



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Lógica Nebulosa Dentro do Contexto da
Agricultura Familiar (Um Caso de Estudo)**

Vanessa de Deus de Mendonça

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

Brasília
2024

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

Lógica Nebulosa Dentro do Contexto da Agricultura Familiar (Um Caso de Estudo)

Vanessa de Deus de Mendonça

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos Quintero
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Mauricio Muñoz Arboleda

Brasília
2024

d769l de Deus de Mendonça, Vanessa .
Lógica Nebulosa Dentro do Contexto da Agricultura Familiar
(Um Caso de Estudo) / Vanessa de Deus de Mendonça; orientador Carlos Humberto Llanos Quintero; coorientador Daniel Mauricio Muñoz Arboleda. -- Brasília, 2024.
64 p.

Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Inteligência Artificial. 2. Agricultura 4.0. 3. Lógica Fuzzy. 4. Agricultura Familiar. I. Llanos Quintero, Carlos Humberto, orient. II. Muñoz Arboleda, Daniel Mauricio, coorient. III. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**Lógica Nebulosa Dentro do Contexto da Agricultura
Familiar (Um Caso de Estudo)**

Vanessa de Deus de Mendonça

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre

Trabalho aprovado. Brasília, 25 de novembro de 2024:

**Prof. Dr. Carlos Humberto Llanos
Quintero, UnB/FT/ENM**
Orientador

**Prof. Dr. Guillermo Alvarez Bestard,
UnB/FGA**
Examinador interno

**Dr. André Luiz Sordi Braga, Mercedes
Benz, Alemanha**
Examinador externo

**Prof. Dr. Sérgio Pertuz, Dresden
Technical University, Alemanha**
Examinador externo suplente

Brasília
2024

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que não desistiram ao longo da caminhada acadêmica.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, que me sustentou durante esta longa caminhada acadêmica. Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Carlos Llanos e Prof. Dr. Daniel Muñoz, por suas competências técnicas, orientações incansáveis e, acima de tudo, pela empatia e pelo apoio constante tanto a mim quanto à pesquisa aqui desenvolvida.

Meus agradecimentos também à minha mãe, Iva de Deus, que muitas vezes cuidou de mim, da minha casa e da minha filha para que eu pudesse continuar focada neste trabalho. Agradeço ao meu pai, Vander Mendonça, que escolheu investir na minha educação, em vez de tijolos, quando poderia ter construído uma bela casa. Por fim, agradeço a todos os meus colegas de turma, que se tornaram grandes amigos.

*“If you find that you’re spending almost all your time on theory,
start turning some attention to practical things;
it will improve your theories.
If you find that you’re spending almost all your time on practice,
start turning some attention to theoretical things;
it will improve your practice.”
(Donald Knuth)*

Resumo

A agricultura é a base econômica de muitas nações, garantindo a subsistência e o desenvolvimento de milhões de pessoas ao redor do mundo. Contudo, a agricultura familiar enfrenta grandes desafios em um cenário de rápido avanço tecnológico, que aumenta a disparidade entre grandes produtores e pequenos agricultores. Desse modo, os grandes produtores, com acesso a maquinário pesado, recursos financeiros e tecnologias avançadas de monitoramento e automação, se beneficiam dessas inovações, enquanto os pequenos agricultores, muitas vezes, permanecem excluídos desse progresso. Este trabalho busca abordar a exclusão tecnológica na agricultura familiar por meio do desenvolvimento de um sistema de monitoramento baseado em sensores de baixo custo e lógica nebulosa (*Fuzzy logic*). A proposta é oferecer uma solução tecnológica acessível e eficiente para que pequenos produtores possam monitorar a saúde de suas plantações de maneira precisa e autônoma. Utilizando sensores para coletar dados críticos sobre as condições do solo e do ambiente (umidade e pH do solo), o sistema fornece, através de um aplicativo para celular, informações essenciais para a tomada de decisões, contribuindo assim para aumentar a produtividade e sustentabilidade da agricultura familiar e preenchendo uma lacuna significativa nas pesquisas aplicadas voltadas para o desenvolvimento desses pequenos produtores. O processamento das variáveis de decisão é feito em uma plataforma de código aberto e de baixo custo, no qual foi embarcado um conjunto de regras e um sistema de inferência baseado em lógica Fuzzy, que tem em conta outras variáveis adicionais como cor, altura e diâmetro das plantas. Assim, o impacto desta linha de pesquisa no Brasil pode ser significativo, especialmente considerando que a agricultura familiar representa cerca de 77% dos estabelecimentos rurais do país e é responsável pela produção de grande parte dos alimentos consumidos internamente.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Agricultura 4.0. Lógica Fuzzy. Agricultura Familiar.

Abstract

Agriculture is the economic basis of many nations, ensuring the livelihood and development of millions worldwide. However, family farming faces major challenges amid rapid technological advancements, increasing the disparity between large producers and small farmers. Thus, large producers benefit from these innovations, having access to heavy machinery, financial resources, and advanced monitoring and automation technologies, while small farmers often remain excluded from this progress. In this context, this work seeks to address technological exclusion in family farming by developing an automated monitoring system based on sensors, microcontrollers, and fuzzy logic. The proposal is to offer an affordable and efficient technological solution so that small producers can monitor the health of their crops accurately and autonomously. Using sensors to collect critical data on soil and environmental conditions (soil moisture, pH, and luminosity), the system provides, through a mobile application, essential information for decision-making, thus contributing to increasing the productivity and sustainability of family farming and filling a significant gap in applied research aimed at the development of these small producers. The processing of decision variables is done on an open-source, low-cost electronic prototyping platform, in which a set of rules and an inference system based on fuzzy logic are embedded, taking into account additional variables such as color, height, and diameter of the plants. In this context, the impact of this research in Brazil could be highly significant, especially considering that family farming represents about 77% of rural establishments in the country and is responsible for producing a large part of the food consumed domestically.

Keywords: Artificial Intelligence. Agriculture 4.0. Fuzzy Logic. Family Farming.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Definição de sensação termica usando lógica nebulosa (Fonte: a autora)	23
Figura 2 – Lógica clássica x Lógica nebulosa (Fonte: <i>Foundations of Fuzzy Control</i>).	23
Figura 3 – Etapas do processo de inferência nebuloso (Fonte: a autora).	24
Figura 4 – Análise de palavras-chave realizada pelo VOSviewer e clusters (Fonte: a autora).	30
Figura 5 – Etapas de desenvolvimento do sistema Fuzzy (Fonte: a autora).	33
Figura 6 – Cenário 1: Plantação de milho com 38 dias.	34
Figura 7 – Sensoriamento usado na pesquisa em campo –modelo <i>three-way meter sensor</i> (Fonte: a autora).	35
Figura 8 – Definição de variáveis de entrada e saída (Fonte: a autora).	37
Figura 9 – Definição das funções de pertinência trapezoidais e triangulares usadas em no sistema Fuzzy. Na imagem a configuração “PF - Pouco Favorável” na cor vermelha.	39
Figura 10 – Cenário “Favorável”	42
Figura 11 – Cenário “Pouco Favorável”	42
Figura 12 – Cenário “Muito Favorável”	42
Figura 13 – Resultado das três telas no aplicativo “Horta Plus: Lógica Fuzzy” (Fonte: a autora)	42
Figura 14 – Bloco de programação com o <i>App Inventor</i> . “Horta Plus: Lógica Fuzzy” (Fonte: a autora).	43
Figura 15 – Cenário 2: plantação de milho com 100 dias. (Fonte: a autora).	43
Figura 16 – Cenário 2: saída XFUZZY <i>Favorável</i> (Fonte: a autora).	45
Figura 17 – Cenário 3: plantação de milho com 64 dias (Fonte: a autora).	45
Figura 18 – Cenário 3: Xfuzzy <i>Muito favorável</i> (Fonte: a autora).	47
Figura 19 – Cenário 4: plantação de milho com mais de 120 dias (Fonte: a autora).	47
Figura 20 – Cenário 4: saída Xfuzzy <i>Pouco Favorável</i> (Fonte: a autora).	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Trabalhos correlatos	28
Tabela 2 – Trabalhos correlatos - Milho	29
Tabela 3 – Leituras do sensor no Cenário 1: 38 dias - Umidade = 80%, pH=7.	35
Tabela 4 – Valores de entrada normalizados Cenário 1.	38
Tabela 5 – Construção da base de regras do subsistema Fuzzy <i>Global</i>	40
Tabela 6 – Construção da base de regras do sistema Fuzzy de saída - Tabela simplificada.	40
Tabela 7 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 2.	44
Tabela 8 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 2.	44
Tabela 9 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 3.	46
Tabela 10 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 3.	46
Tabela 11 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 4.	48
Tabela 12 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 4.	48
Tabela 13 – Resultados para os Cenários 1 e 3.	50
Tabela 14 – Resultados para os Cenários 2 e 4.	51
Tabela 15 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 1.	51
Tabela 16 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 2.	52
Tabela 17 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 3.	52
Tabela 18 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 4.	52
Tabela 19 – Comparação da inferência do sistema Fuzzy vs especialistas	52

