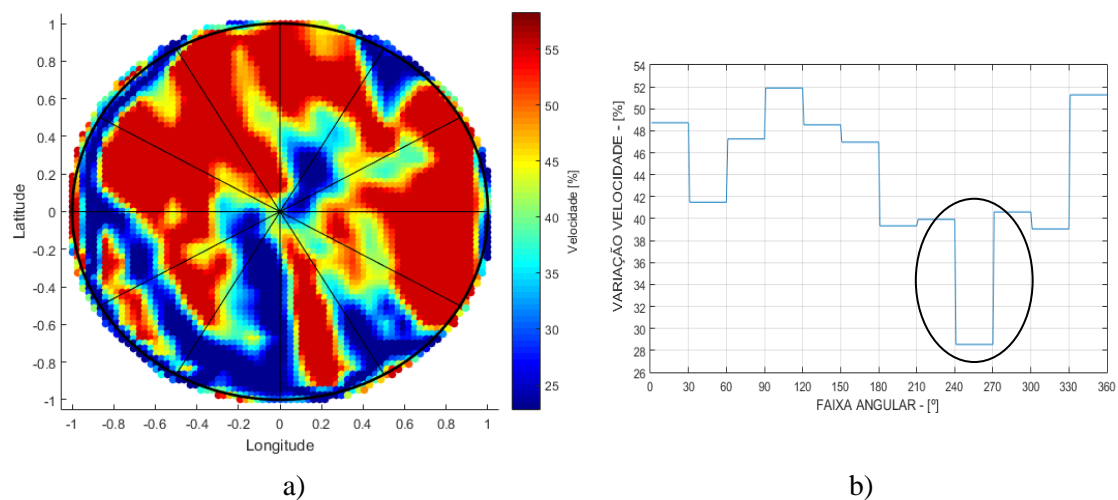


Figura 105- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

O sistema *Fuzzy-VRI* possui duas saídas que interferem mutuamente no volume irrigado e, dessa forma, faz-se necessário avaliar também a saída do *setpoint* para a abertura das válvulas (Figura 107). A mesma região aparece no resultado encontrado pelo sistema *fuzzy*, confirmando que a zona é realmente deficitária.

Pode-se verificar que toda a fatia angular de 240° a 270° possui uma elevação na proporção de abertura das válvulas (Figura 108), o que confirma a tendência de que um maior volume de água deverá ser irrigado.

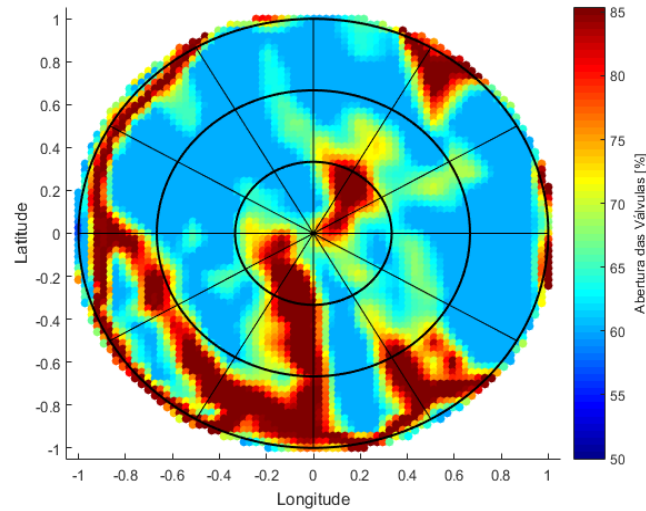


Figura 106- Abertura proporcional das válvulas solenoides

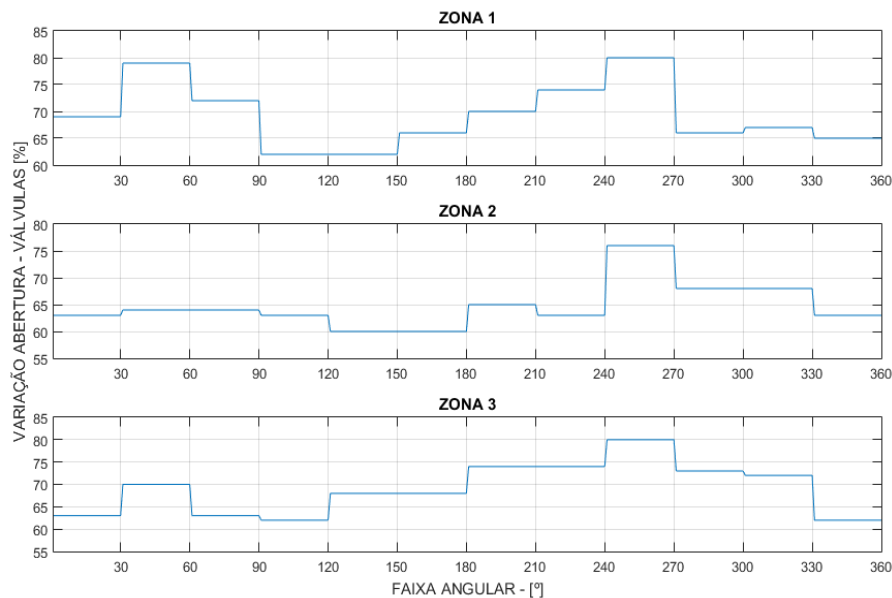


Figura 107- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

O destaque para a análise do resultado (Figura 109) é o quanto os valores estimados pelo sistema desenvolvido se aproximam das estimativas realizadas pelo modelo VRI-RS, confirmando que essa sintonia e talvez essas variáveis de entrada estejam desbalanceadas, assim fazendo com que o sistema *fuzzy* projetado possua a mesma falta de sensibilidade que o modelo proposto por Barker et al. (2018).

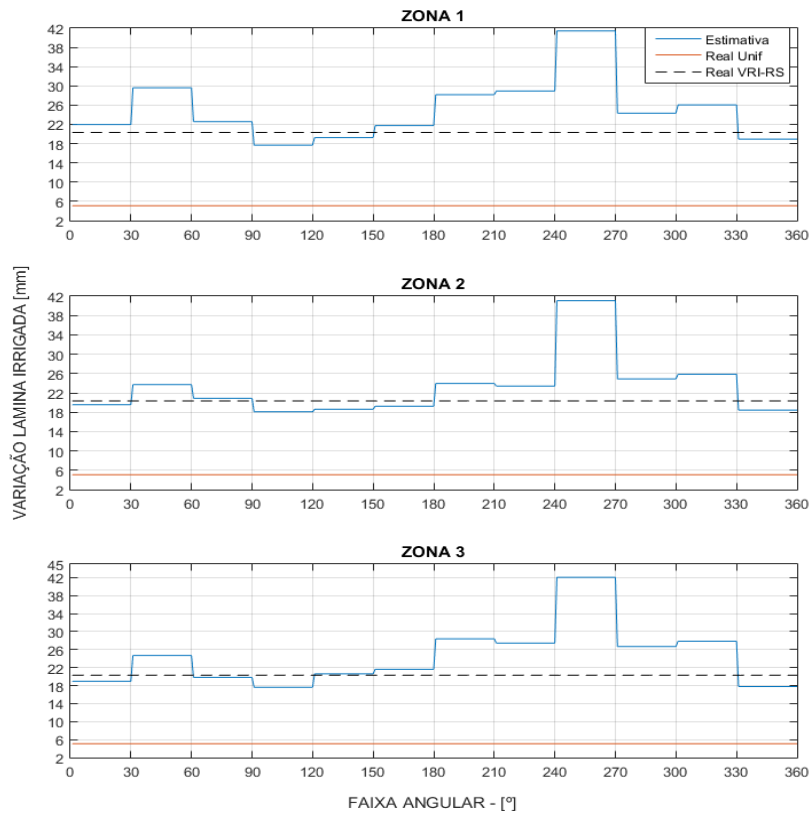


Figura 108- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Dessa forma, para confirmar a hipótese de que o sistema Fuzzy-VRI necessita de variáveis de entrada locais que possam balancear as variáveis de entrada do sensoriamento remoto, o sistema *fuzzy* foi ajustado apenas para esta data. Cabe lembrar que o mesmo sistema *fuzzy* sintonizado manualmente é usado para todas as datas de uma forma geral, sem ajustes posteriores. A hipótese da Tese é que o mesmo sistema seja capaz de identificar essas modificações no comportamento ambiental e propor o controle necessário para o pivô central.

Devido a esse objetivo, o uso da lógica *fuzzy* foi definida, fazendo com que o novo sistema de irrigação de precisão tivesse a capacidade de interpretação desses dados ambientais ambíguos, vagos ou imprecisos. Assim, não se aplica realizar um ajuste manual para balancear as entradas de todas as datas criar um sistema *fuzzy* para cada dia de análise. A data do dia 12 de setembro é uma exceção. A Tabela 11 apresenta os parâmetros do sistema *fuzzy* usados para todas as datas e os novos parâmetros ajustados manualmente.

O novo sistema modificado não alterou a quantidade de funções de pertinências e nem as funções de pertinência de saída, logo, não introduziu novas regras. As mudanças

ficam apenas na sintonia e na mudança do tipo de função de pertinência. Já o ajuste fino teve como base as observações e análises dos dados fornecidos pelo sensoriamento remoto. Foram levados em consideração os pontos máximo, mínimo e médio de cada variável apenas para esta data. Assim, pode realizar um ajuste menos significativo na variável de entrada que mede o desenvolvimento foliar o SAVI. Entretanto, as variáveis de entrada de temperatura de dossel, umidade próxima ao solo e nitrogênio expelido sofrem os ajustes mais importantes.

Tabela 11 - Modificação ou ajuste dos parâmetros das funções de pertinência

Variáveis de entrada	<i>Fuzzy</i> Original				<i>Fuzzy</i> modificado				
	Função triangular			Função triangular e trapezoidal					
	Variáveis linguísticas	vértices			Variáveis linguísticas	vértices			
		a	b	c		a	b	c	d*
Temperatura	baixa	∞	14	19	baixa	∞	16	20	
	normal	14	20	25	normal	16	20	28	30
	alta	20	25	∞	alta	28	30	∞	
SAVI	muito baixo	∞	15	30	muito baixo	∞	15	30	
	baixo	20	30	40	baixo	20	32	47	
	médio	30	45	60	médio	36	52	68	
	alto	50	60	∞	alto	60	70	∞	
Umidade próxima ao solo	muito baixo	∞	4	9	muito baixo	∞	5	8	
	baixo	4	11	17	baixo	5	11	15	
	médio	13	20	26	médio	12	17	21	
	alto	21	28	∞	alto	18	22	∞	
Nitrogênio expelido	muito baixo	∞	0,8	1,6	muito baixo	∞	0,6	1,3	
	baixo	0,8	1,6	2,6	baixo	0,7	1,5	2,1	
	médio	2	3	3,7	médio	1,6	2,3	3	
	alto	3	3,7	∞	alto	2,5	3	∞	

*vértice referente à mudança do tipo de função de pertinência, antes triangular e depois alterada para uma função trapezoidal

Para a variável de entrada da temperatura de dossel, as funções de pertinências e seus parâmetros mudaram completamente: antes era uma função triangular, e agora passa a ser uma função trapezoidal. Assim, a inferência para temperatura de dossel se tornará menos sensível a pequenas variações. A segunda mudança para essa variável foi que o que antes era “Alta” passa a ser considerada pelo sistema *fuzzy* como temperatura normal, mudando a interpretação das variações de entrada e fazendo o sistema ativar as regras para esse novo patamar de temperatura.

Outra mudança foi da faixa dos valores que representam alta umidade próxima ao solo, o que fez com que o sistema ficasse mais sensível às pequenas elevações de umidade quando detectada. O mesmo tipo de recalibração foi realizado para a variável de nitrogênio expelido, fazendo com que o sistema *fuzzy* ficasse mais sensível à detecção de valores que antes eram considerados médios. Por fim, o sistema *fuzzy* recalibrado foi testado nos dados de entrada da data do dia 12 de setembro de 2016, e o resultado foi que os valores das estimativas do *Fuzzy-VRI* foram próximos à medida encontrada pela sonda. Para essa análise, algumas características ficam evidentes: percebe-se uma diminuição de regiões com variações e a existência de problemas com as áreas próxima à borda ou zona 3 (Figura 110a).

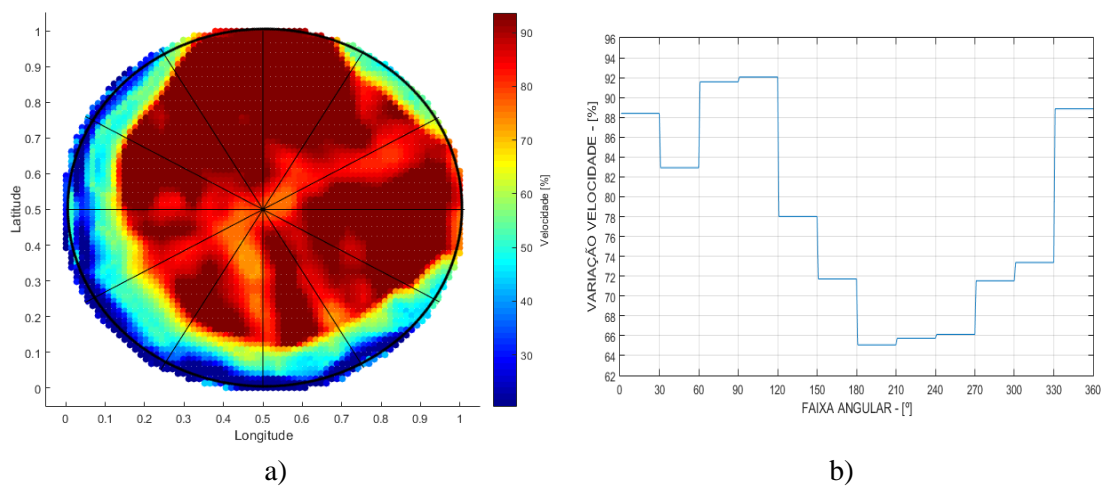


Figura 109- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Outro detalhe que chama a atenção é que a velocidade indicada é elevada, algo não detectado até o momento. Os valores máximos encontrados entre 64% e 92% são um indicativo de baixo volume a ser aplicado. A diminuição das regiões detectadas também pode ser vista para a saída do controle das válvulas (Figura 111), o que confirma que os ajustes tornaram o sistema menos sensível às variações de temperatura e mais sensível em relação à variável de umidade próxima ao solo.

Apesar de ser possível verificar na zona 3 uma pequena elevação na proporção de abertura das válvulas nessa região, os valores percentuais de abertura para válvulas ficaram no patamar de 20%, confirmando a tendência de pouco volume de água que deverá ser irrigado (Figura 112).

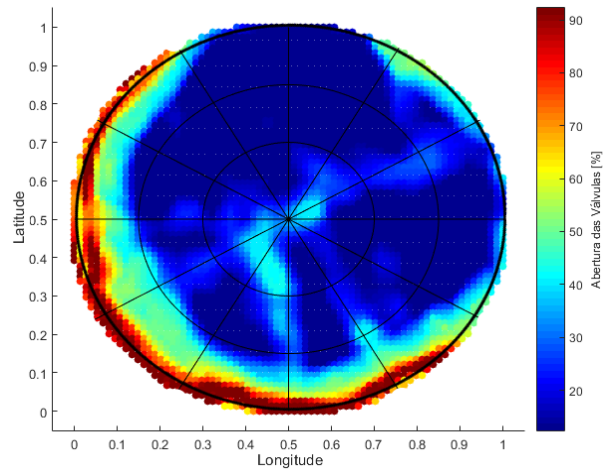


Figura 110- Abertura proporcional das válvulas solenoides

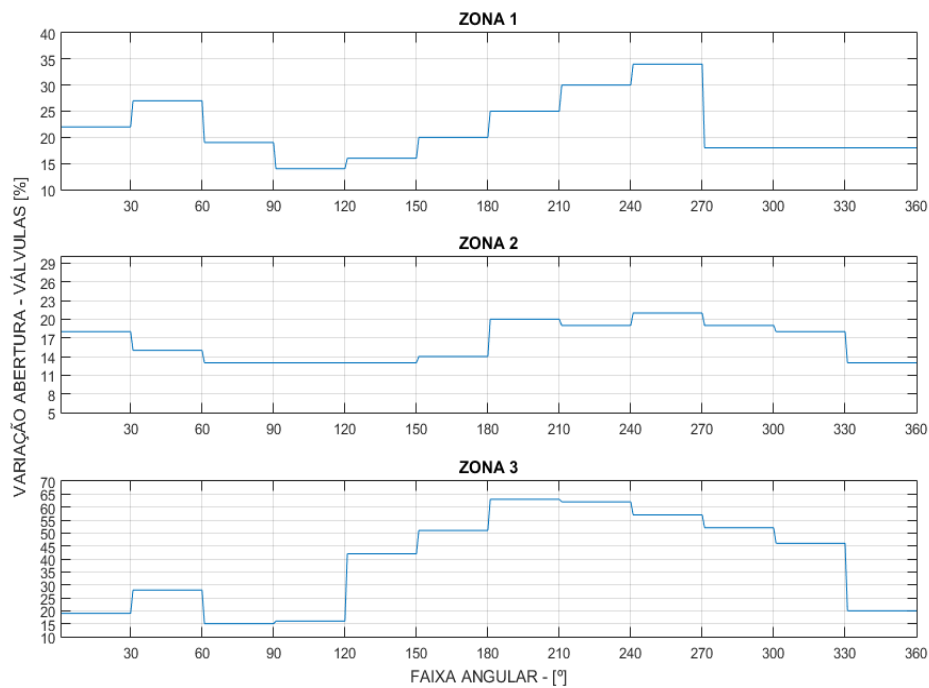


Figura 111- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Quando analisados os dois sinais de saídas, velocidade e abertura das válvulas (Figura 113), pode-se confirmar que as estimativas para o volume irrigado que o sistema *Fuzzy-VRI* encontrou são realmente baixas.

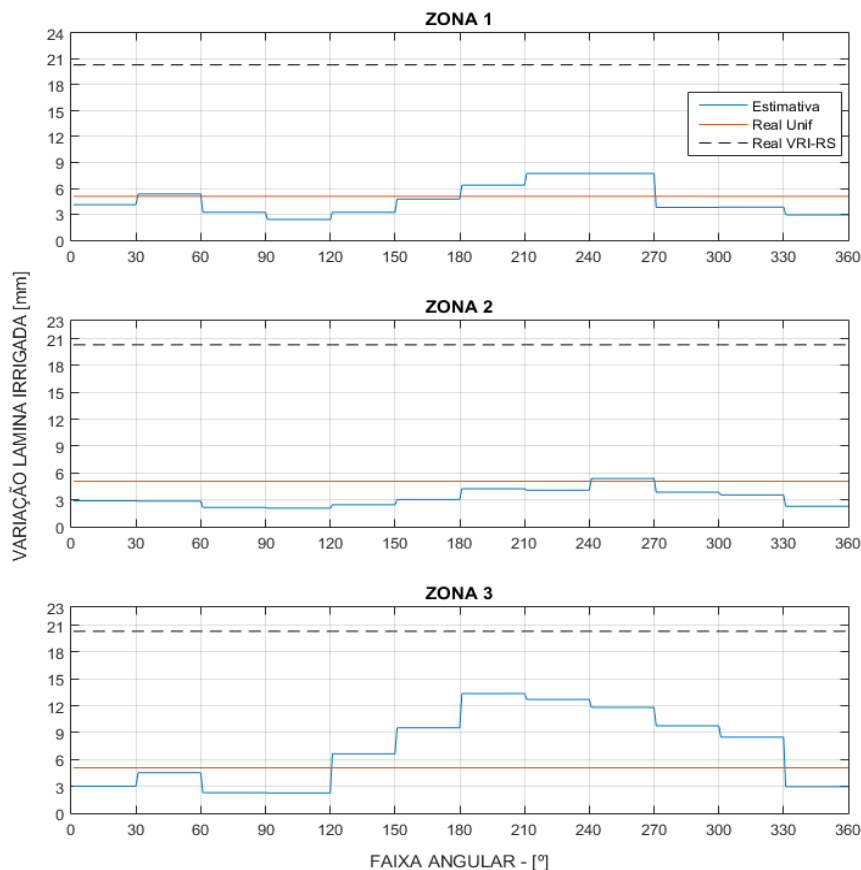


Figura 112- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

Outro destaque é o quanto os valores estimados pelo sistema se aproximam das estimativas realizadas pela sonda de nêutrons, confirmando a sensibilidade que os sistemas *fuzzy* podem acrescentar aos modelos de determinação de volume de irrigação quando calibrados corretamente. É evidente que a escolha de entradas que possam representar fielmente os acontecimentos locais é de suma importância. No caso do sistema desenvolvido o ajuste das funções de pertinência referentes à temperatura de dossel, à umidade próxima ao solo e ao nitrogênio expelido foi decisivo para inferir que não haveria necessidade de continuar irrigando com o mesmo volume.

A explicação dada pelo professor Dr. Derek Hereen foi a precipitação que ocorreu alguns dias antes somada as irrigações passadas. Nos meses de maio a outubro, a precipitação de chuvas na região de Brule foi de 274 mm, e no mês de setembro houve 37,08 mm (1,46 polegadas) de chuvas, mais precisamente nos dias 6 e 7 de setembro choveu mais de 31 mm, dados retirados do site US Climate data⁵. Acrescenta-se ainda o

⁵ <https://www.usclimatedata.com/climate/north-platte/nebraska/united-states/usne0353/2016/9>.

evento de irrigação que ocorreu entre os dias 31 de agosto e 02 de setembro e que aumentou o acúmulo de água no solo. Assim, essa hipótese é a possível explicação para os resultados encontrados para essa data.

5.2.8 Resultados para imagens do dia 20 de setembro de 2016

Para a análise deste dia, o sistema *fuzzy* usado é o mesmo sistema usado em todas as outras datas, sem ajuste individual. Para o resultado encontrado (Figura 114), destacam-se faixas angulares com diferentes níveis de velocidade estimada, e o sistema *fuzzy* gerou variações de 46% a 76%. Na da faixa angular 90° para 120°, o sistema encontrou uma grande variação angular, reduzindo a velocidade estimada de 73% para 53%. Vale ressaltar que nos dias anteriores não houve precipitação, e imagens de satélites mostram que não havia nuvens.

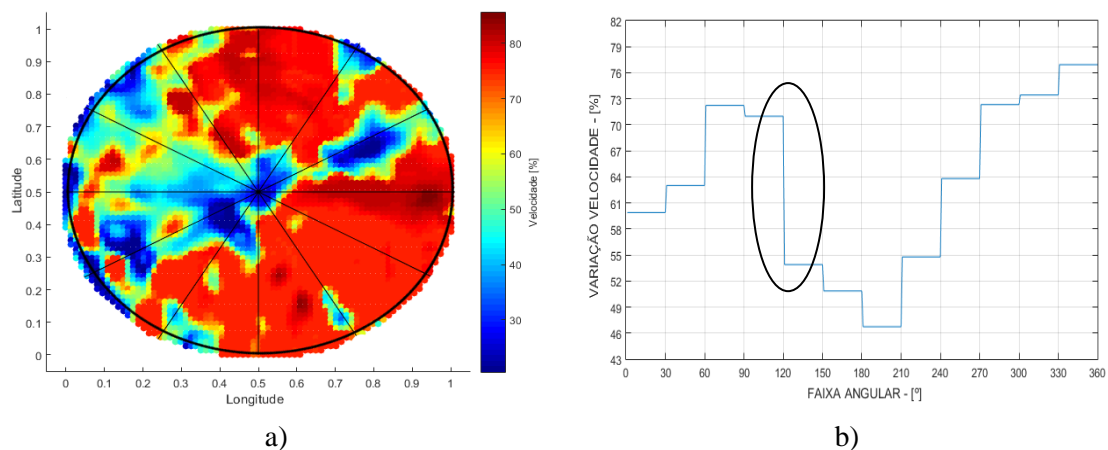


Figura 113- a) Velocidade de giro do pivô central; b) Velocidade média de giro por fatia

Essa variação acentuada traz uma questão já levantada no estudo em Ipiranga do Norte, MT, e que deverá ser estudada em pesquisas futuras sobre o atual desenvolvimento dos pivôs: será que hoje é possível que o equipamento de irrigação do tipo pivô central conseguisse atingir as velocidades estimadas em divisões angulares muito pequenas?

Voltando para o resultado apresentado para data do dia 20 de setembro (Figura 115), a abertura das válvulas segue a mesma característica da velocidade, porém de forma inversa, com uma grande quantidade de zonas com variações na proporção ou percentual de abertura das válvulas.

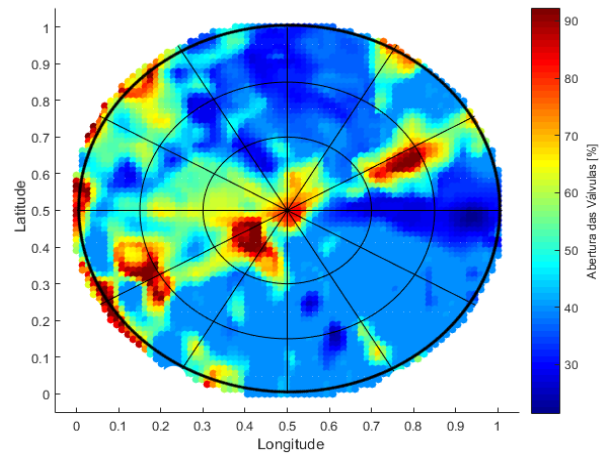


Figura 114- Abertura proporcional das válvulas solenoides

Quando se revisita a teoria de sistemas com a qual se propõe realizar irrigação por taxa variável, os resultados obtidos para velocidade e abertura das válvulas encontradas pelo *Fuzzy-VRI* são os resultados práticos esperados nesse tipo de sistema. Observe que na Figura 116 existem muitas zonas com diferentes níveis de abertura.