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Hipóteses de Pesquisa	14
1.2	Justificativa da Pesquisa	14
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Contribuições do Trabalho	16
1.5	Organização do Documento	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Inteligência Artificial Aplicada no Agro 4.0	18
2.2	Agricultura Familiar e Tecnologias	20
2.3	Lógica Nebulosa Aplicada	21
2.3.1	<i>Definições Básicas</i>	21
2.3.2	<i>Aspectos Teóricos da Lógica Fuzzy</i>	23
2.3.2.1	Função de pertinência	24
2.3.2.2	Operadores em Lógica Fuzzy	26
2.4	Estado da Arte	27
2.5	Conclusões do Capítulo	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Modelo de Inferência Fuzzy Proposto	32
3.1.1	Definição das Áreas de Estudo	34
3.1.2	Características e Definições Sobre o Sensoriamento	34
3.1.3	Modelagem do Sistema de Inferência Fuzzy	36
3.1.3.1	Normalização dos Dados	36
3.1.3.2	Definição do Universo de Discurso e Funções de Pertinência	37
3.1.3.3	Construção da Base de Regras	39
3.2	Sistema Embarcado de Inferência	41
3.3	Metodologia de Validação	43
3.4	Conclusões do Capítulo	49
4	RESULTADOS	50
4.1	Resultados de Simulação	50
4.2	Resultados pelos Especialistas	51
4.3	Discussão dos Resultados	53

5	CONCLUSÕES	54
5.1	Trabalhos Futuros	55
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICES	61
	APÊNDICE A – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO	62
A.1	Implementação do Sistema Fuzzy na Ferramenta XFuzzy	62

1 Introdução

A agricultura é, historicamente, a base da economia de muitas nações, sendo responsável pela subsistência e desenvolvimento de milhões de pessoas ao redor do mundo. No entanto, a agricultura familiar enfrenta desafios significativos em um cenário onde a tecnologia avança rapidamente e amplia a diferença entre grandes produtores e pequenos agricultores (SCHNEIDER, F.; COSTA, 2016). Por um lado, os grandes produtores têm acesso a maquinário pesado, recursos financeiros e uma vasta gama de tecnologias de monitoramento e automação. Por outro lado, os agricultores familiares, que são essenciais para a segurança alimentar e para a economia de muitas regiões, possuem recursos limitados e pouca ou nenhuma tecnologia de ponta à disposição. Isso resulta em uma desvantagem competitiva e, em perdas frequentes de safras por falta de acompanhamento adequado (EMBRAPA, 2023).

A falta de tecnologias acessíveis é o principal obstáculo para a agricultura familiar. Pequenos agricultores dependem de métodos tradicionais de cultivo, que não oferecem as ferramentas necessárias para monitorar de forma precisa o estado de suas plantações (BRAZILIENSE, 2024). Sem sensores para medir umidade do solo, luminosidade ou sinais de pragas, e sem um sistema de alerta eficiente, os produtores muitas vezes perdem a oportunidade de intervir em momentos críticos. Problemas como falta de irrigação, deficiência de nutrientes e pragas só são identificados tarde demais, o que leva a perdas substanciais de safra.

Esta pesquisa busca por uma opção para amenizar o problema da exclusão tecnológica na agricultura familiar oferecendo uma solução acessível ao introduzir um sistema de monitoramento automatizado baseado em sensores de baixo custo e lógica Fuzzy (*fuzzy logic*). Neste contexto, a proposta deste trabalho é oferecer uma solução tecnológica acessível e eficiente para que pequenos produtores possam monitorar a saúde de suas plantações de maneira precisa e autônoma. Utilizando sensores para coletar dados críticos sobre as condições do solo e do ambiente (umidade e pH do solo), o sistema permite uma análise inteligente desses dados, oferecendo recomendações sobre o cenário geral do cultivo, diminuindo assim a necessidade de acompanhamento manual constante e prevenindo perdas (BUAINAIN; GARCIA; NORDER, 2014).

Através dessa integração tecnológica, a pesquisa visa reduzir a lacuna entre grandes e pequenos produtores, democratizando assim o acesso à inovação e proporcionando ferramentas que aumentem a eficiência da agricultura familiar (CAMPEROS REYES et al., 2020).

Assim, a pesquisa busca criar uma ponte entre a tecnologia e os pequenos agricultores,

oferecendo uma solução viável para o monitoramento e o manejo das safras, especialmente de culturas como o milho (MILHO, 2024).

1.1 Hipóteses de Pesquisa

No contexto deste trabalho, foram planteadas as seguintes hipóteses:

- A lógica Fuzzy integrada a sensores de baixo custo pode ser uma ferramenta apropriada dentro da agricultura familiar para estimar a saúde de plantações de milho.
- O monitoramento de plantações de milho através de sensores de baixo custo pode ser uma ferramenta capaz de informar ao produtor rural os momentos em que a área necessita de intervenção.

1.2 Justificativa da Pesquisa

Resolver o problema da disparidade tecnológica entre grandes produtores e a agricultura familiar no Distrito Federal é crucial para promover uma agricultura mais atrativa (RADCLIFFE; FINNERAN, 2019). A região conta com aproximadamente 70% de sua área dedicada à produção agrícola, um dado surpreendente e muito promissor. Contudo, esse potencial ainda não é completamente explorado devido à falta de acesso a tecnologias avançadas por parte dos pequenos agricultores. Apenas 20% da área é considerada como parte da Agricultura 4.0, enquanto o restante, composto em grande parte pela agricultura familiar, enfrenta limitações tecnológicas significativas (BRASIL, 2023).

A característica da população agrícola também está em transição. No passado, as famílias viviam exclusivamente do campo, mas hoje muitos novos agricultores dedicam-se parcialmente ao trabalho rural devido a outras demandas, como estudos, venda de produtos e participação em feiras (KOWALSKI; JANIK, 2020). No Distrito Federal e seu entorno, o perfil do agricultor mudou, com muitas pessoas jovens buscando investir na produção. Antigamente, algumas comunidades sequer tinham acesso à energia elétrica, mas atualmente, até os interiores já possuem eletricidade e internet. No entanto, embora os agricultores mais antigos tenham o conhecimento necessário para manejar plantações de médio porte, os novos produtores enfrentam dificuldades para conciliar as demandas da vida moderna com as exigências da agricultura (DE SOUZA; DE OLIVEIRA, 2020). Ainda assim, a agricultura familiar representa a maioria dos estabelecimentos agropecuários no Brasil (GRISA; SCHNEIDER, S., 2017). Dos 5.073.324 estabelecimentos existentes, 3.897.408 foram classificados como pertencentes a essa categoria, o que corresponde a 76,8% do total. Esses dados destacam a relevância da agricultura familiar no cenário agropecuário nacional, sendo responsável por uma significativa parcela das propriedades rurais e exercendo um papel fundamental na

produção de alimentos e no sustento de milhões de famílias no país ([INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA \(IBGE\), 2017](#)). Assim, implementar um sistema de monitoramento inteligente, baseado em sensores IoT e lógica Fuzzy, pode diminuir a lacuna tecnológica e tornar a agricultura de precisão mais acessível a todos os agricultores, independentemente de sua escala de operação ([ROSINI; SILVA, R., 2021](#)).