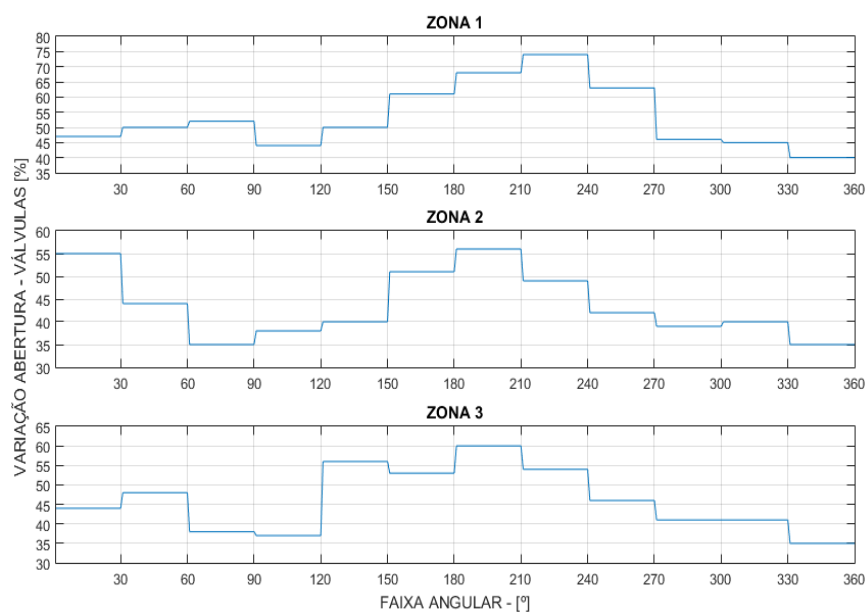


Figura 115- Abertura média das válvulas solenoides por zona de irrigação

Assim, se as duas saídas fossem enviadas a um pivô central, o resultado da lâmina de irrigação produzida seria o que se espera de sistemas que empregam a taxa variável espacial e temporalmente. Veja que a Figura 117 apresenta as diferentes lâminas estimadas quando cada modelo é utilizado para o gerenciamento da irrigação.

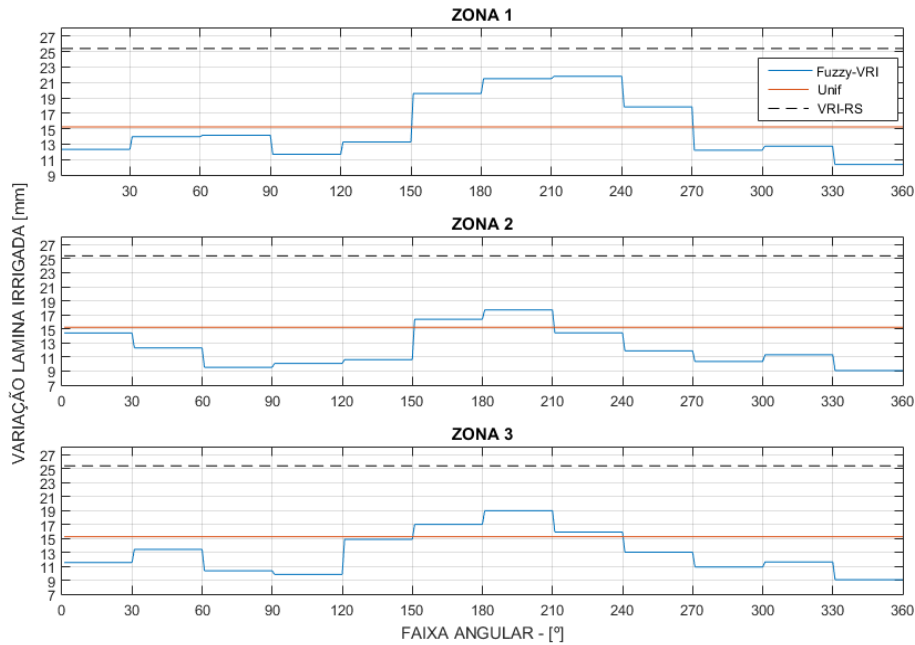


Figura 116- Lâmina de irrigação estimada por cada modelo

A indicação da lâmina de irrigação encontrada pelo sistema *Fuzzy-VRI* aponta claramente a região do III quadrante como aquela que possui o maior volume a ser aplicado. Assim, o sistema criado nesta Tese obteve comportamento ou sensibilidade semelhante à medição local da sonda de nêutrons, um resultado muito positivo, uma vez que a sonda possui medições de umidade do solo mais confiáveis.

O sistema obteve sucesso em inferir que toda a área está com uma distribuição de umidade maior e, dessa forma, indica uma aplicação de irrigação menor do que a lâmina estimada pelo método VRI-RS proposto por Barker et al. (2018).

5.2.9 Discussão sobre estudo de caso em Brule, NE, EUA

Os resultados para a área de Brule apontam aspectos interessantes e favoráveis, com por exemplo os resultados das estimativas encontradas pelo sistema *Fuzzy-VRI* foram semelhantes à medida estimada pela sonda de nêutrons, e dessa forma possibilita a continuação dos estudos dessa metodologia e fica claro que o sistema *Fuzzy-VRI* possui características claras de sistema de irrigação por taxa variável que leva em consideração a variação espacial e temporal do local.

Quando bem sintonizada, a lógica *fuzzy* pode alcançar bons resultados e assim, proporcionando a possibilidade de redução no consumo de água e estabelecendo um uso mais eficiente da água.

Algumas características nesse estudo ficaram evidentes como, por exemplo, a discussão sobre a necessidade de que mais uma variável de entrada fosse coletada no local e, dessa forma, daria ao sistema *fuzzy* a inferência sobre o comportamento ambiental geral do local. Seria uma variável para balancear as outras variáveis de entradas que possuem aquisição via satélite e que por vezes podem estar descoladas do que realmente acontece no local.

Outro ponto bastante interessante encontrado está atrelado ao uso de imagens de satélites. Uma vez que se tenha uma irrigação adequada e um solo fértil, a planta irá crescer igualmente e toda a folhagem estará no mesmo nível. Assim, pelo fato de a metodologia desenvolvida ser unicamente baseada no desenvolvimento foliar, o sistema *Fuzzy-VRI* tenderá a uma resposta próxima a uma distribuição uniforme quando todas as folhas possuírem as mesmas características, e não detectará a variação espacial da área plantada.

Dessa forma, pesquisas futuras devem incluir maior frequência de imagens sem nuvens medidas de conteúdo de água no solo ao modelo e limitação quanto ao tempo excessivo para completar uma volta, ou seja, limitar a velocidade mínima e assim estabelecer um parâmetro de restrição com base no custo da energia elétrica. Ademais, experimentos de longo prazo, incluindo anos com poucas chuvas, poderá proporcionar uma melhor perspectiva de quanto o VRI pode aumentar a eficiência do uso da água de irrigação.

Capítulo 6

6. Conclusões, contribuições e perspectivas

6.1 Avaliação geral

Um aspecto importante a ser destacado no sistema é que foi capaz de delinear com eficácia as zonas de gerenciamento de irrigação com o mínimo de dados disponíveis. A determinação eficaz das zonas de gerenciamento foi atingida quando o sistema conseguiu identificar a variabilidade espacial e temporal de uma área de plantação.

Pode-se afirmar que a metodologia empregada obteve sucesso. Os resultados encontrados obedeceram à definição de irrigação por taxa variável, pois o *Fuzzy-VRI* conseguiu fornecer mapas de controle para a velocidade de giro e para o ciclo de serviço das válvulas solenoides de um sistema de irrigação por pivô central.

A metodologia empregada neste estudo demonstrou que o número eficaz de áreas de manejo e de irrigação pode ser delineado com base em variáveis limitadas, como temperatura do dossel, SAVI, índice de nitrogênio e umidade próxima ao solo. Os dados introduzidos no sistema foram derivados de imagens de sensoriamento remoto e o resultado é a construção de um mapa de controle para pivô central.

A determinação das zonas de gerenciamento de irrigação atingiu seu ponto ótimo quando houver um grande volume de dados de sensoriamento da área de plantio (espaciais e temporais). No entanto, para se obter grandes volumes de dados de sensoriamento oriundos das plantações com um custo baixo é o maior desafio para esse tipo de tecnologia.

Um dos pontos positivos que esta pesquisa destacou foi a redução do consumo de água. Essa descoberta por si só já seria muito significativa para ser continuada. Porém, não foi possível julgar se esse resultado poderia aumentar a produtividade da lavoura, uma vez que não foram realizados estudos aplicados diretamente no campo. Ainda assim, os resultados apontaram para uma maior eficiência na aplicação da lâmina de água, uma vez que foi possível perceber as diferentes zonas de manejo que poderiam ser empregadas em um sistema de irrigação por pivô central.

Os resultados mostrados são favoráveis à continuidade dos estudos, com o desenvolvimento de mapas de controle para a irrigação mais próximos da realidade do campo. O sistema precisa ser melhorado, incorporando outras variáveis de entrada que possam possibilitar ao sistema *fuzzy* fazer uma boa interpretação do que realmente está acontecendo na área plantada para determinar com exatidão a taxa de aplicação de água, mantendo a mesma taxa de produção.

A metodologia desenvolvida possui potencial para ser usada em outros sistemas de irrigação, uma vez que o uso de tecnologias de sensoriamento remoto permite um maior desenvolvimento da estratégia de VRI em termos de relação custo-benefício da delimitação de zonas de gerenciamento.

Os pontos a serem melhorados no trabalho envolvem o fato de ser baseado unicamente em sensoriamento remoto, uma desvantagem em relação a modelos com aquisição de dados localmente. Um sistema baseado unicamente em imagens de satélites necessitará de um número maior de variáveis para uma melhor determinação das zonas de irrigação. O sistema *fuzzy* para controle da aplicação de irrigação por taxa variável usando apenas imagens de satélites e com poucas variáveis de entrada não conseguirá inferir de maneira apropriada todo o espectro de variações locais, como pode ser verificado no estudo de caso em Brule.

Uma vez que se tenha uma irrigação adequada e um solo fértil, a planta irá crescer igualmente e toda a folhagem estará no mesmo nível. Assim, pelo fato de a metodologia desenvolvida ser unicamente baseada no desenvolvimento foliar tenderá a uma resposta próxima a uma distribuição uniforme quando todas as folhas possuírem as mesmas características.

As divisões das zonas de gerenciamento da irrigação criadas pelo sistema constituem mais um ponto a ser melhorado, uma vez que a operacionalização acontece de forma visual com auxílio de um operador ou pessoa. A evolução do sistema desenvolvido seria o uso de uma visão computacional baseada em clusters para determinar o número ideal de zonas usando imagens detectadas remotamente e dados de campo de modo totalmente automático, sem intervenção humana.

6.2 Avaliação específica

1º Objetivo específico - **Estabelecer uma relação entre os elementos que compõem um sistema de irrigação e um sistema fuzzy:** elucidar os conceitos elementares relacionados ao entendimento da lógica *fuzzy* e de como seria possível agregar os conhecimentos de irrigação de precisão com a formulação de um sistema de inferência *fuzzy*. Nesse contexto, observou-se que os sistemas *fuzzy* podem ser amplamente usados na área agrícola para determinar as variáveis imprecisas que compõem essa área do conhecimento.

Os benefícios potenciais do sistema de apoio à decisão são muitos, tais como manipular muitos conjuntos de dados ao mesmo tempo. Além disso, fazer recomendações ou determinações dos valores de referência de velocidade de giro e controle de abertura das válvulas de cada aspersor. Já os benefícios econômicos potenciais da tecnologia de irrigação por taxa variável não foram investigados. Do ponto de vista de um agricultor, o benefício econômico é o incentivo mais importante para a adoção dessa nova tecnologia. A lacuna de conhecimento sobre os benefícios econômicos desse tipo de tecnologia é um grande prejuízo para a sua adoção.

2º Objetivo específico - **Reunir informações práticas de cada etapa de construção do sistema:** diante da relevância do tema estudado e da inovação da metodologia desenvolvida foi possível estabelecer parcerias de cooperação técnicas e acadêmicas com empresas comerciais e centros de pesquisas renomados tais como os descritos a seguir:

- ✓ Para ter acesso aos dados reais de irrigação da área de plantio comercial para comparação dos resultados, conseguiu-se estabelecer uma cooperação técnica com a empresa Sistema Irriga.
- ✓ Para ter acesso às especificações de projeto e à construção do pivô central, conseguiu-se estabelecer uma cooperação técnica com a empresa brasileira Fockink. Essas informações foram usadas na construção das funções de pertinências de saída, ou defuzzificação.
- ✓ Para ter acesso aos dados reais da pesquisa realizada em Barker et al. (2018) para comparação dos resultados, conseguiu-se estabelecer uma cooperação técnica e acadêmica com a Universidade do Nebraska, Lincoln, em conjunto com Prof. Dr. Derek M. Heeren do Instituto de Agricultura e Recursos Naturais.

✓ De posse dos locais de estudo e das informações de cada área de plantio, foi possível estabelecer uma cooperação técnica e acadêmica com a *i-ekbase*, empresa especializada em sensoriamento remoto, e com o Prof. Dr. Ritaban Dutta, pesquisador da CSIRO Data61 e CEO da empresa.

3º Objetivo específico - **Desenvolvimento do sistema de inferência *fuzzy***: para a criação do mapa de controle para cada área de estudo, foi construído com sucesso o Fuzzy-VRI, um sistema capaz de trabalhar com dados de sensoriamento remoto e o conhecimento do equipamento de irrigação (pivô central), e que conseguiu inferir a velocidade de giro do pivô central, bem como qual será o percentual de abertura das válvulas dentro de uma zona de irrigação. A técnica de inteligência artificial escolhida – Sistema Fuzzy – provou-se adequada para a agregação dos conhecimentos de todos os elementos que compõem um sistema de irrigação de precisão.

4º Objetivo específico - **Comparar o sistema desenvolvido com outros métodos clássicos de irrigação**: foi demonstrado que o sistema Fuzzy-VRI foi capaz de acompanhar a evolução da necessidade hídrica. Também, foi possível perceber locais ou regiões com mais ou menos necessidade hídricas, sem se distanciar da medida real encontrada por um sistema comercial instalado.

O estudo de caso mostrou as comparações entre os níveis de lâmina d'água estimados pelo modelo por taxa variável, modelo convencional Uniforme, e aqueles estimados de maneira indireta pelo modelo Fuzzy-VRI para diferentes datas amostradas ao longo do ciclo da plantação. Os resultados para área de Brule apontaram aspectos interessantes e favoráveis para a continuação dos estudos dessa metodologia para sistema de irrigação de precisão, e fica claro que a metodologia presente nesta Tese possui características claras de sistema de irrigação por taxa variável que leva em consideração a variação espacial e temporal do local.

6.3 Propostas para trabalhos futuros

1. Desenvolver pesquisas no campo de sistemas de controle para irrigação por taxa variável com demonstrações dos benefícios econômicos. Abordagem que seria de grande ajuda na disseminação da tecnologia entre os agricultores. Mais pesquisas sobre os benefícios econômicos do VRI precisam ser feitas para esclarecer todo o potencial dessa tecnologia moderna.

2. Comparar o sistema desenvolvido com outros sistemas de apoio à decisão, ou sistema prescritivos que gerem mapas dinâmicos de prescrição de irrigação. Até o momento, as pesquisas contribuíram para a avaliação de desempenho e os possíveis benefícios de economia de água e energia da tecnologia desses sistemas VRI individualizados.

3. Ampliar o escopo das pesquisas para delinear mapas dinâmicos de prescrição de irrigação com base no feedback imediato das condições do solo e da colheita. Um sistema interativo de suporte à decisão baseado na web pode ser desenvolvido para integrar as tensões/conteúdo contínuo da água do solo em tempo real com dados meteorológicos e outras informações relacionadas para delinear um mapa dinâmico de prescrição de irrigação.

4. Incluir uma maior frequência de imagens sem nuvens, incorporação de medidas de conteúdo de água no solo ao modelo.

5. Estudar os impactos no sistema de irrigação por pivô quando colocado sob a limitação de tempo para completar uma volta, ou seja, limitar a velocidade mínima e assim estabelecer um parâmetro de restrição com base no custo da energia elétrica. A maioria das estações de bombeamento em campos irrigados opera de forma ineficiente devido a demandas variáveis de motores de grandes dimensões. Recentemente, tem havido um interesse crescente em desenvolver a estratégia de VRI para reduzir o consumo de energia elétrica.

6. Estudar as implicações que sistemas inteligentes de irrigação, desse porte, poderiam causar na forma operacional de um pivô central.

Referências bibliográficas

ABBASPOUR, K. C., R. SCHULIN, and M. T. van GENUCHTEN. Estimating soil hydraulic parameters using ant colony optimization, **Adv. Water Resour.**, v.24, p. 827–841. 2001.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: **FAO – Irrigation and Drainage Paper**, n.56, p. 300. 1998.

AL-FARAJ, A.; MEYER, G. E.; HORST, G. L. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making — a *fuzzy* logic method. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.32 p. 69–84. 2001.

AMAZIRH, A.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S.; GAO, Q.; RIVALLAND, V.; MALBETEAU, Y.; KHABBA, S.; JOSÉ, M. Retrieving surface soil moisture at high spatio-temporal resolution from a synergy between Sentinel-1 radar and Landsat thermal data: A study case over bare soil. **Remote Sensing of Environment**, v.211, p. 321–337. 2018.

ANDRADE, M. A., O'SHAUGHNESSY, S. A., and EVETT, S. RARSmartPivot v.1: Sensor based management software for center-pivot irrigation systems. **ASABE Paper**, No. 152188736. St. Joseph, Mich.: ASABE. 2015.

ASNER, G. P. **Biophysical and biochemical sources of variability**. *Remote Sens Environ*, p. 76-180. 1998.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy com Aplicações em Biomatemática**. Campinas, SP: UNICAMP/IMECC, 2006.

BAHAT, M.; INBAR, G.; YANIV, O.; SCHNEIDER, M. A *fuzzy* irrigation controller system. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.13, Issue 2, p. 137-145, 2000.

BALASTREIRE, L. A. **A Estado-da-Arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Ed. Piracicaba, v.1. 2000.

BARKER, J. B.; HEEREN, D. M.; NEALE, C. M. U.; RUDNICK, D. R. Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. **Agricultural Water Management**, v.203, p. 63–74. 2018. (link)

BARTLETT, A. C.; ANDALES, A. A.; ARABI, M.; and BAUDER, T. A. A smartphone app to extend use of a cloud-based irrigation scheduling tool. **Comput. Electron. Agric.**, v.111, p. 127-130. 2015.

BASTIAANSEN, M. M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). **Journal of Hydrology**. 1998.

BAUSCH, W. C.; and NEALE, C. M. U.; Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: a concept. **Trans ASAE**, v. 30(3), p. 703-709. 1987.

BEN-DOR, E.; IRONS, J. R.; and EPEMA, G. F. Soil reflectance. In: **Rencz A N, ed. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing**. New York, Wiley & Sons, p. 111–188. 1999.

BERNARDO, S.; SOARES A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**, 8a edição, Imprensa Universitária, Viçosa, p. 625. 2006.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. **Revista brasileira de meteorologia**. v.23, n. 3, p. 305-317. 2008. ISSN 0102-7786.

BING, Z.; HUIFENG, J.; and XIA, H. Study on Corn Water Saving Irrigation Decision-making Model. **Advance Journal of Food Science and Technology**, v. 9(1), p.9-12, 2015.

BISCARO, G. A. **Sistemas de irrigação por aspersão**. Dourados, MS; Editora da UFGD, p. 134. 2009. ISBN 978-85-61228-35-4

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J.S.; VARVEL, G. E. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. **Agronomy Journal**, v.86, p. 934–938. 1986.

BOULET, G.; CHEHBOUNI, A.; GENTINE, P.; DUCHEMIN, B.; EZZAHAR, J.; HADRIA, R. Monitoring water stress using time series of observed to unstressed surface temperature difference. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.146, p.159–172. 2007.

BOWERS, S. A. and SMITH, S. J. Spectrophotometric determination of soil water content. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.36: p. 978–980. 1972. 1972.

BRASE, T. **Precision Agriculture**. Delmar Publishers Inc, p. 288. 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 852 - Art. 1º Criar a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão – CBAP. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 21 set. 2012. Seção 1, n. 184. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm>. Acessado em: 15 mar. 2018.

BRITO, G. G.; SOFIATTI, V.; BRANDÃO, Z.N.; SILVA, V.B.; SILVA, F.M.; SILVA, D. A. **Non-destructive analysis of photosynthetic pigments in cotton plants. Acta Sci Agron**. V.33, p. 671-678. 2011.

CALVO, I. P.; and ESTRADA, J. C. G. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. **Biosystems engineering**, v.102, p. 202–218. 2009.

CAMP, C. R.; and SADLER, E. J. Center pivot irrigation system for site-specific water and nutrient management. **ASAE Paper** No. 94-1586. ASAE, St. Joseph, MI. 1994.

CAMP, C. R.; SADLER, E. J.; EVANS, D.E.; USREY, L.J.; and OMARY, M. Modified center pivot irrigation system for precision management of water and nutrients. ASAE Paper No. 962077, ASAE Annual Meeting, Phoenix, AZ, p. 14-18, July / 1996.

CASANOVA, J. J.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R., and RUSH, C. M. Development of a wireless computer vision instrument to detect biotic stress in wheat. **Sensors**, v.14(9), p. 17753-17769. 2014.

CHAUHAN, N.; Le VINE, D.; and LANG, R. **Passive and Active Microwave Remote Sensing of Soil-Moisture under a Forest Canopy**. Proc. IEEE: p. 1914-1916. 1999.

CHEN, F. S.; FAHEY, T. J.; YU, M. Y.; GAN, L. Key nitrogen cycling processes in pine plantations along a short urban–rural gradient in Nanchang, China. **Forest Ecology and Management**. v.259, Issue 3, P. 477-486. 2010.

CHRISTOFIDIS, D. **Água na produção de alimentos: o papel da irrigação no alcance do desenvolvimento sustentável**. Brasília: Universidade de Brasília, p. 29. 2005.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; DAUGHTRY, C. S. T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studies by model simulations. **Remote Sens. Environ**. v.50, p. 1-17. 1994.

CLAWSON, K. L.; and BLAD, B. L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. **Agronomy Journal, Madison**, v. 74, p. 311-316, 1982.

CLAWSON, K. L.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. **Agron. Journal**, v.81, p. 858–863. 1989.

COLAIZZI, P. D.; O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; and MOUNCE, R. B. Crop evapotranspiration calculation using infrared thermometers aboard center pivots. **Agricultural Water Management**, v.187, p. 173–189, Jun. 2017.

DACCACHE, A.; KNOX, J. W.; WEATHERHEAD, E. K.; DANESHKHAH, A.; HESS, T. M. Implementing precision irrigation in a humid climate; Recent experiences and on-going challenges. **Agricultural Water Management**, v.147, p. 135-143. 2015.

D'ARCO, E.; ALVARENGTA, B.S.; MOURA, P.; TEIXEIRA, C.G. Estudos de reflectância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 11, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: INPE, p. 2327–2334. 2003.

DIARRA, A.; JARLAN, L.; ER-RAKI, S.; LE PAGE, M.; AOUADE, G.; TAVERNIER, A.; BOULET, G.; EZZAHAR, J.; MERLIN, O.; KHABBA, S. Performance of the two-source energy budget (TSEB) model for the monitoring of evapotranspiration over irrigated annual crops in North Africa. **Agricultural Water Management**, v.193, p. 71–88. 2017.

DALAL, H. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by infrared reflectance spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p. 120–123. 1986.

DUBOIS, D.; and PRADE, H. **A review of fuzzy set aggregation connectives**, **Information Sciences**, v.36, Issues 1–2, p. 85-121. 1985.

DUBOIS, D.; OSTASIEWICZ, W.; and PRADE, H. *Fuzzy sets: history and basic notion*, in: DUBOIS and H. PRADE (eds.), **The Handbooks of Fuzzy Sets Series**, Vol. 1: Fundamentals of *Fuzzy Sets*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht. Boston. p. 21-124. 2000.

DUKE, R. H.; HEERMANN, F. D.; DAWSON, J. L. Appropriate depth of application for scheduling central pivot irrigation. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 35, n.5, p.1457-1464, 1992.

DUTTA, R.; MORSHED, A.; ARYAL, J.; D'ESTE, C.; DAS, A. Development of an intelligent environmental knowledge system for sustainable agricultural decision support. **Environmental Modelling & Software**, v. 52, p. 264-272. 2014. ISSN 1364-8152. (link)

ED-DAHAK, A.; GUERBAOUI, M.; ELAFOU, Y.; OUTANOUTE, M.; LACHHAB, A.; BELKOURA, L. AND BOUCHIKHI, B. Implementation of *Fuzzy* Controller to Reduce Water Irrigation in Greenhouse Using Labview. **International Journal of Engineering and Advanced Technology Studies**. v.1 No. 2, p. 12-22. September 2013.

EIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454. 1996.

ER-RAKI, S.; CHEHBOUNI, A.; GUEMOURIA, N.; DUCHEMIN, B.; EZZAHAR, J.; HADRIA, R.; Combining FAO-56 model and ground-based remote sensing to estimate water consumptions of wheat crops in a semi-arid region. **Agricultural Water Management**, v.87, p. 41–54. 2007.

ER-RAKI, S.; RODRIGUEZ, J. C.; GARATUZA-PAYAN, J.; WATTS, C. J.; CHEHBOUNI, A. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. **Agricultural Water Management**, v.122, p. 12–19. 2013.

EVANS, R. G.; KING, B. A. Site-Specific Sprinkler Irrigation In: **A Water-Limited Future**. Publication by the Soil & Water Division of ASABE in. Presented at the 5th National Decennial Irrigation Conferences Paper No. IRR108491. June / 2011.

EVANS, R. G.; LARUE, J.; STONE, K. C.; KING, B. A. Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, v.31(4), p. 871-887. 2013.

EVANS, R. G.; SADLER, E. J.; Site-specific irrigation water management. In **Precision agriculture for sustainability and environmental protection**. (ed) M. Oliver. Routledge, London. p. 172-190. 2013.