Os possíveis impactos desta pesquisa são:

- **Aumento da Produtividade e Eficiência:** Acesso a sistemas de monitoramento automatizado pode permitir que os pequenos agricultores tomem decisões mais assertiva ([ALMEIDA, 2018](#)).
- **Redução de Custos e Desperdícios:** A tecnologia proposta, baseada em sensores de baixo custo, possibilita o uso mais preciso de insumos, reduzindo custos operacionais e desperdícios, essenciais para agricultores familiares que operam com margens de lucro estreitas ([BARBOSA; MARTINS, 2023](#)).
- **Inclusão Tecnológica e Diminuição da Desigualdade:** A introdução de soluções tecnológicas acessíveis pode diminuir a exclusão tecnológica dos pequenos agricultores, promovendo a inclusão digital no campo e equiparando as condições de competição entre pequenos e grandes produtores ([MAGALHÃES; VENDRAMINI, 2018](#)).
- **Segurança Alimentar:** Ao fortalecer a agricultura familiar de forma automatizada, o resultado pode impactar diretamente a segurança alimentar ([PEREIRA NETO, 2023](#)), uma vez que o produtor rural nem sempre conta com esta infraestrutura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo fornecer um sistema de monitoramento inteligente através de sensores de baixo custo e da lógica Fuzzy e, a partir dos dados coletados, apresentar o estado saúde da plantação de milho ao produtor rural.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definição de um modelo Fuzzy, incluindo sensores, entradas e saídas necessárias para avaliar a saúde de uma plantação de milho.
- Implementar o modelo de lógica Fuzzy proposto utilizando conhecimento de especialistas na cultura do milho para desenvolver a base de regras.

- Estruturar um aplicativo com um interface amigável para acompanhamento pelo produtor rural.

1.4 Contribuições do Trabalho

Embora o Agro 4.0 tenha avançado significativamente, ainda há uma disparidade no acesso às tecnologias de ponta pelos produtores rurais. A agricultura familiar enfrenta limitações em integrar tecnologias modernas em suas propriedades, e essa estagnação tecnológica impacta negativamente todo o sistema. Entre os efeitos estão a dependência de suporte presencial, a falta de informações sobre o plantio e a demora em realizar intervenções corretivas, sejam de rotina ou emergenciais, além de acarretar prejuízos econômicos para os produtores (NIBIR et al., 2023).

A utilização da tecnologia de monitoramento utilizando lógica Fuzzy poderia permitir a intervenção do cultivo na hora certa e na área adequada, reduzindo o gasto de recursos e favorecendo o cenário de produtividade, pois a tomada de decisão gera celeridade no acompanhamento da saúde da área do plantio, neste contexto, as principais contribuições deste trabalho são: (i) um sistema Fuzzy para estimação da saúde de uma plantação de milho usando um indicador sobre os nutrientes, a média da cor e a média da área das plantas, (ii) testes em *Cenários* reais foram conduzidos para validar as estimativas do sistema Fuzzy comparando-as com a estimativa de um especialista na cultura do milho, conforme pode ser visto no artigo apresentado na Conferência Latinoamericana de Inteligência Computacional (IEEE LA-CCI 2024) (MENDONÇA et al., 2024).

1.5 Organização do Documento

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte, a fundamentação teórica e aborda conceitos essenciais como inteligência artificial, agricultura familiar e lógica Fuzzy. Esses fundamentos são cruciais para entender o contexto e as bases tecnológicas que sustentam a pesquisa.

No Capítulo 3, detalha-se o desenvolvimento da metodologia, que inclui a descrição da área de estudo, o processo de sensoriamento e os modelos de validação. Este capítulo é fundamental para compreender como a pesquisa foi conduzida e os métodos empregados para coletar e analisar os dados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, divididos em duas partes principais: simulações e experimentos práticos. Essa divisão permite uma análise clara e comparativa entre os dados simulados e os resultados experimentais, oferecendo uma visão abrangente sobre a eficácia e a aplicação prática das tecnologias estudadas.

Finalmente, no Capítulo 5, discutimos as conclusões do estudo e sugerimos direções para trabalhos futuros. Este capítulo sintetiza as descobertas da pesquisa, destacando

suas contribuições para o campo de estudo e propondo possíveis caminhos para pesquisas subsequentes.

2 Fundamentação Teórica

Inúmeros trabalhos têm sido realizados na junção de grandes áreas como agricultura 4.0 e Inteligência Artificial (I.A.); isto depende da aplicação, da técnica, da tecnologia ou de outros fatores, conforme pode ser visto na Tabela 1. Por isso, neste capítulo, é apresentada uma revisão sobre os temas norteadores, bem como todo o seu referencial teórico.

2.1 Inteligência Artificial Aplicada no Agro 4.0

Apesar de ser um termo bem difundido, a história da I.A. não é tão nova; porém, ganhou uma base mais concreta com Alan Turing e sua publicação seminal "Computing Machinery and Intelligence", em 1950, onde propôs o Teste de Turing para avaliar a inteligência de máquinas (CREVIER, 1993). Então, entre acessões e invernos, a I.A. foi tomando forma. Em 1956, os primeiros programas de I.A., como o *Logic Theorist* de Allen Newell e Herbert Simon, mostraram a viabilidade de máquinas resolverem problemas complexos (MCCARTHY et al., 2006). Após um período de grandes expectativas e progresso, durante a primeira era de ouro (1956-1974), a I.A. enfrentou seu primeiro "inverno" (1974-1980), com frustrações devido ao progresso mais lento do que o esperado e limitações tecnológicas (NILSSON, 1998). Porém, nos anos 80, o ressurgimento veio com os chamados sistemas especialistas; entretanto, um novo inverno da I.A. ocorreu no final da década. Mesmo assim, as pesquisas não pararam completamente, de forma que a era moderna da I.A. começou nos anos 90, impulsionada por avanços em poder computacional e técnicas de aprendizado profundo, levando a aplicações práticas em diversas áreas, desde reconhecimento de voz e imagem até carros autônomos e aplicações domésticas e no setor agrícola (RUSSELL; NORVIG, 2020).

Assim, de forma mais conceitual, a (i) Inteligência Artificial refere-se ao campo da ciência da computação que se concentra na criação de sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente requerem inteligência humana. Isso inclui o reconhecimento de fala, tomada de decisões, resolução de problemas, aprendizado e interpretação de dados sensoriais (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016); (ii) a inteligência artificial tem sido amplamente aplicada em diversos campos, como TVs inteligentes, robôs de varredura e assistentes de voz, provocando grandes mudanças na sociedade. Além disso, a integração da IA com a tecnologia de redes de computadores está sendo explorada para melhorar a precisão e a eficiência do processamento de dados (XIAOHUA, 2023); de acordo com (COSTA BORBA et al., 2022), a Inteligência Artificial é subcategorizada em áreas como:

- Aprendizado de máquina *ML - Machine-Learning*;

- Visão computacional;
- Robótica;
- Processamento de Linguagem Natural *NLP - Natural Language Processing*;
- sistemas especialistas;
- Comunicação, através de um conversor de fala em texto, e texto em fala;

Desta forma, a Inteligência Artificial tem diversas aplicações integradas à Internet das Coisas (IoT), e de acordo com (MUHAMMED et al., 2024), pode ser dividida em duas categorias: (a) *urbanas* (saúde, construções, segurança, negócios, escritórios, transporte) e (b) *não urbanas* (indústrias, redes e agricultura). Olhando para o contexto de contribuição sustentável, a IA tem um grande potencial dentro da Agricultura 4.0, a fim de propor benefícios ao planeta, melhorando o gerenciamento agrícola com monitoramento de solo, clima, colheita e temperatura, levando ao gerenciamento de água, colheita, energia e sistemas de irrigação automatizada (MUHAMMED et al., 2024).

No contexto mais histórico, a evolução agrícola pode ser dividida em quatro fases principais: (i) *Agricultura 1.0* que começou com ferramentas rudimentares usadas por comunidades indígenas, focadas na subsistência; (ii) *Agricultura 2.0* que introduziu a mecanização com fertilizantes, pesticidas e tratores, aumentando a produtividade e a escala de produção; (iii) *Agricultura 3.0* que incorporou a tecnologia da informação e a automação, com sensores e sistemas de apoio à decisão ajudando na gestão eficiente dos recursos agrícolas, e (iv) *Agricultura 4.0*, ou agricultura inteligente, que utiliza tecnologias avançadas como IoT, Inteligência Artificial, Big Data e Robótica. Estas inovações permitem o monitoramento em tempo real e a gestão precisa das operações agrícolas, promovendo sustentabilidade e maior produtividade (LIU, Y. et al., 2020).

Ainda sobre a *Agricultura 4.0*, pode-se citar o Aprendizado de Máquina (ML), que suportam a automação, além da Tecnologia de Ledger Distribuído (DLT), que garante a integridade e a segurança dos dados. Após estudar diversas arquiteturas, pôde ser observada uma estrutura de agricultura inteligente baseada na localização do processamento de dados, que pode ser dividida de acordo com os desafios futuros da agricultura inteligente em duas categorias: (i) *Tecnológico*: inclui IA, ML, blockchain como DLT e segurança de hardware baseada em funções físicas não clonáveis (PUF) e (ii) *Rede*: abordando problemas como ataques cibernéticos, injeção de dados falsos e ameaças similares (MITRA et al., 2022).

As disparidades tecnológicas existentes na agricultura não são recentes. Já na década de 1970, a heterogeneidade tecnológica entre estabelecimentos agropecuários era vista com preocupação, seja por motivos de investimentos financeiros ou mesmo por conhecimentos especializados na área tecnológica (PINTO, 2000). Na visão de Nibir et al:

O ritmo de estagnação tecnológica do produtor acarreta problemas em todo o sistema, gerando impactos negativos na necessidade de suporte presencial, na ausência de dados do plantio e tornando mais lento uma intervenção corretiva, seja ela de rotina ou de urgência, além de gerar impactos econômicos negativos para o produtor (NIBIR et al., 2023).

Com o potencial de diminuir essa distância entre pequenos produtores e a grande indústria, a era da *Internet das Coisas* (IoT), refere-se a um conjunto de objetos interconectados que coletam e transmitem dados pela internet sem a necessidade de interação humana. Na agricultura inteligente, a IoT utiliza sensores, câmeras e outros dispositivos para coletar e analisar dados, criando um ambiente integrado com dispositivos conectados à internet. Esses dispositivos IoT são essenciais para a agricultura inteligente, reduzindo os custos de implementação e, adicionalmente, podem ser desenvolvidos dentro do contexto da agricultura familiar (JARARWEH et al., 2023).

2.2 Agricultura Familiar e Tecnologias

A agricultura familiar é um modelo de produção agrícola no qual a gestão e a operação das atividades agropecuárias são conduzidas principalmente por membros de uma família. Esse tipo de agricultura é caracterizado por uma forte ligação entre a produção agrícola e o sustento da família, onde a propriedade da terra é, em geral, de pequena escala, e os recursos são limitados, apresentando uma grande diversidade de culturas e rotatividade no solo (SCHNEIDER, S., 2003).

De acordo com a EMBRAPA, são considerados agricultores familiares os pequenos produtores rurais, assentados da reforma agrária, silvicultores, aquicultores, extrativistas e pescadores. No Brasil, a agricultura familiar desempenha um papel crucial na produção de alimentos. De acordo com dados do Censo Agropecuário, 84% dos estabelecimentos agropecuários no Brasil são de agricultores familiares, que respondem por mais de 70% dos alimentos consumidos pela população, incluindo produtos como mandioca, feijão, milho, leite e carne suína, correspondendo a um pilar para a manutenção do emprego e da economia local em diversas regiões do país (EMBRAPA, 2023).

Atualmente, as principais máquinas agrícolas utilizadas são de fontes compartilhadas, como associações, empréstimos de máquinas por programas do governo e/ou pagas por hora de uso para o período específico de plantação. Destacam-se máquinas e tratores de pequeno e médio porte e implementos (PROGRAMA..., 2024)

- *Arados e Grade Aradora*: Usados para preparar o solo para o plantio; esses implementos são essenciais para a agricultura familiar que ainda utiliza métodos tradicionais de cultivo.

- *Semeadoras e Plantadeiras*: Essas máquinas são usadas para o plantio de sementes em fileiras e são ajustadas para trabalhar em pequenas áreas. Modelos específicos para pequenas propriedades são projetados para eficiência em terrenos menores.
- *Pulverizadores*: Usados para a aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes. Pulverizadores costais manuais ou montados em pequenos tratores são comuns em propriedades familiares.
- *Mini Colheitadeiras*: Adequadas para pequenas propriedades, essas colheitadeiras são utilizadas para a colheita de grãos como milho e trigo. Elas são mais acessíveis e possuem a capacidade de operar em terrenos menores e mais acidentados.
- *Sistemas de Irrigação por Gotejamento e Aspersão*: Importantes para a agricultura familiar, pois permitem a irrigação eficiente das culturas, economizando água e aumentando a produtividade.
- *Motores Estacionários*: Utilizados para acionar diferentes equipamentos, como bombas de irrigação, trituradores, e pequenos geradores.
- *Motosserras e Roçadeiras*: Usadas para o manejo de árvores e corte de lenha e para o controle de ervas daninhas e limpeza de áreas de plantio respectivamente.

2.3 Lógica Nebulosa Aplicada

2.3.1 Definições Básicas

A lógica nebulosa complementa as técnicas de IA no Agro 4.0, proporcionando uma abordagem mais flexível e adaptativa para enfrentar os desafios da agricultura, por se tratar de um ambiente tão variável e incerto.

Um conjunto Fuzzy é uma classe de objetos com um contínuo de graus de pertinência. Tal conjunto é caracterizado por uma *função de pertinência* (ou *função característica*) que atribui a cada objeto um grau de pertinência que varia entre zero e um. As noções de inclusão, união, interseção, complemento, relação, convexidade, etc., são estendidas a tais conjuntos, e várias propriedades dessas noções no contexto de conjuntos Fuzzy são estabelecidas. Em particular, um teorema de separação para conjuntos Fuzzy convexos é provado sem exigir que os conjuntos Fuzzy sejam disjuntos. (ZADEH, 1965)

Os conjuntos Fuzzy têm um grau de pertencimento, o que significa que um elemento não está simplesmente dentro ou fora de um conjunto de maneira binária (sim ou não), como em conjuntos clássicos, mas sim que ele pertence ao conjunto com um certo grau de certeza ou intensidade. Esse grau de pertencimento é uma medida quantitativa que varia

entre 0 e 1, indicando o quão fortemente o elemento pertence ao conjunto (ZIMMERMANN, 2011).

Assim, baseado nesta flexibilidade do *universo de discurso* e conjuntos disjuntos, a utilização da lógica nebulosa ganha um nicho de aplicações bem variado, conforme exemplos, sendo separado em dois grandes grupos:

- **Grupo 1:** Dentro da agricultura: (a) aplicações desenvolvidas para controlar a quantidade de fertilizantes que devem ser aplicados no solo, após um estudo sobre os fatores de nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) (NPK) (MADHUMATHI; ARUMUGANATHAN; SHRUTHI, 2022); (b) aplicações desenvolvidas para a integração de inteligência artificial com Redes de Sensores e Atuadores Sem Fio para controle climático em estufas, destacando o uso de lógica Fuzzy a fim de melhorar a eficiência energética, reduzindo de forma autônoma o controle do clima dentro da estufa, gerando um sistema mais eficaz na agricultura (SABRI et al., 2012); (c) aplicações desenvolvidas para um modelo de classificação multi-classe que ajuda os agricultores a tomar decisões sobre o cultivo de culturas em terrenos agrícolas específicos. Esta abordagem é usada para gerar regras de classificação para cinco culturas: arroz, amendoim, cana-de-açúcar, cumbu e ragi (um tipo de milho pequeno) (DEEPA; GANESAN, 2019).
- **Grupo 2:** Fora da agricultura: uma aplicação na indústria. Por exemplo, um artigo que estuda métodos para a fabricação do pão de forma propõe um estudo para evitar desperdício, controlando as dosagens dos ingredientes baseado nos fatores de conhecimento da fabricação (CAVALCANTI et al., 2013).

Desta forma, a lógica nebulosa ou *Fuzzy Logic* tenta aproximar a computação a forma como um ser humano raciocina. A Figura 1 mostra como as pessoas costumam definir a sensação térmica através de variáveis linguísticas do tipo *quente*, *pouco quente*, *morno*, *frio*, etc. (MAMDANI, 1977). Desta maneira, não necessariamente pode-se dizer que está totalmente *quente*, assumindo o valor lógico 1, ou totalmente *frio*, assumindo o valor lógico 0; ou seja, a saída não precisa ser puramente booleana (ROSS, 1995).