EVANS, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationships in the leaves of C3 plants. **Oecologia** v.78(1), p. 9-19. 1989.

FACCO, A. G.; RIBEIRO, A.; PRUSKI, F. F.; MONTEIRO, W. C.; LEITE, F. P.; ANDRADE, R. G.; MENEZES, S. J. M. C. Geoinformation techniques to estimate water balance in eucalyptus. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1270- 1278, 2012.

FAGERIA, N. K.; and BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Adv. Agron.**, v.88, p. 97-185. 2005.

FITZGERALD, G. J.; LESCH, S. M.; BARNES, E. M.; LUCKETT, W. E. Directed sampling using remote sensing with a response surface sampling design for site-specific agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.53, p. 98–112. 2006.

FAO. The State of food and agriculture. Climate Change, Agriculture and Food Security. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome, 2016.

FRAISSE, C. W., HEERMANN, D. F. and DUKE, H. R. Modified linear move system for experimental water application. In *Advances in Planning, Design, and Management of Irrigation Systems as Related to Sustainable Land Use*. Leuven, Belgium: **Center for Irrigation Engineering**. v.1, p. 367-376. 1993.

GAO, B. C. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p. 257-266. 1996.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J. L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J. A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, v. 38, p. 106–117. 2011.

GE, A.; WANG, Y.; LIU, Z.; and JIANG, P. Hierarchical *fuzzy* control of multivariable systems via semi-tensor product method. **Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference**, Nanjing, p. 4551-4556. 2014.

GEGOV, A. E.; and FRANK, P. M. Hierarchical *fuzzy* control of multivariable systems. **Fuzzy Sets and Systems Issue 72**, p. 299–310. 1995.

GILLEY, J. R.; MIELKE, L. N.; WILHELM, N. N. An experimental center-pivot irrigation system for reduced energy crop production studies. **Trans. ASAE** v.26(5), p. 1375–1379. 1983.

GREENWOOD, D. J.; NEETESON, J. J.; DRAYCOTT, A. Quantitative relationships for the dependence of growth rate of arable crops on their nitrogen content, dry weight and aerial environment. **Plant and Soil**, v.91, p. 281–301. 1986.

GRISSE, R.; ALLEY, M.; MCCLELLAN, P.; BRANN, D.; and DONOHUE, S. Precision farming: A comprehensive approach. Virginia Cooperative Extension. **Virginia Tech Publication** 442-500. 2009.

GIUSTI, E.; and MARSILI-LIBELLI, S. A *Fuzzy* Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture. **Environ. Model Softw.** v.63, p. 73–86. 2015.

GUPTA, M.; SRIVASTAVA, P. K.; ISLAM, T. **Integrative Use of Near-Surface Satellite Soil Moisture and Precipitation for Estimation of Improved Irrigation Scheduling Parameters**. Editor(s): Prashant K. Srivastava, George P. Petropoulos, Yann H. Kerr, Satellite Soil Moisture Retrieval. Elsevier. P. 271-288, 2016.

GUPTA, M.; KISZKA, J. B.; and TROJAN, G. A. Multivariable structure of *fuzzy* control systems. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**. v.16. n. 15, p. 638-656. 1986.

GUTIERREZ, M.; NORTON R.; THORP, K.R.; WANG, G. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton. **Crop Sci**. v.52, p. 849- 857. 2012.

HABOUDANE, D.; MILLER, J.R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; and DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application in precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p. 416-426. 2002.

HAGHVERDI, A.; LEIB, B. G.; WASHINGTON-ALLEN, R. A.; BUSCHERMOHL, M. J.; and AYERS, P. D. Studying uniform and variable rate center pivot irrigation strategies with the aid of site-specific water production functions. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.123. p. 327-340. 2016.

HANSEN, J.; RUEDY, R.; SATO, M.; LO, K. Global surface temperature change. **Rev. Geophys**. p.48. 2010.

HARDISKY, M. A.; KLEMAS, V.; and SMART, R. M. The influence of soil-salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.49, p. 77-83. 1983.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. J. Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. **Journal of Precision Agriculture**, v.10(4), p. 342–355. 2009.

HENDERSON, H. **Encyclopedia of Computer Science and Technology**. Facts on File. 2009.

HEZARJARIBI, A. **Site-specific irrigation: Improvement of application map and a dynamic steering of modified center pivot irrigation system**. Institute of Production Engineering and Building Research Braunschweig. Doctoral Theses of Agricultural Sciences. Germany. p.207. 2008.

HOLMES, M. R. J.; and AINSLEY, A. M. Fertilizer requirements of spring oilseed rape. **J Sci Food Agr**, v.28, p. 301-311. 1977.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

HUNSAKER, D. J.; PINTER, P. J. JR.; BARNES, E. M.; KIMBALL, B. A. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrig. Sci.** v.22, p. 95-104. 2003.

HUNSAKER, D. J.; PINTER, P. J. JR.; KIMBALL, B. A. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. **Irrig. Sci.** v.24, p. 1-14. 2005.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER JUNIOR, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environment variability. **Agricultural Meteorology**, Ames, v. 24, p. 45-55, 1981.

INES, A.V.M.; and MOHANTY, B. P. Near-surface soil moisture assimilation for quantifying effective soil hydraulic properties using genetic algorithm: 1. Conceptual modeling. **Water Resour. Res.**, v.44, p. 1-26. 2008.

ISHIDA, T.; ANDO H.; AND FUKUHARA, M. Estimation of complex refractive index of soil particles and its dependence on soil chemical properties. **Remote Sens. Environ**, v.38, p. 173–182. 1991.

JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water Resource Research**, Malden, v. 13, p. 651-656, 1977.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER, P. J. Jr. Remotely sensed crop temperatures and reflectances as inputs to irrigation scheduling. In: **Irrigation and Drainage special conference proceedings**, 23-25 July, Boise, Idaho. ASCE, New York, pp. 390-397. 1980.

JACKSON, R. D.; and HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v.11, n.3-4, p.185-200, 1991.

JACKSON, T. J.; SCHMUGGE, J.; AND ENGMAN, E. T. Remote sensing applications to hydrology: soil moisture, **Hydrolog. Sci. J.**, v.41, p. 517–530. 1996.

JANG, J. S. R.; SUN, C.T.; MIZUTANI, E. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. Prentice Hall. 1997.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: EPIHANIO, J.C.N. São José dos Campos, Parêntese, 2009.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimation of summer crop areas in the state of Paraná, Brazil, using multitemporal EVI/Modis images. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1270-1278, 2012.

JONES, D; and BARNES, E.M.; *Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. Agricultural Systems*. USA. v.65(3), p.137-158. 2000.

JONES, H. G.; STOLL, M.; SANTOS, T.; SOUSA, C. de; CHAVES, M. M.; GRANT, O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine, **Journal of Experimental Botany**, v.53, Issue 378, p. 2249–2260. November 2002.

KALKAFI, U.; YAMAGUCHI, I.; SUGIMOTO, Y.; INANAGA, S. Response of rapeseed plant to low root temperature and nitrate: ammonium ratios. **J. Plant. Nutr.**, v.21, p. 1463-1481. 1998.

KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote Sensing**, New York, v. 5, p. 1588-1602, Mar. 2013.

KING, B. A.; KINCAID, D. C. A variable flow rate sprinkler for site-specific irrigation management. **Appl. Eng. Agric.** p. 765-770. 2004.

KOGAN, F. N. Operational space technology for global vegetation assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.82, p.1949–1964. 2001.

KRISHNA, K. R. **Precision farming: soil fertility and productivity aspects**. Apple Academic Press Inc., Waretown, NJ. 2013.

KUMAR, S. U. and RAJKUMAR, A. Multicriterion *Fuzzy* Decision Making in Irrigation Planning. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v.4, Issue 3, p. 1-7. March 2014.

KUSTAS, W.; and ANDERSON, M. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p. 2071–2081. 2009.

KWEON, G. Delineation of site-specific productivity zones using soil properties and topographic attributes with a *fuzzy* logic system. Veris Technologies, Inc., 601 N. Broadway, Salina, KS 67401, USA. **Biosystems engineering**, v.112, p. 261-277. 2012.

LILLESSAND, T. M.; and KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. **Geological Magazine**. 3rd ed. xvi 750 pp. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons. v.132(2), p. 248-249. 1994.

LIMA, A. C., de; **Desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliação de pivôs centrais de irrigação.** Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. p.205, 2008.

LU, Y. C.; SADLER, E. J.; and CAMP, C. R. Economic feasibility study of variable irrigation of corn production in southeast coastal plain. **J. Sustainable Agric.** v.26, p. 69-81. 2005.

MAITI, R. K.; and BIDINGER, F. R. **Growth and development of the pearl millet plant.** Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1981.

MAMDANI, E. H.; and ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a *fuzzy* logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v.7(1), p. 1–13. 1975.

MARONI, J. S.; STRINGAM, G. R.; THIAGARAJAH, M. R. Screening for nitrogen efficiency in Brassica napus. Can. **J. Plant. Sci.**, v.74, p.562. 1994.

MARQUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 23-26. 2011.

MASCARENHAS, L. M. A.; FERREIRA, M. A.; FERREIRA, L. G. **Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na Bacia do Rio Araguaia.** Soc. Nat. (Online). v.21, n. 1, p. 5-18, 2009.

MATTAR, M. A. A.; EL-MARAZKY, M. S.; AHMED, K. A. Modeling sprinkler irrigation infiltration based on a *fuzzy*-logic approach. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.15, n. 1, p. 1201. 2017.

McCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H.; RAINE, S. R. Real-time data requirements for model-based adaptive control of irrigation scheduling in cotton. **Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering**, v.8(2). pp. 189-206. 2011.

McCARTHY, A. C.; HANCOCK, N. H.; RAINE, S. R. Advanced process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development. **Irrigation Science**, v.31, p.183–192. 2013.

McINTOSH, B. S.; ASCOUGH, J. C.; TWERY, M.; CHEW, J.; ELMAHDI, A.; HAASE, D.; HAROU, J. J.; HEPTING, D.; CUDDY, S.; JAKEMAN, A.J.; et al.,

Environmental decision support systems (EDSS) development e challenges and best practices. **Environ. Model. Softw.** v.26, p. 1389-1402. 2011.

MENDEL, J. *Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial*. **Proceedings of the IEEE**, v.83(3), p. 345–377, Mar 1995.

MERLIN, O.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; JACOB, F.; COUDERT, B.; CHEHBOUNI, G.; DEDIEU, G.; GARATUZA, J.; KERR, Y. Disaggregation of MODIS surface temperature over an agricultural area using a time series of Formosat-2 images. **Remote Sensing of Environment**, v.114, p. 2500–2512. 2010.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte 1: O que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, p. 97-107. 1997.

MORAN, M. S.; CLARKE, T. R.; INOUE, Y.; VIDAL, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v.49(3), p. 246-263. 1994.

MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p. 319–346. 1997.

MORENO, M. A.; MEDINA, D.; ORTEGA, J. F.; TARJUELO, J. M. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. **Agricultural Water Management**, v.107, pp. 112-12. 2012.

MULLER, E.; and DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture-reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.76, p. 173–180. 2001.

MUNNÉ-BOSCH, S. and ALEGRE L. Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. **Functional Plant Biology**, v.31, p. 203-216. 2004.

NEALE, C. M. U.; BAUSCH, W. C.; HEERMAN, D. F. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. **Trans. ASAE**, v.32(6), p. 1891-1899. 1989.

NEVO, A.; OAD, R. and PODMORE, T. H. **An Integrated Expert System for Optimal Crop Planning**. Agricultural Systems. Elsevier Science Limited, England. Printed in Great Britain. p. 73-92. 1994.

OKIN, G. S. Relative spectral mixture analysis - a multitemporal index of total vegetation cover. **Remote Sensing of Environment**, Toulouse, v. 106, p. 467-479, 2007.

OLIVERA-GUERRA, L.; MERLIN, O.; ER-RAKI, S.; KHABBA, S.; ESCORIHUELA, M.J. Estimating the water budget components of irrigated crops: Combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data. **Agricultural Water Management**, v. 208, p.120–131. 2018.

OMARY, M.; CAMP, C. R.; and SADLER, E. J. Center pivot irrigation system modification to provide variable water application depth. ASAE Paper No.962075, **ASAE Annual Meeting**, Phoenix, AZ, p.14-18. July 1996.

O'SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D. Dynamic prescription maps for site-specific variable rate irrigation of cotton. **Agricultural Water Management**, v.159, p.123-138. 2015.

PAPAGEORGIU, E. I.; KOKKINOS, K.; DIKOPOULOU, Z. *Fuzzy Sets in Agriculture*. In: Kahraman C., Kaymak U., Yazici A. (eds) *Fuzzy Logic in Its 50th Year. Studies in Fuzziness and Soft Computing*, v.341. 2016.

PEDRYCZ, W. **Why triangular membership functions?** *Fuzzy Sets and Systems*, v.64, p.21–30. 1994.

PEDRYCZ, W. and F. GOMIDE. **An introduction to fuzzy sets: Analysis and design**. Cambridge: MIT Press. 1998.

PERRY, C.D.; POCKNEE, S.; and KVIEN, C. Documenting Water Savings from Variable Rate Irrigation Control Systems, **ASAE Paper** No. 03-2144, ASAE, St. Joseph, MI. 2003.

PHOCAIDES, A. **Handbook on Pressurized Irrigation Techniques. Food and Agriculture Organization of The United Nations**. Electronic Publishing Policy and Support Branch Communication Division FAO Viale delle Terme di Caracalla, Rome, Italy. 2007.

PINTER, P. J. JR.; HATFIELD, J. L.; SCHEPERS, J. S.; BARNES, E. M.; MORAN, M. S.; DAUGHTRY, C. S.; UPCHURCH, D. R. Remote sensing for crop management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.69, p. 647–664. 2003.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: SAEAFS, pp.446. 1996.

RAJAN, N. A.; MAAS, S.; KELLISON, R.; DOLLAR, M.; CUI, S.; SHARMA, S.; and ATTIA, A. Emitter Uniformity and Application Efficiency for Centre-Pivot Irrigation Systems. **Irrigation and Drainage**. v.64, p. 353-361. 2015.

RAJU, K. S.; And KUMAR, D. N. *Fuzzy Multicriterion Decision Making*. Irrigation Planning. **Irrigation and Drainage**, v.54, p. 455–465. 2005.

RATHKE, G. W.; CHRISTEN, O.; DIEPENBROCK, W. Effects of nitrogen source and rate on productivity and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown in different crop rotations. **Field Crops Res.**, v.94, p. 103-113. 2005.

REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. Piracicaba, Editora Manole, 188p. 1990.

RIZZI, R.; FONSECA, E. L. Análise da variação espacial e temporal do NDVI no Estado do Rio Grande do Sul através de imagens AVHRR. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 10. Foz do Iguaçu. São José dos Campos: INPE, p.1735-1737. 2001.

ROBOCK, A. **Hydrology, Floods and Droughts: Soil Moisture**. Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition), Academic Press, Pages 232-239, 2015.

RODRIGUEZ, D.; FITZGERALD, G. J.; BELFORD, R.; and CHRISTENSEN, L. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-biophysiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.57, p.7. 2005.

ROMERO, R.; MURIELB, J. L.; GARCÍA, I.; de la PEÑA, D. M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v.114, p. 59–66. 2012.

ROMMELFANGER, H. J. *Fuzzy Logic-Based Processing of Expert Rules Used for Checking the Credit Solvency of Small Business Firms or for Supporting Analytic Procedures of Auditors*. In: Ribeiro R.R. (Eds.) **Soft Computing in Financial Engineering**. Physica-Verlag, Heidelberg, v.37, p. 1-244. 1999.

ROSEGRANT, M. W.; CAI, X.; CLINE, S. A. Global water outlook to 2025: averting an impending crisis. Washington, DC: International Food Policy Research Institute: **International Water Management Institute**, p.28. 2002.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, McGraw-Hill, 1995.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final report, Greenbelt MD: p.1-371. 1974.

SADEGHI, M.; JONES, S. B.; PHILPOT, W. D. A linear physically-based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands. **Remote Sens. Environ.** v.164, p. 66–76. 2015.

SADLER, E. J.; CAMP, C. R.; VANS, D. E. E.; and USREY, L. J. A site-specific center pivot irrigation system for highly-variable Coastal Plain soils, In: **Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture**, edited by P. C. Robert, R. H. Rust, and W. E. Larson, pp. 827–834. 1996.

SADLER, E. J.; EVANS, R.G.; STONE, K. C.; and CAMP, C. R. Opportunities for conservation with precision irrigation. **Journal of Soil and Water Conservation.** v.60(6), p. 371-379. 2005.

SAHOO, R. N.; RAY, S. S.; MANJUNATH, K. R. Hyperspectral remote sensing of agriculture. **Current Science**, v. 108, n. 5, p. 848-859, 2015.

SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, v.79, p. 213–224. 2002.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica: Agência Nacional de Águas, 2001.

SHI, X.; HAN, W.; ZHAO, T.; and TANG, J. Decision Support System for Variable Rate Irrigation Based on UAV Multispectral Remote Sensing. **Sensors**, v.19, p. 2880-2900. 2019.

SHIRATSUCHI, L. S.; VILELA, M. F.; FERGUSON, R. B.; SHANAHAN, J. F.; ADAMCHUK, V. I.; RESENDE, A. V.; HURTADO, S. M. C.; CORAZZA, E. J. Desenvolvimento de um algoritmo baseado em sensores ativos de dossel para recomendação da adubação nitrogenada em taxas variáveis. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Org.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa. p. 184-188. 2011.

SIELING, K.; and CHRISTEN, O. Effect of preceding crop combination and N fertilization on yield of six oilseed rape cultivars (*Brassica napus* L.). **Eur. J. Agron.**, v.7, p. 301-306. 1997.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô central**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 54p. 1998.

SILVA, J. G. F. da; COELHO, E. F. Irrigação do mamoeiro. In: MARTINS, D. dos S.; COSTA, A. de F. s., da.; **A Cultura do mamoeiro: tecnologia de produção**. Vitória, ES. INCAPER. p.161-197. 2003.

SMITH, R.; BAILLIE, J.; MCCARTHY, A; RAINE, S.; BAILLIE, C. **Review of precision irrigation technologies and their application**. National Centre for Engineering in Agriculture, University of Southern Queensland, Toowoomba, Technical Report, NCEA Publication, 2010.

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

SNSA - Brasil. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos** – 2014. Brasília: SNSA/MCIDADES, p.212. 2016.

SRINIVASAN, A. **Handbook of Precision Agriculture: Principles and Applications**, CRC Press, 2006.

STAFFORD, J. V. The role of technology in the emergence and current status of precision agriculture. In A. Srinivasan (ed.), **Handbook of Precision Agriculture: Principles and applications**. The Haworth Press, Inc, New York, NY. pp. 19-56. 2006.

STARK, J. C.; MCCANN, I. R.; KING, B. A.; and WESTERMANN, D. T. A two-dimensional irrigation control system for site specific application of water and chemicals. **Agronomy Abstracts**, v.85, p. 329. 1993.

STEVEN, N. D. Correcting the effects of field of view and varying illumination in spectral measurements of crops. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p. 55-72, 2004.

SUGENO, M.; and KANG, G. Structure identification of *fuzzy* model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 28, p. 15–33, 1988.

SUI, R.; and YAN, H. Field study of variable rate irrigation management in humid Climates. **Irrig. Drain**. v.66, Issue 3, p. 327–339. 2017.

TAKAGI, T.; and SUGENO, M. *Fuzzy* Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control, IEEE Trans. **Systems, Man, Cybern.**, v.15, No. 1, p.116-132, May 1985.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas, SP. Unicamp/FEAGRI. e-book. p. 215. 2017. ISBN 978-85-99678-10-7

TILLING, A. T.; O'LEARY, G.; FERWERDA, J. G.; JONES, S. D.; FITZGERALD, G.; and BELFORD, R. Remote Sensing to Detect Nitrogen and Water Stress in Wheat. **Proceedings of the 13th ASA Conference**, p. 10-14 September 2006.

TOUATI, F.; AL-HITMI, M.; BENHMED, K.; TABISH, R. A *fuzzy* logic-based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.98, p. 233-241, 2013.

TROUT, T. J.; JOHNSON, L. F.; GARTUNG, J. Remote sensing of canopy cover in horticultural crops. **HortScience**, v.43, p. 333–337. 2008.

TROEH, R.F.; and THOMPSON, L.M. **Solos e fertilidade do solo**. São Paulo: Andrei. p.63. 2007.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, p.127-150. 1979.

VERMEIREN, L.; and JOBLING, G. A. Irrigação localizada. **Estudos FAO: Irrigação e Drenagem**, 36. Tradução de H. R. Gheyi; F.A.V. Damasceno; L.G.A. Silva Jr.; J.F. de Medeiros. Campina Grande, UFPB, p.184. 1997.

VICENTE, L. E.; GOMES, D.; VICTORIA, D. C.; GARÇON, E. A. M.; BOLFE, E. L.; ANDRADE, R. G.; SILVA, G. B. S. NDVI temporal series from the SPOT Vegetation sensor and SAM algorithm applied to sugarcane mapping. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n. 9, p. 1270-1278, 2012.

VICTORIA, D. C.; PAZ, A. R.; COUTINHO, A. C.; KASTENS, J.; BROWN, J. C. Cropland area estimates using Modis NDVI time series in the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1270-1278, 2012.

VOINOV, A.; and SHUGART, H. Integronsters, integral and integrated modeling. **Environ. Model. Softw.** v.39, p. 149-158. 2013.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; AND KALMA, J. T. One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations: A comparison of retrieval methods, **Adv. Water Resour.**, v.24, p. 631–650. 2001.

WANG, L.-X. **A Course in Fuzzy Systems and Control**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

WANG, Z. X.; LIU, C.; HUETE, A. From AVHRRNDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. **Acta Ecologica Sinica**, v.23, n.5, p.979- 988, 2003.

WILLIAMSON, H. D. Evaluation of middle and thermal infrared radiance in indices used to estimate GLAI. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, p. 275–283. 1988.

WOOD, G. A.; TAYLOR, J. C.; GODWIN, R. J. Calibration methodology for mapping within-field crop variability using remote sensing. **Biosystems Engineering**, v.84, p. 409–423. 2003.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report: Water and Energy**. Paris, UNESCO. 2014. ISBN: 978-92-3-104259-1. Disponível em <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225741>. Acesso em: 10 fev. 2018.

XIA, T.; MIAO, Y.; WU, D.; SHAO, H.; KHOSLA, R.; MI, G. Active optical sensing of spring maize for in-season diagnosis of nitrogen status based on nitrogen nutrition index. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 605, 2016.

XINJIAN, X. Design of *fuzzy* drip irrigation control system based on ZigBee wireless sensor network. Computer and computing technologies in agriculture. IV. IFIP **Advances in Information and Communication Technology**, v. 344, p. 495–501. 2011.

YANG, C.-C.; PRASHER, S. O.; LANDRY, J.-A.; RAMASWAMY, H. S. Development of an Image Processing System and a *Fuzzy* Algorithm for Site-Specific Herbicide Applications. **Precision Agriculture**, 4, 5–18, 2003.

YANG, Y.; GUAN, H.; LONG, D.; LIU, B.; QIN, G.; QIN, J.; BATELAAN, O. Estimation of surface soil moisture from thermal infrared remote sensing using an improved trapezoid method. **Remote Sens.** v.7, p. 8250–8270. 2015.

YOUNAN, N. H.; and KING, R. L. Classification of hyperspectral data: a comparative study. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.5, p. 41-53, 1999.

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

ZARCO-TEJADA, J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J. A. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, v.117, p. 322-337. 2012.

ZHANG, D.; and ZHOU, G. Estimation of Soil Moisture from Optical and Thermal Remote Sensing: A Review. **Sensors**, v.16, p. 1308-1337. 2016.

ZHANG, H. Y.; FEI, L.; WEI, Z.; CONGCONG, M.; YUEWEI, C. The *Fuzzy* Decision-Making Method of Irrigation Amount Based on ET and Soil Water Potential.

International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC).
p.2927-2931. 2011.

ZHANG, N.; WANG, M.; and WANG, N. Precision agriculture - A worldwide overview.
Comput. Electron. Agric. v.36, p. 113-132. 2002.

ZHANG, Q.; ZHANG, C. J. W.; and TILT, K. Application of *Fuzzy* Logic in an Irrigation Control System. **Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology**, p. 593-597. 1996.

ZHU, L. Z.; and LI, X. Study of automatic control system for irrigation. **Advanced Materials Research**, v.219–220, p. 1463–1467. 2011.

APÊNDICE A

Planilha com os dados da pesquisa de Barker et al., 2018 – Parte 1/4.