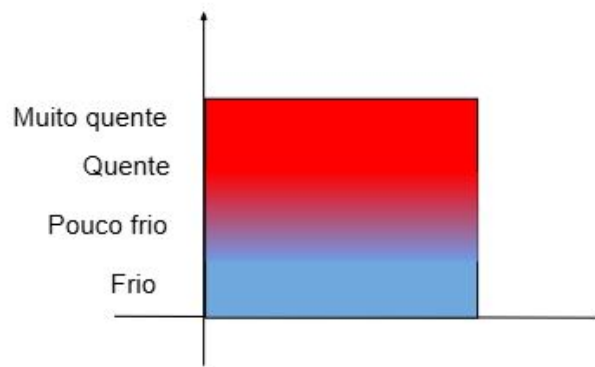


Figura 1 – Definição de sensação termica usando lógica nebulosa (Fonte: a autora)

Matematicamente, ao considerar a premissa: “está quente hoje”, sendo o valor 1 verdadeiro e o valor 0 falso, na lógica clássica, a veracidade pertence ao conjunto 0,1. Já na lógica nebulosa, a veracidade pode ser parcialmente verdadeira com o valor 0.7 e parcialmente falsa com o valor 0.3; assim, a veracidade pertence ao intervalo $[0.0, 1.0]$, conforme Figura 2:

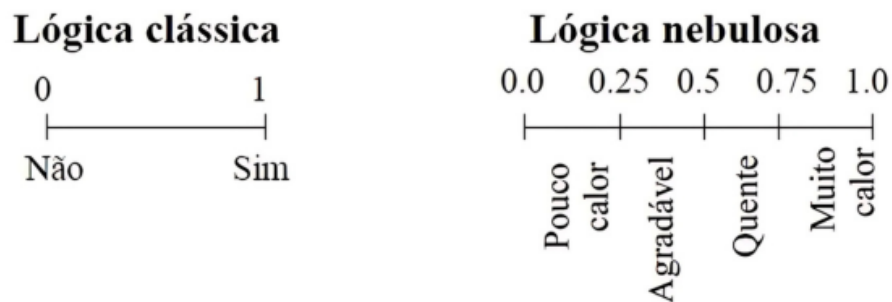


Figura 2 – Lógica clássica x Lógica nebulosa (Fonte: *Foundations of Fuzzy Control*).

2.3.2 Aspectos Teóricos da Lógica Fuzzy

O processo de inferência é o processo de dedução de uma saída Fuzzy a partir de entradas Fuzzy utilizando uma base de regras (GUDWIN, R.; MAEDA, 2014). O sistema de inferência pode ser dividido em seis etapas principais Figura 3:

- *Pré-processamento*: ajusta os sinais de entrada antes de introduzi-los no sistema de inferência. Comumente, as entradas de um sistema nebuloso são normalizadas;
- *Fuzzificação*: converte a magnitude do sinal em uma variável Fuzzy, obtendo o valor de pertinência em cada um dos valores linguísticos;
- *Base de regras*: conjunto de regras linguísticas IF-THEN-ELSE que definem como o sistema é controlado em função do valor Fuzzy das entradas;
- *Método de inferência*: algoritmo que será usado pelo computador para inferir uma conclusão a partir das premissas. Existem dois métodos principais de inferência Fuzzy:

a) Mamdani, mais comum e usado em controle Fuzzy, e **b) Sugeno**, mais utilizado para modelagem matemática. A saída Fuzzy é obtida aplicando os operadores Fuzzy (AND, OR, NOT) às premissas das regras;

- *Defuzzificação*: converte o conjunto nebuloso resultante da inferência em uma quantidade numérica para estimar uma grandeza ou gerar um sinal de controle, transformando o conjunto Fuzzy resultante em uma saída *crisp*. Nesta pesquisa foi utilizada o método **fuzzyMean**, onde é calculada a média ponderada dos pontos centrais dos conjuntos fuzzy ativados, considerando os valores de pertinência em toda a área, incluindo as extremidades inferiores e superiores, fator importante para os ajustes finos de resultados nos valores das saídas configuradas, sua função é dada pela Equação 2.1.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (2.1)$$

- *Pós-processamento*: acondiciona a estimativa ou o sinal de controle para posterior manipulação no restante do sistema.

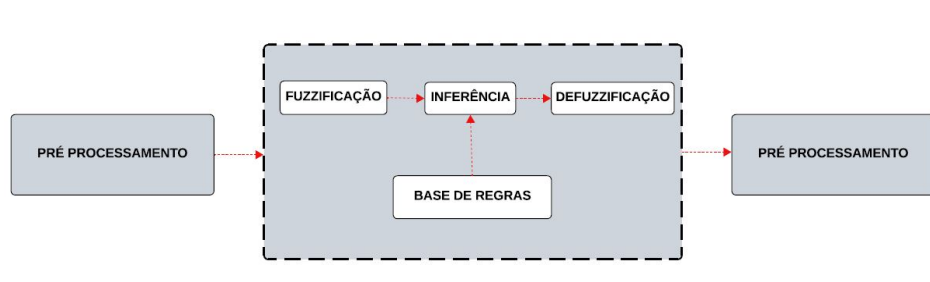


Figura 3 – Etapas do processo de inferência nebuloso (Fonte: a autora).

Além do conceito de pertinência em conjuntos Fuzzy, para o entendimento da lógica Fuzzy também é necessário apresentar noções sobre função de pertinência, operadores Fuzzy e sistema de inferência (SANDRI; CORREA, s.d.), (ZADEH, 1965), (GEHRKE; WALKER, C. L.; WALKER, E. A., 2003), (GOMIDE; GUDWIN, R. R., 1994), (MARRO et al., 2000), (KELLER; RAKHMATOV, 2023).

2.3.2.1 Função de pertinência

A função de pertinência define o grau de pertencimento de um elemento a um conjunto Fuzzy. Matematicamente, uma função de pertinência $\mu_A(x)$ de um conjunto Fuzzy A em um universo X é definida como:

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad (2.2)$$

onde $\mu_A(x)$ indica o grau de pertinência do elemento x no conjunto Fuzzy A , x é um elemento do universo X e $\mu_A(x)$ é o grau de pertencimento de x ao conjunto A . Neste contexto, podemos citar algumas funções de pertinência amplamente usadas no contexto da lógica Fuzzy, as quais são escolhidas com base na aplicação e na necessidade de modelar o comportamento desejado.

- *Função Triangular*: É definida por três pontos e tem a forma de um triângulo. Ela aumenta linearmente até um ponto central e depois diminui. A função triangular é definida por três parâmetros: a , b e c , onde a é o ponto inicial, b é o ponto de pico e c é o ponto final, conforme apresentado na Equação 2.3.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.3)$$

- *Função Trapezoidal*: Semelhante à triangular, mas com um topo, é definida por quatro parâmetros: a , b , c e d . Os pontos a e d representam onde a função começa e termina, e os pontos b e c definem o topo da função, conforme mostrado pela Equação 2.4. Ela cresce até um valor máximo e se mantém constante antes de diminuir. É usada para representar conceitos que têm uma faixa de valores mais ampla.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \text{ ou } x \geq d, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b, \\ 1, & \text{se } b < x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{se } c < x \leq d. \end{cases} \quad (2.4)$$

- *Função Gaussiana*: Baseada na curva gaussiana (ou curva em forma de sino), é uma função suave que representa bem os conceitos que variam gradualmente, com transições mais naturais. É definida por dois parâmetros: c (centro) e σ (largura da curva), conforme a Equação 2.5, onde c representa o ponto central da curva e σ controla a largura da curva.

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.5)$$

- *Função Sigmoidal*: É uma curva em forma de “S” e é útil para representar valores que crescem rapidamente a partir de um ponto inicial. Ela pode ser assimétrica, adaptando-se bem a situações de transição suave de um estado a outro de forma gradual. Sua

função é definida por dois parâmetros: a (inclinação) e c (ponto central), conforme ilustrado pela Equação 2.6.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (2.6)$$

- *Função em Forma de Sino (Generalized Bell)*: Similar à função gaussiana, mas com um topo achatado e mais flexível, permite controlar a largura e a inclinação. É bastante usada para representar intervalos com maior precisão. Sua função é definida por três parâmetros: a (controle da largura), b (controla a inclinação) e c (centro) (vide Equação 2.7).

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}} \quad (2.7)$$

2.3.2.2 Operadores em Lógica Fuzzy

Os operadores em lógica nebulosa são ferramentas usadas para combinar conjuntos *Fuzzy* e gerar inferências com base nas entradas e regras definidas no sistema. Esses operadores ajudam a descrever relacionamentos entre variáveis Fuzzy e a processar valores de pertinência (ou graus de associação) para estimar uma saída Fuzzy. Os três principais operadores são:

- *Operador AND (Conjunção)*: Este operador é usado para combinar dois conjuntos Fuzzy e calcular a interseção entre eles, representando um “E” lógico. A operação AND é aplicada para determinar o grau de pertencimento na conjunção de duas variáveis, ou seja, onde ambos os conjuntos compartilham uma área comum. Sua função é dada pela Equação 2.8, que indica que a pertinência do elemento x na interseção de dois conjuntos Fuzzy A e B é o menor valor de pertinência entre os dois conjuntos:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.8)$$

- *Operador OR (Disjunção)*: Este operador é usado para combinar dois conjuntos Fuzzy e calcular a união entre eles, representando um “OU” lógico. A operação OR é aplicada para definir a área onde pelo menos uma das variáveis possui um valor significativo de pertinência. Na prática, ela indica quando qualquer uma das condições pode satisfazer o critério da regra Fuzzy. Sua função é dada pela Equação 2.9, que indica que a pertinência do elemento x na união de dois conjuntos Fuzzy A e B é o maior valor de pertinência entre eles:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2.9)$$

- *Operador NOT (Negação)*: Este operador representa o complemento Fuzzy de um conjunto, invertendo o grau de pertinência de um conjunto Fuzzy, de forma semelhante a um “Não” lógico. Ele é usado para definir o oposto de uma determinada condição Fuzzy. O operador NOT é dado pela fórmula:

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.10)$$

2.4 Estado da Arte

A inteligência artificial está presente em quase todas as esferas do cotidiano. Dessa forma, a agricultura não seria diferente, pois com o uso das tecnologias IoT, sensoriamento e automação, o avanço tecnológico apresenta sistemas agrícolas cada vez mais consolidados. De forma mais ampla, destacam-se: (a) controle de irrigação inteligente, monitoramento de condições ambientais, (b) gestão de nutrientes no solo e na hidroponia, (c) automação de máquinas agrícolas, entre outros, conforme as pesquisas abaixo:

Na referência (SILVA, J.; SANTOS; PEREIRA, 2019), aborda um sistema de irrigação inteligente para o uso de três sensores (umidade do solo, temperatura e umidade relativa do ar), que fornecem dados ao microcontrolador Arduino. Este processa as informações utilizando um algoritmo Fuzzy para decidir quando e quanto liberar de água, evitando desperdícios.

Na referência (ZHANG; LIU, M.; CHEN, 2021), trata sobre o monitoramento do solo. Este outro artigo propõe um controlador baseado em lógica Fuzzy para a gestão de nutrientes no solo. O próprio sistema monitora a composição do solo por meio de sensores e ajusta a aplicação de fertilizantes em tempo real. Nesse caso, foi utilizado o microcontrolador ESP8266.

Na referência (LOPEZ; MARTINEZ; RODRIGUEZ, 2020), aborda um sistema de monitoramento que ajusta automaticamente as condições ambientais dentro de estufas, utilizando lógica Fuzzy. O sistema regula a temperatura, umidade e níveis de CO₂ para manter um ambiente ideal para o crescimento das plantas; para isso, foram usados um Raspberry Pi integrado a sensores IoT.

Na referência (HERMAN; SURANTHA, 2020), trata sobre a aplicação na hidroponia, com o objetivo de manter o pH controlado entre 5,5 e 7,0 foram instalados sensores de pH da água, sensor de umidade do ar DHT11, sensor de nível da água, ESP8266, sensor de condutividade de líquidos (EC), além de relé, motor servo e outros atuadores, todos conectados à internet. De acordo com o trabalho realizado, a implementação acelerou o crescimento das plantas, pois elas não ficaram sem os nutrientes necessários durante o período de observação, ao contrário das plantas sem controle, usadas para comparação no mesmo período.

Na referência (KUMAR; SINGH; SHARMA, 2018), aborda a aplicação de forma mais integrada às máquinas agrícolas de grande porte, com a automação de tratores e outros equipamentos utilizando lógica Fuzzy para navegação e operação em campo. Através de sensores de proximidade, câmeras e dispositivos GPS, os dados são fornecidos em tempo real para o microcontrolador, que utiliza essas informações para tomar decisões operacionais mais assertivas.

Com o objetivo de aprimorar as contribuições desta pesquisa, a Tabela 1 foi construída para visualizar os trabalhos correlatos, apontando as técnicas empregadas e indicando se foi aplicado o sistema nebuloso (lógica *Fuzzy*). Na Tabela 2, são apresentados os trabalhos científicos que aplicaram a lógica Fuzzy na cultura do milho.

Tabela 1 – Trabalhos correlatos da aplicação de I.A. em agricultura.

Ano	Autores	Técnicas	Fuzzy	Aplicação
1965	Kumar	Lógica Fuzzy	Sim	Agricultura e automação de máquinas agrícolas
2012	Sabri	Integração de IA e Redes de Sensores em Estufas	Sim	Agricultura - controle climático em estufas
2019	Deepa	Classificação Multi-classe na Agricultura	Sim	Agricultura
2019	Silva	Lógica Fuzzy, Microcontrolador Arduino	Sim	Agricultura - irrigação inteligente
2020	Liu	Agricultura 4.0	Não	Agricultura
2020	Lopez	Lógica Fuzzy, IoT, Microcontrolador Raspberry Pi	Sim	Agricultura - controle de ambiente em estufas
2021	Zhang	Lógica Fuzzy, Microcontrolador ESP8266	Sim	Agricultura - gestão de solo
2022	Mitra	IA, ML, Blockchain, Indústria 4.0	Não	Agricultura
2022	R. Madhumathi et al.	Análise da saúde do solo em relação a NPK e recomendação de fertilizantes em um sistema automatizado	Sim	Agricultura - gestão de solo
2023	Jararweh	Aplicação da IoT para coleta e análise de dados	Não	Agricultura familiar
2024	Muhammed	IoT e IA	Sim	Agricultura

Fonte: Dados dos autores

Tabela 2 – Trabalhos correlatos da aplicação da lógica Fuzzy na cultura do milho.

Ano	Autores	Técnicas	Fuzzy	Aplicação
2011	Bouroubi et al.	Controle da dosagem de fertilizantes em milho usando lógica Fuzzy	Sim	Agricultura (milho)
2017	Salvacion	Exploração das limitações climáticas na produção de milho nas Filipinas usando lógica Fuzzy	Sim	Agricultura (milho)
2019	M. Licínio	Investigação das características do milho usando técnicas de análise de imagem na agricultura	Não	Agricultura (milho)
2023	H. Sharifnasab et al.	Uso de sistemas de irrigação inteligentes baseados em IoT para a irrigação de milho	Sim	Agricultura (milho)
2024	I. Oktavianti et al.	Monitoramento em tempo real de terras agrícolas de milho usando IoT	Sim	Agricultura (milho)
2024	V. Mendonça (este trabalho).	Avaliação da saúde da plantação por I.A. e Aplicativo móvel (APP)	Sim	Agricultura (milho)

Fonte: Dados dos autores

Além da construção da tabela tradicional, utilizou-se o software VOSviewer (ECK; WALTMAN, 2023) para buscar artigos e trabalhos relacionados, utilizando visualizações em mapas de citações, coautoria, cocitação e palavras-chave. Essa ferramenta integra técnicas de mineração de texto e processamento de linguagem natural, utilizando o Apache OpenNLP, permitindo a extração de palavras-chave a partir de metadados como título, resumo e lista de palavras-chave das publicações científicas. A análise de conexões entre palavras-chave é determinada pela coocorrência nas mesmas publicações, resultando em *clusters* que representam áreas de pesquisa interligadas.

Na Figura 4, foram formados três grandes *clusters*, correspondendo a temas centrais como *lógica Fuzzy*, inteligência artificial e agricultura inteligente. Esses *clusters* indicam agrupamentos de termos com alta frequência de coocorrência, mostrando como os conceitos estão interligados nas publicações analisadas. Além desses grandes grupos, outros *clusters* menores emergiram, refletindo subáreas de pesquisa e tópicos específicos que complementam as discussões principais.

A revisão da literatura mostrou duas tendências de aplicação: uma voltada ao uso da lógica nebulosa na agricultura e outra abrangendo diversas áreas fora do contexto agrícola, conforme as Tabelas 1 e 2. Além disso, a compreensão das funções de pertinência e dos operadores lógicos é essencial na modelagem de uma solução que permita inferir a saúde de uma plantação de milho. Essa modelagem será apresentado no próximo Capítulo.

3 Metodologia

Este capítulo descreve as etapas metodológicas seguidas no desenvolvimento da pesquisa. O modelo de inferência Fuzzy proposto é detalhado, incluindo a definição da área de estudo e a normalização dos dados coletados. Também são abordadas a definição do universo de discurso e a construção da base de regras no software Xfuzzy para análise das condições da plantação.