Irrigation applied: Brule 2016		Times in Central Standard Time				Times in Central Standard Time				
JBB	10/2/2017	Start Angle	95,5	Start Angle	95,5	Start Angle	95,5	Start Angle	95,5	
Updated DMH	7/5/2019	End Angle	455,5	End Angle	455,5	End Angle	455,5	End Angle	455,5	
Center Northing (m)		Start Date Time	5/24/16 15:06	Start Date Time	6/23/16 16:57	Start Date Time	7/4/16 16:53	Start Date Time	7/4/16 16:53	
Center Easting (m)		End Date Time	5/25/16 22:38	End Date Time	6/25/16 6:48	End Date Time	7/6/16 6:44	End Date Time	7/6/16 6:44	
Tube Number	Treatment	First Corn Irrigation								
		Plot Centroids UTM Z14N, NAD83	Angle from Center	Easting	Northing	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	
B01	A	4546432,1	250452,4	48,757047	5/25/16 18:32	0,50	6/25/16 1:53	0,60	7/6/16 1:49	0,60
B02	C	4546394,8	250481,0	56,257004	5/25/16 19:12	0,50	6/25/16 2:40	0,60	7/6/16 2:36	0,60
B03	C	4546354,0	250504,6	63,756641	5/25/16 19:51	0,50	6/25/16 3:27	0,60	7/6/16 3:23	0,60
B04	C	4546362,4	250386,0	50,63526	5/25/16 18:42	0,50	6/25/16 2:05	0,60	7/6/16 2:01	0,60
B05	A	4546319,4	250414,8	61,884314	5/25/16 19:41	0,50	6/25/16 3:16	0,60	7/6/16 3:12	0,60
B06	A	4546332,2	250349,2	50,637443	5/25/16 18:42	0,50	6/25/16 2:05	0,60	7/6/16 2:01	0,60
B07	C	4546296,9	250372,8	61,885876	5/25/16 19:41	0,50	6/25/16 3:16	0,60	7/6/16 3:12	0,60
B08	A	4546288,2	250321,6	56,265914	5/25/16 19:12	0,50	6/25/16 2:40	0,60	7/6/16 2:36	0,60
B09	A	4546035,9	250504,6	116,25157	5/24/16 16:55	0,50	6/23/16 19:07	0,60	7/4/16 19:03	0,60
B10	C	4545995,2	250481,0	123,7504	5/24/16 17:34	0,50	6/23/16 19:55	0,60	7/4/16 19:51	0,60
B11	A	4545957,9	250452,4	131,24959	5/24/16 18:13	0,50	6/23/16 20:42	0,60	7/4/16 20:38	0,60
B12	A	4546057,0	250461,7	116,25156	5/24/16 16:55	0,50	6/23/16 19:07	0,60	7/4/16 19:03	0,60
B13	C	4546021,7	250441,3	123,75033	5/24/16 17:34	0,50	6/23/16 19:55	0,60	7/4/16 19:51	0,60
B14	C	4545989,3	250416,5	131,25	5/24/16 18:13	0,50	6/23/16 20:42	0,60	7/4/16 20:38	0,60
B15	A	4546070,6	250414,8	118,1269	5/24/16 17:04	0,50	6/23/16 19:19	0,60	7/4/16 19:15	0,60
B16	C	4546027,6	250386,0	129,37483	5/24/16 18:04	0,50	6/23/16 20:30	0,60	7/4/16 20:26	0,60
B17	C	4546127,9	250282,4	123,75203	5/24/16 17:34	0,50	6/23/16 19:55	0,60	7/4/16 19:51	0,60
B18	C	4545957,9	249911,7	228,74271	5/25/16 2:46	0,50	6/24/16 6:57	0,60	7/5/16 6:53	0,60
B19	A	4545995,2	249883,0	236,24288	5/25/16 3:25	0,50	6/24/16 7:44	0,60	7/5/16 7:40	0,60
B20	A	4546035,9	249859,5	243,74319	5/25/16 4:05	0,50	6/24/16 8:32	0,60	7/5/16 8:28	0,60
B21	C	4546057,8	250014,9	230,61306	5/25/16 2:56	0,50	6/24/16 7:09	0,60	7/5/16 7:05	0,60
B22	A	4546093,0	249991,3	241,86423	5/25/16 3:55	0,50	6/24/16 8:20	0,60	7/5/16 8:16	0,60
B23	A	4546101,7	250042,4	236,2351	5/25/16 3:25	0,50	6/24/16 7:44	0,60	7/5/16 7:40	0,60
B24	A	4546127,9	250081,6	236,22979	5/25/16 3:25	0,50	6/24/16 7:44	0,60	7/5/16 7:40	0,60
B25	A	4546220,8	249919,4	275,61951	5/25/16 6:52	0,50	6/24/16 11:53	0,60	7/5/16 11:49	0,60
B26	C	4546271,6	249929,5	286,87125	5/25/16 7:52	0,50	6/24/16 13:04	0,60	7/5/16 13:00	0,60
B27	C	4546216,2	249966,8	275,61815	5/25/16 6:52	0,50	6/24/16 11:53	0,60	7/5/16 11:49	0,60
B28	A	4546257,7	249975,1	286,87025	5/25/16 7:52	0,50	6/24/16 13:04	0,60	7/5/16 13:00	0,60
B29	C	4546227,7	250017,4	281,24271	5/25/16 7:22	0,50	6/24/16 12:28	0,60	7/5/16 12:24	0,60
B30	C	4546218,5	250063,6	281,23979	5/25/16 7:22	0,50	6/24/16 12:28	0,60	7/5/16 12:24	0,60

Planilha com os dados da pesquisa de Barker et al., 2018 – Parte 2/4.

End Angle	455,5	End Angle	455,5	End Angle	455,5	End Angle	455,5	End Angle	455,5
Start Date Time	7/7/16 18:57	7/12/16 8:38	7/14/16 22:43	7/16/16 23:00	7/16/16 23:00	7/24/16 19:15	7/24/16 19:15	7/24/16 19:15	7/24/16 19:15
End Date Time	7/9/16 22:03	7/14/16 11:44	7/17/16 1:49	7/19/16 2:06	7/19/16 2:06	7/26/16 22:21	7/26/16 22:21	7/26/16 22:21	7/26/16 22:21
Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)
7/9/16 15:24	0,81	7/14/16 5:05	0,81	7/16/16 19:10	0,81	7/18/16 19:27	0,81	7/26/16 15:42	0,81
7/9/16 16:28	0,81	7/14/16 6:09	0,81	7/16/16 20:14	0,81	7/18/16 20:31	0,81	7/26/16 16:46	0,81
7/9/16 17:32	0,81	7/14/16 7:13	0,81	7/16/16 21:18	0,81	7/18/16 21:35	0,81	7/26/16 17:50	0,81
7/9/16 15:40	0,81	7/14/16 5:21	0,81	7/16/16 19:26	0,81	7/18/16 19:43	0,81	7/26/16 15:58	0,81
7/9/16 17:16	0,81	7/14/16 6:57	0,81	7/16/16 21:02	0,81	7/18/16 21:19	0,81	7/26/16 17:34	0,81
7/9/16 15:40	0,81	7/14/16 5:21	0,81	7/16/16 19:26	0,81	7/18/16 19:43	0,81	7/26/16 15:58	0,81
7/9/16 17:16	0,81	7/14/16 6:57	0,81	7/16/16 21:02	0,81	7/18/16 21:19	0,81	7/26/16 17:34	0,81
7/9/16 16:28	0,81	7/14/16 6:09	0,81	7/16/16 20:14	0,81	7/18/16 20:31	0,81	7/26/16 16:46	0,81
7/7/16 21:53	0,81	7/12/16 11:34	0,81	7/15/16 1:39	0,81	7/17/16 1:56	0,81	7/24/16 22:11	0,81
7/7/16 22:57	0,81	7/12/16 12:38	0,81	7/15/16 2:43	0,81	7/17/16 3:00	0,81	7/24/16 23:15	0,81
7/8/16 0:01	0,81	7/12/16 13:42	0,81	7/15/16 3:47	0,81	7/17/16 4:04	0,81	7/25/16 0:19	0,81
7/7/16 21:53	0,81	7/12/16 11:34	0,81	7/15/16 1:39	0,81	7/17/16 1:56	0,81	7/24/16 22:11	0,81
7/7/16 22:57	0,81	7/12/16 12:38	0,81	7/15/16 2:43	0,81	7/17/16 3:00	0,81	7/24/16 23:15	0,81
7/8/16 0:01	0,81	7/12/16 13:42	0,81	7/15/16 3:47	0,81	7/17/16 4:04	0,81	7/25/16 0:19	0,81
7/7/16 22:09	0,81	7/12/16 11:50	0,81	7/15/16 1:55	0,81	7/17/16 2:12	0,81	7/24/16 22:27	0,81
7/7/16 23:45	0,81	7/12/16 13:26	0,81	7/15/16 3:31	0,81	7/17/16 3:48	0,81	7/25/16 0:03	0,81
7/7/16 22:57	0,81	7/12/16 12:38	0,81	7/15/16 2:43	0,81	7/17/16 3:00	0,81	7/24/16 23:15	0,81
7/8/16 13:51	0,81	7/13/16 3:32	0,81	7/15/16 17:37	0,81	7/17/16 17:54	0,81	7/25/16 14:09	0,81
7/8/16 14:55	0,81	7/13/16 4:36	0,81	7/15/16 18:41	0,81	7/17/16 18:58	0,81	7/25/16 15:13	0,81
7/8/16 15:59	0,81	7/13/16 5:40	0,81	7/15/16 19:45	0,81	7/17/16 20:02	0,81	7/25/16 16:17	0,81
7/8/16 14:07	0,81	7/13/16 3:48	0,81	7/15/16 17:53	0,81	7/17/16 18:10	0,81	7/25/16 14:25	0,81
7/8/16 15:43	0,81	7/13/16 5:24	0,81	7/15/16 19:29	0,81	7/17/16 19:46	0,81	7/25/16 16:01	0,81
7/8/16 14:55	0,81	7/13/16 4:36	0,81	7/15/16 18:41	0,81	7/17/16 18:58	0,81	7/25/16 15:13	0,81
7/8/16 14:55	0,81	7/13/16 4:36	0,81	7/15/16 18:41	0,81	7/17/16 18:58	0,81	7/25/16 15:13	0,81
7/8/16 20:31	0,81	7/13/16 10:12	0,81	7/16/16 0:17	0,81	7/18/16 0:34	0,81	7/25/16 20:49	0,81
7/8/16 22:06	0,81	7/13/16 11:47	0,81	7/16/16 1:52	0,81	7/18/16 2:09	0,81	7/25/16 22:24	0,81
7/8/16 20:31	0,81	7/13/16 10:12	0,81	7/16/16 0:17	0,81	7/18/16 0:34	0,81	7/25/16 20:49	0,81
7/8/16 22:06	0,81	7/13/16 11:47	0,81	7/16/16 1:52	0,81	7/18/16 2:09	0,81	7/25/16 22:24	0,81
7/8/16 21:18	0,81	7/13/16 10:59	0,81	7/16/16 1:04	0,81	7/18/16 1:21	0,81	7/25/16 21:36	0,81
7/8/16 21:18	0,81	7/13/16 10:59	0,81	7/16/16 1:04	0,81	7/18/16 1:21	0,81	7/25/16 21:36	0,81

Planilha com os dados da pesquisa de Barker et al., 2018 – Parte 3/4

Start Angle	95.5	Start Angle	95.5	Start Angle	96	Start Angle	106.7	Start Angle	95.2
End Angle	455.5	End Angle	455.5	End Angle	471	End Angle	455	End Angle	455
Start Date Time	7/31/16 15:00	Start Date Time	8/5/16 16:41	Start Date Time	8/10/16 9:41	Start Date Time	8/20/16 10:03	Start Date Time	8/24/16 19:46
End Date Time	8/2/16 18:06	End Date Time	8/7/16 19:47	End Date Time	8/12/16 14:36	End Date Time	8/22/16 11:10	End Date Time	8/26/16 22:00
Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)	Date / Time	Depth (in)
8/2/16 11:27	0,81	8/7/16 13:08	0,81	8/12/16 5:49	1,00	8/22/16 4:38	1,00	8/26/16 15:32	0,20
8/2/16 12:31	0,81	8/7/16 14:12	0,81	8/12/16 6:52	1,00	8/22/16 5:42	1,00	8/26/16 16:35	1,00
8/2/16 13:35	0,81	8/7/16 15:16	0,81	8/12/16 7:56	1,00	8/22/16 6:45	1,00	8/26/16 17:38	1,00
8/2/16 11:43	0,81	8/7/16 13:24	0,81	8/12/16 6:04	1,00	8/22/16 4:54	1,00	8/26/16 15:48	1,00
8/2/16 13:19	0,81	8/7/16 15:00	0,81	8/12/16 7:40	1,00	8/22/16 6:29	1,00	8/26/16 17:22	0,20
8/2/16 11:43	0,81	8/7/16 13:24	0,81	8/12/16 6:04	1,00	8/22/16 4:54	1,00	8/26/16 15:48	0,40
8/2/16 13:19	0,81	8/7/16 15:00	0,81	8/12/16 7:40	1,00	8/22/16 6:29	1,00	8/26/16 17:22	1,00
8/2/16 12:31	0,81	8/7/16 14:12	0,81	8/12/16 6:52	1,00	8/22/16 5:42	1,00	8/26/16 16:35	0,60
7/31/16 17:56	0,81	8/5/16 19:37	0,81	8/10/16 12:32	1,00	8/20/16 11:23	1,00	8/24/16 22:42	0,60
7/31/16 19:00	0,81	8/5/16 20:41	0,81	8/10/16 13:35	1,00	8/20/16 12:27	1,00	8/24/16 23:45	1,00
7/31/16 20:04	0,81	8/5/16 21:45	0,81	8/10/16 14:39	1,00	8/20/16 13:30	1,00	8/25/16 0:47	0,60
7/31/16 17:56	0,81	8/5/16 19:37	0,81	8/10/16 12:32	1,00	8/20/16 11:23	1,00	8/24/16 22:42	0,60
7/31/16 19:00	0,81	8/5/16 20:41	0,81	8/10/16 13:35	1,00	8/20/16 12:27	1,00	8/24/16 23:45	1,00
7/31/16 20:04	0,81	8/5/16 21:45	0,81	8/10/16 14:39	1,00	8/20/16 13:30	1,00	8/25/16 0:47	1,00
7/31/16 18:12	0,81	8/5/16 19:53	0,81	8/10/16 12:48	1,00	8/20/16 11:39	1,00	8/24/16 22:58	0,80
7/31/16 19:48	0,81	8/5/16 21:29	0,81	8/10/16 14:23	1,00	8/20/16 13:14	1,00	8/25/16 0:32	1,00
7/31/16 19:00	0,81	8/5/16 20:41	0,81	8/10/16 13:35	1,00	8/20/16 12:27	1,00	8/24/16 23:45	1,00
8/1/16 9:54	0,81	8/6/16 11:35	0,81	8/11/16 4:24	1,00	8/21/16 3:15	1,00	8/25/16 14:24	1,00
8/1/16 10:58	0,81	8/6/16 12:39	0,81	8/11/16 5:28	1,00	8/21/16 4:19	1,00	8/25/16 15:27	0,80
8/1/16 12:02	0,81	8/6/16 13:43	0,81	8/11/16 6:31	1,00	8/21/16 5:22	1,00	8/25/16 16:30	0,80
8/1/16 10:10	0,81	8/6/16 11:51	0,81	8/11/16 4:40	1,00	8/21/16 3:31	1,00	8/25/16 14:40	1,00
8/1/16 11:46	0,81	8/6/16 13:27	0,81	8/11/16 6:15	1,00	8/21/16 5:06	1,00	8/25/16 16:14	0,80
8/1/16 10:58	0,81	8/6/16 12:39	0,81	8/11/16 5:28	1,00	8/21/16 4:19	1,00	8/25/16 15:27	0,40
8/1/16 10:58	0,81	8/6/16 12:39	0,81	8/11/16 5:28	1,00	8/21/16 4:18	1,00	8/25/16 15:27	0,20
8/1/16 16:34	0,81	8/6/16 18:15	0,81	8/11/16 11:01	1,00	8/21/16 9:52	1,00	8/25/16 20:57	0,20
8/1/16 18:09	0,81	8/6/16 19:50	0,81	8/11/16 12:37	1,00	8/21/16 11:27	1,00	8/25/16 22:31	1,00
8/1/16 16:34	0,81	8/6/16 18:15	0,81	8/11/16 11:01	1,00	8/21/16 9:52	1,00	8/25/16 20:57	1,00
8/1/16 18:09	0,81	8/6/16 19:50	0,81	8/11/16 12:37	1,00	8/21/16 11:27	1,00	8/25/16 22:31	1,00
8/1/16 17:21	0,81	8/6/16 19:02	0,81	8/11/16 11:49	1,00	8/21/16 10:39	1,00	8/25/16 21:44	1,00
8/1/16 17:21	0,81	8/6/16 19:02	0,81	8/11/16 11:49	1,00	8/21/16 10:39	1,00	8/25/16 21:44	1,00