3.1 Modelo de Inferência Fuzzy Proposto

O estudo de caso foi realizado na cultura do milho, mas pode ser aplicado em várias culturas desse segmento. Esta pesquisa foi desenvolvida em três níveis, a saber: (i) *Nível 1: Sensoriamento* – definição da área a ser monitorada e coleta de amostras qualitativas com sensores *in loco* para obtenção de dados sobre umidade e pH do solo da plantação de milho e dados referentes a altura e diâmetro do colmo e cor das folhas; (ii) *Nível 2: Lógica Fuzzy* – entrada dos dados no sistema de automação inteligente utilizando lógica Fuzzy através do *software* Xfuzzy, o qual se caracteriza por ser gratuito, open source, de fácil uso, além de permitir a síntese de sistemas Fuzzy em linguagem Java, C/C++, C embarcado e VHDL. (XFUZZY, 2018); (iii) *Nível 3: Aplicação embarcada* – Definido pela incorporação do sistema Fuzzy e o desenvolvimento de um aplicativo para celular e análise da saúde da plantação. Essas etapas são apresentadas na Figura 5.

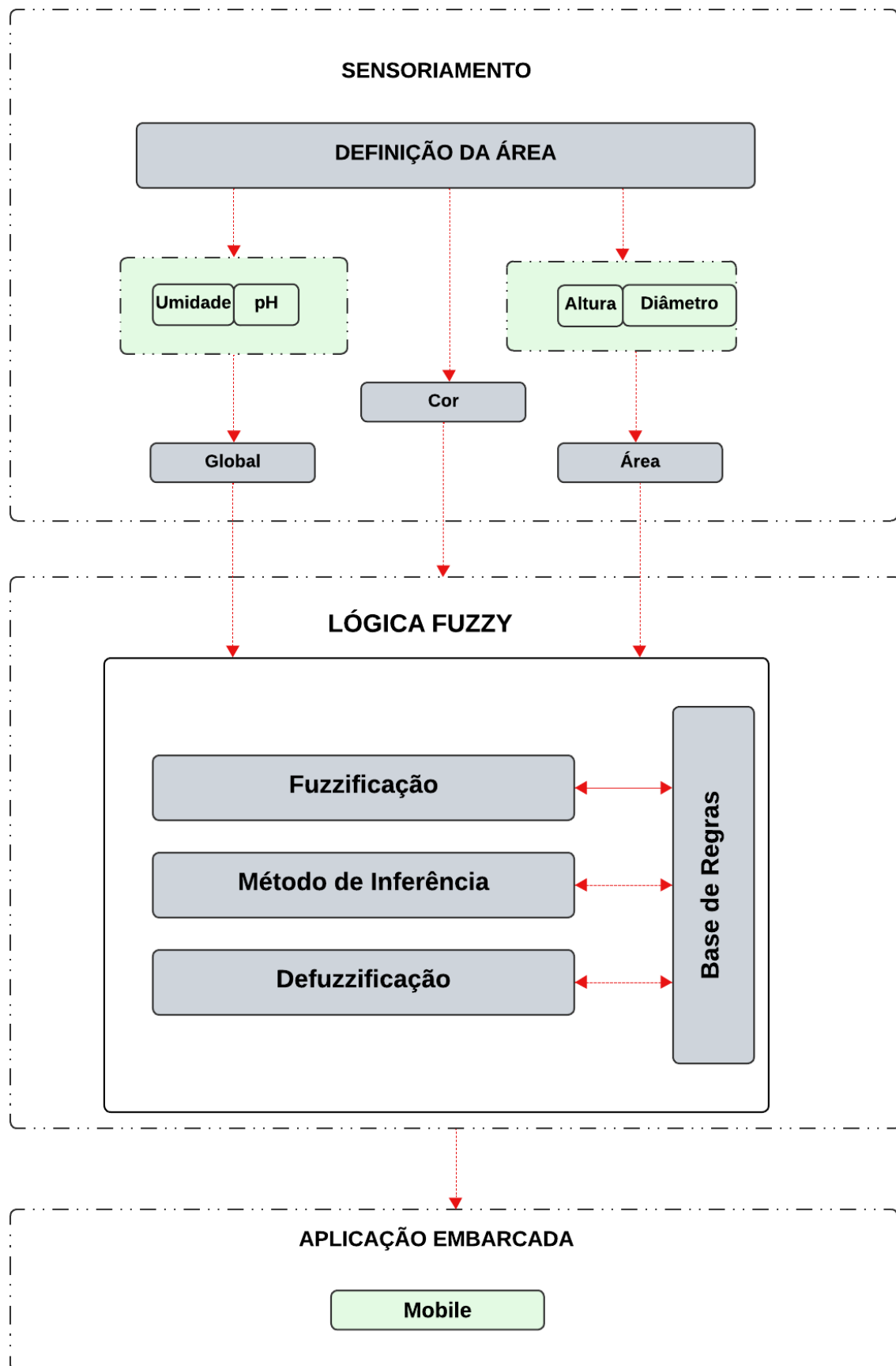


Figura 5 – Etapas de desenvolvimento do sistema Fuzzy (Fonte: a autora).

3.1.1 Definição das Áreas de Estudo

O Cenário 1 foi realizado em uma chácara no Núcleo Rural Boa Esperança, Ceilândia, Distrito Federal, uma referência na região; por esse motivo, será usada como referência para a construção e validação do sistema Fuzzy proposto. Neste local, foi separada uma área destinada ao plantio de milho, medindo aproximadamente 40 metros por 30 metros e com um período de plantio de 38 dias. Para o plantio das mudas de milho, foi utilizado aproximadamente 1 kg de sementes, sendo que o produtor indicou que foram plantados 3 grãos por cova. O espaçamento entre furos foi de aproximadamente 20 centímetros em média, e o espaçamento entre fileiras foi de aproximadamente 80 centímetros em média, conforme a Figura 6.



Figura 6 – Cenário 1: Plantação de milho com 38 dias.

3.1.2 Características e Definições Sobre o Sensoriamento

Através dos sensores de umidade e pH do solo, foi possível coletar os dados das amostras e fornecê-los ao sistema Fuzzy, criando um indicador global da qualidade dos nutrientes do solo. Desta forma, segue abaixo a descrição do sensoriamento utilizado em campo a partir do instrumento *three-way meter*, conforme a Figura 7.



Figura 7 – Sensoriamento usado na pesquisa em campo –modelo *three-way meter sensor* (Fonte: a autora).

Adicionalmente, foram coletados dados de altura e diâmetro do colmo das plantas de milho, assim como da cor da plantação, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Leituras do sensor no Cenário 1: 38 dias - Umidade = 80%, pH=7.

Amostras	Altura (cm)	Colmo(mm)
Amostra 1	35	9,6
Amostra 2	60	19,4
Amostra 3	40	13,7
Amostra 4	50	15,5
Amostra 5	50	14,5
Amostra 6	56	10,5
Amostra 7	50	13,4
Amostra 8	51	10,5
Amostra 9	34	11,1
Amostra 10	66	12,2

Fonte: Produzido pela autora.

3.1.3 Modelagem do Sistema de Inferência Fuzzy

O Xfuzzy é uma ferramenta de código aberto que oferece um ambiente integrado para o desenvolvimento de sistemas baseados em lógica Fuzzy. Projetada para facilitar a criação, simulação, validação e implementação de modelos Fuzzy, é amplamente utilizada em áreas como controle inteligente, automação e sistemas embarcados. O desenvolvimento de sistemas com o Xfuzzy segue um fluxo dividido em duas etapas principais.

Na primeira etapa, o sistema é descrito e verificado funcionalmente, combinando módulos Fuzzy e crisp. Os módulos Fuzzy lidam com incertezas e informações imprecisas, sendo utilizados para tarefas como aproximação de funções ou tomada de decisão. Já os módulos crisp realizam operações lógicas ou aritméticas precisas, complementando o sistema em partes que requerem cálculos exatos. As bases de conhecimento podem ser criadas com a experiência de especialistas ou dados de treinamento e aprendizado supervisionado. A verificação funcional inclui a análise de entradas e saídas e a simulação em malha fechada com um modelo da planta. Após a validação, a ferramenta gera os arquivos necessários para a próxima etapa (XFUZZY, 2018).

Com base nos dados coletados, um sistema Mamdani Fuzzy-Type 1 MISO (*Multiple-Input/Single-Output*) foi implementado na ferramenta Xfuzzy. A modelagem foi realizada em três etapas: (a) normalização dos dados; (b) definição do universo do discurso e funções de pertinência das entradas e saídas e; (c) construção da base de regras.