Planilha com os dados da pesquisa de Barker et al., 2018 – Parte 4/4.

Start Angle		End Angle		Start Date Time		End Date Time		Start Angle		End Angle		Start Date Time		End Date Time	
95		455		8/31/16 8:15		9/2/16 10:51		95		455		9/11/16 11:37		9/13/16 12:07	
Date / Time		Depth (in)		Date / Time		Depth (in)		Date / Time		Depth (in)		Date / Time		Depth (in)	
9/2/16 4:21	0,80	9/13/16 5:53	0,80	9/21/16 5:25	0,80	9/25/16 2:21	1,00	9/2/16 5:24	1,00	9/13/16 6:53	1,00	9/21/16 6:28	0,60	9/25/16 3:24	0,60
9/2/16 6:27	1,00	9/13/16 7:54	1,00	9/21/16 7:31	0,20	9/25/16 4:26	0,60	9/2/16 6:36	1,00	9/13/16 7:54	1,00	9/21/16 7:31	0,60	9/25/16 4:26	0,60
9/2/16 6:11	0,40	9/13/16 7:39	0,40	9/21/16 7:15	0,20	9/25/16 2:36	0,60	9/2/16 4:36	1,00	9/13/16 6:08	1,00	9/21/16 5:41	0,60	9/25/16 2:36	0,60
9/2/16 4:36	0,60	9/13/16 6:08	0,60	9/21/16 5:41	0,80	9/25/16 4:11	1,00	9/2/16 6:11	0,40	9/13/16 7:39	0,40	9/21/16 7:15	1,00	9/25/16 4:11	1,00
9/2/16 6:11	1,00	9/13/16 7:39	1,00	9/21/16 7:15	0,20	9/25/16 2:36	0,60	9/2/16 4:36	0,60	9/13/16 6:08	0,60	9/21/16 5:41	1,00	9/25/16 2:36	1,00
9/2/16 5:24	0,80	9/13/16 6:53	0,80	9/21/16 6:28	0,80	9/25/16 4:11	0,60	9/2/16 6:11	1,00	9/13/16 7:39	1,00	9/21/16 7:15	0,60	9/25/16 4:11	0,60
8/31/16 11:14	0,80	9/11/16 14:28	0,80	9/19/16 12:37	0,80	9/23/16 3:24	1,00	8/31/16 11:14	0,80	9/11/16 14:28	0,80	9/19/16 12:37	1,00	9/23/16 3:24	1,00
8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	0,20	9/23/16 9:28	0,60	8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	1,00	9/23/16 9:28	0,60
8/31/16 13:20	0,80	9/11/16 16:30	0,80	9/19/16 14:43	0,80	9/23/16 11:34	1,00	8/31/16 13:20	0,80	9/11/16 16:30	0,80	9/19/16 14:43	1,00	9/23/16 11:34	1,00
8/31/16 11:14	0,80	9/11/16 14:28	0,80	9/19/16 12:37	1,00	9/23/16 9:28	1,00	8/31/16 11:14	0,80	9/11/16 14:28	0,80	9/19/16 12:37	1,00	9/23/16 9:28	1,00
8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	0,20	9/23/16 10:31	0,60	8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	0,60	9/23/16 10:31	0,60
8/31/16 13:20	0,80	9/11/16 16:30	0,80	9/19/16 14:43	0,20	9/23/16 11:34	1,00	8/31/16 13:20	0,80	9/11/16 16:30	0,80	9/19/16 14:43	1,00	9/23/16 11:34	1,00
8/31/16 11:30	0,80	9/11/16 14:43	0,80	9/19/16 12:53	0,20	9/23/16 10:31	0,60	8/31/16 11:30	0,80	9/11/16 14:43	0,80	9/19/16 12:53	0,60	9/23/16 10:31	0,60
8/31/16 13:04	1,00	9/11/16 16:14	1,00	9/19/16 14:27	0,20	9/23/16 11:18	0,60	8/31/16 13:04	1,00	9/11/16 16:14	1,00	9/19/16 14:27	0,60	9/23/16 11:18	0,60
8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	0,20	9/23/16 10:31	0,60	8/31/16 12:17	1,00	9/11/16 15:29	1,00	9/19/16 13:40	0,60	9/23/16 10:31	0,60
9/1/16 3:02	1,00	9/12/16 5:38	1,00	9/20/16 4:19	0,20	9/24/16 1:11	0,60	9/1/16 3:02	1,00	9/12/16 5:38	1,00	9/20/16 4:19	0,60	9/24/16 1:11	0,60
9/1/16 4:06	0,80	9/12/16 6:38	0,80	9/20/16 5:22	1,00	9/24/16 2:14	1,00	9/1/16 4:06	0,80	9/12/16 6:38	0,80	9/20/16 5:22	1,00	9/24/16 2:14	1,00
9/1/16 5:09	0,80	9/12/16 7:39	0,80	9/20/16 6:24	0,80	9/24/16 3:17	1,00	9/1/16 5:09	0,80	9/12/16 7:39	0,80	9/20/16 6:24	0,80	9/24/16 3:17	1,00
9/1/16 3:18	1,00	9/12/16 5:53	1,00	9/20/16 4:35	0,20	9/24/16 1:27	0,60	9/1/16 3:18	1,00	9/12/16 5:53	1,00	9/20/16 4:35	0,20	9/24/16 1:27	0,60
9/1/16 4:53	1,00	9/12/16 7:24	1,00	9/20/16 6:09	0,80	9/24/16 3:01	1,00	9/1/16 4:53	1,00	9/12/16 7:24	1,00	9/20/16 6:09	0,80	9/24/16 3:01	1,00
9/1/16 4:06	0,60	9/12/16 6:38	0,60	9/20/16 5:22	0,80	9/24/16 2:14	1,00	9/1/16 4:06	0,60	9/12/16 6:38	0,60	9/20/16 5:22	0,80	9/24/16 2:14	1,00
9/1/16 4:06	0,40	9/12/16 6:38	0,40	9/20/16 5:22	0,80	9/24/16 2:14	1,00	9/1/16 4:06	0,40	9/12/16 6:38	0,40	9/20/16 5:22	0,80	9/24/16 2:14	1,00
9/1/16 9:38	0,60	9/12/16 11:57	0,60	9/20/16 10:51	0,80	9/24/16 7:44	1,00	9/1/16 9:38	0,60	9/12/16 11:57	0,60	9/20/16 10:51	0,80	9/24/16 7:44	1,00
9/1/16 11:13	1,00	9/12/16 13:27	1,00	9/20/16 12:25	0,20	9/24/16 9:19	0,60	9/1/16 11:13	1,00	9/12/16 13:27	1,00	9/20/16 12:25	0,20	9/24/16 9:19	0,60
9/1/16 9:38	1,00	9/12/16 11:57	1,00	9/20/16 10:51	0,20	9/24/16 7:44	1,00	9/1/16 9:38	1,00	9/12/16 11:57	1,00	9/20/16 10:51	0,20	9/24/16 7:44	1,00
9/1/16 11:13	1,00	9/12/16 13:27	1,00	9/20/16 12:25	1,00	9/24/16 9:19	0,60	9/1/16 11:13	1,00	9/12/16 13:27	1,00	9/20/16 12:25	1,00	9/24/16 9:19	0,60
9/1/16 10:25	1,00	9/12/16 12:42	1,00	9/20/16 11:38	0,20	9/24/16 8:31	0,60	9/1/16 10:25	1,00	9/12/16 12:42	1,00	9/20/16 11:38	0,20	9/24/16 8:31	0,60
9/1/16 10:25	1,00	9/12/16 12:42	1,00	9/20/16 11:38	0,20	9/24/16 8:31	0,60	9/1/16 10:25	1,00	9/12/16 12:42	1,00	9/20/16 11:38	0,20	9/24/16 8:31	0,60

APÊNDICE B

Planilha com os dados da irrigação da fazenda comercial cedida pela empresa Sistema Irriga.

Date	Irrigação (mm)	Irrigação Acumulada (mm)
15/06/18	6.10	6.10
17/06/18	6.10	12.20
23/06/18	6.10	18.30
25/06/18	6.10	53.90
27/06/18	6.10	60.00
30/06/18	6.10	66.10
03/07/18	6.10	72.20
07/07/18	8.71	80.91
10/07/18	8.71	89.62
12/07/18	8.71	98.33

Date	Irrigação (mm)	Irrigação Acumulada (mm)
14/07/18	8.71	107.04
16/07/18	7.17	114.21
19/07/18	7.17	121.38
25/07/18	10.16	131.54
27/07/18	12.22	143.76
30/07/18	13.51	157.27
02/08/18	13.55	166.90
05/08/18	13.55	180.45
10/08/18	13.55	194.00
12/08/18	13.55	207.55

Date	Irrigação (mm)	Irrigação Acumulada (mm)
14/08/18	13.55	221.10
16/08/18	8.93	230.03
18/08/18	13.55	243.58
20/08/18	13.55	257.13
28/08/18	13.55	270.68

APÊNDICE C

Base de regras criadas para sistema *Fuzzy-VRI* desenvolvido. Foram desenvolvidas 192 regras.

Temperatura = Temperatura do Dossel; Umidade = Umidade próxima ao solo; Nitrogênio = Índice de Nitrogênio. (variáveis de entrada);

Velocidade = Velocidade de giro do pivô central; Válvulas = Abertura proporcional das válvulas solenoides. (variáveis de saída).

1.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
2.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
3.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
4.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
5.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = alta	E	Válvulas = pequena
6.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = alta	E	Válvulas = pequena
7.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = alta	E	Válvulas = pequena
8.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = alta	E	Válvulas = pequena
9.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = pequena
10.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = pequena
11.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = pequena
12.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = pequena
13.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = muito pequena
14.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = muito pequena
15.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = alta muito	E	Válvulas = muito pequena
16.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = muito baixo	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = alta	E	Válvulas = muito pequena
17.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
18.	SE	Temperatura = baixa	E	SAVI = baixo	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média

178.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
179.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
180.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = muito baixo	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
181.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
182.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
183.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
184.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = baixo	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
185.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
186.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
187.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
188.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = médio	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
189.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = muito baixo	ENTÃO	Velocidade = baixa	E	Válvulas = grande
190.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = baixo	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
191.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = médio	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média
192.	SE	Temperatura = alta	E	SAVI = alto	E	Umidade = alto	E	Nitrogênio = alto	ENTÃO	Velocidade = média	E	Válvulas = média