3.1.3.1 Normalização dos Dados

A normalização dos dados é uma etapa essencial para garantir que as variáveis de entrada e saída operem dentro de uma escala uniforme. Isso é particularmente importante em sistemas baseados em lógica Fuzzy, onde os valores de entrada podem se encontrar em faixas de magnitudes muito diferentes, o que pode gerar instabilidade numérica durante o processo de inferência. A normalização busca transformar as variáveis em um intervalo comum, tipicamente entre 0 e 1, de modo que os dados fiquem dimensionados de forma compatível para o modelo Fuzzy.

Essa normalização permite que todos os dados, independentemente de suas unidades originais ou variações de magnitude, sejam tratados de maneira consistente, evitando que valores extremos influenciem indevidamente os resultados. Em sistemas de controle Fuzzy, onde as variáveis de entrada e as funções de pertinência podem estar em diferentes escalas, a normalização ajuda a diminuir a instabilidade dos dados e a precisão do modelo, facilitando a comparação entre diferentes entradas e saídas. Seguindo esses princípios, os dados foram ajustados, como mostrado nas Equação 3.1 a 3.5.

$$\text{Valor normalizado} = \frac{\text{valor medido} - \text{valor mínimo}}{\text{valor máximo} - \text{valor mínimo}} \quad (3.1)$$

$$\text{pH} = \frac{7 - 0}{14 - 0} = 0,5 \quad (3.2)$$

$$\text{Umidade} = \frac{80 - 0}{100 - 0} = 0,8 \quad (3.3)$$

$$\text{Altura} = \frac{49,2 - 0}{100 - 0} = 0,492 \quad (3.4)$$

$$\text{Diâmetro} = \frac{13,6 - 0}{20 - 0} = 0,68 \quad (3.5)$$

3.1.3.2 Definição do Universo de Discurso e Funções de Pertinência

Para modelar o sistema Fuzzy de saída que infere a *Saúde* da plantação de milho, foram definidos três parâmetros de entrada: *Global*, *Cor* e *Área*, sendo que a entrada *Global* é um subsistema Fuzzy que depende das entradas umidade e pH, conforme ilustrado na Figura 8, extraída da ferramenta Xfuzzy. A escolha dessa topologia se justifica por dois motivos: a) pela capacidade de oferecer interpretabilidade ao sistema Fuzzy; b) pela possibilidade de atualização do indicador *Global* (indicador de nutrientes do solo), o qual poderia futuramente receber novas entradas provenientes de sensores específicos para a cultura a ser monitorada.

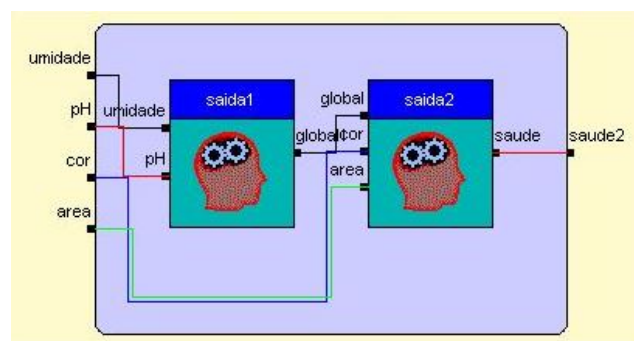


Figura 8 – Definição de variáveis de entrada e saída (Fonte: a autora).

A seguir apresenta-se a definição do universo de discurso de cada entrada e saída e do indicador *Global* de nutrientes do solo.

- Indicador *Global*: subsistema Fuzzy que determina o um indicador global da qualidade dos nutrientes da plantação a partir da leitura das entradas *umidade* e de *pH*. O universo de discurso do indicador *Global* foi definido no intervalo de 0,0 a 2,0.
- *Umidade*: Esta entrada foi obtida por meio do sensor *three-way meter* no local, responsável por medir a umidade presente no solo. O *universo de discurso* foi definido no intervalo de 0,0 a 1,0, onde o valor 0 representa um solo extremamente seco, enquanto o valor 1 indica um solo totalmente saturado de água.
- *pH*: Esta entrada foi obtida por meio do sensor *three-way meter* no local, sendo responsável por medir o nível de acidez ou alcalinidade do solo, utilizando uma escala de 0 a 14. Nessa escala, valores abaixo de 7 indicam que o solo é ácido, enquanto valores

acima de 7 indicam que é alcalino. O *universo de discurso* foi definido no intervalo de 0,0 a 1,0, onde o valor 0 representa um solo altamente ácido e o valor 1 indica um solo extremamente alcalino.

- *Cor*: Esta entrada foi derivada de dados observacionais sobre a cor das folhas das plantas. O *universo de discurso* foi definido entre 0,0 e 1,0, e os valores foram então convertidos em uma escala percentual, onde 0% corresponde à cor mais acastanhada (indicando um estado desfavorável de saúde) e 100% corresponde à cor mais esverdeada (indicando um estado saudável).
- *Área*: Esta entrada foi calculada a partir da soma da altura normalizada e do diâmetro do caule de cada amostra. O *universo de discurso* para essa variável foi definido no intervalo de 0,0 a 2,0.
- *Saúde*: Esta variável de saída indica o estado geral de saúde da plantação em cada área de manejo. O *universo de discurso* foi definido entre 0,0 e 100,0 %.

A Tabela 3, apresentou os dados brutos coletados para a plantação com 38 dias. A Tabela 4 exibe os mesmos dados, porém, normalizados, permitindo uma análise mais consistente e comparativa dos parâmetros ajustados e configurados para a entrada no Xfuzzy.

Tabela 4 – Valores de entrada normalizados Cenário 1.

Amostras	<i>Global</i> (0-2)	<i>Cor</i> (0-1)	<i>Área</i> (0-2)
Amostra 1	2.10	0.9	0.24
Amostra 2	1.90	0.9	1.23
Amostra 3	2.20	0.8	0.78
Amostra 4	2.50	0.8	1.60
Amostra 5	2.50	0.8	0.93
Amostra 6	2.50	0.8	1.00
Amostra 7	2.30	0.8	0.80
Amostra 8	2.10	0.8	0.81
Amostra 9	2.10	0.9	0.33
Amostra 10	2.20	0.9	1.66

Fonte: a autora

Todas as variáveis de entrada, de saída, e do indicador *Global* foram representadas por três funções de pertinência, as saber, trapetoidais nos extremos e triangular na faixa intermediária. A escolha das funções de pertinência tem um papel fundamental na flexibilidade e na resposta do sistema Fuzzy. As funções trapezoidais são particularmente eficazes nas extremidades do universo de discurso, proporcionando transições suaves nos valores

extremos. Isso reduz as mudanças abruptas nas saídas do sistema, o que melhora a estabilidade e a capacidade de resposta a valores extremos. Por outro lado, a função de pertinência triangular foi aplicada na faixa intermediária das variáveis linguísticas, conforme apresentado na Figura 9.

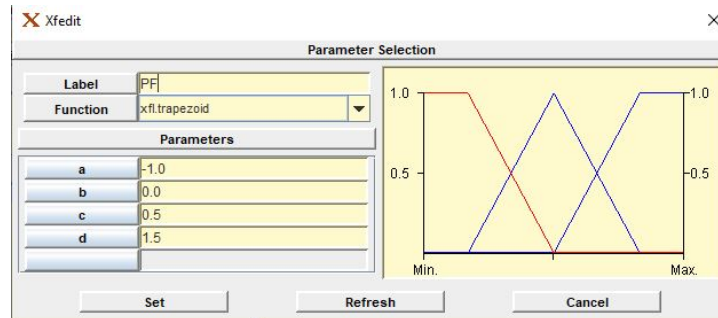


Figura 9 – Definição das funções de pertinência trapezoidais e triangulares usadas em no sistema Fuzzy. Na imagem a configuração “PF - Pouco Favorável” na cor vermelha.

Conforme descrito anteriormente, o Cenário 1 com 38 dias de plantação, representado pela Tabela 3 e pela Figura 6, foi utilizado para construir o sistema Fuzzy. Após as primeiras simulações neste cenário, foram feitos ajustes manuais nos parâmetros da cada função de pertinência do sistema Fuzzy no intuito de melhor representar o comportamento esperado.

3.1.3.3 Construção da Base de Regras

A base de regras é um dos componentes mais cruciais em sistemas Fuzzy, pois é responsável por orientar o processo de inferência, permitindo que o sistema tome decisões com base nas entradas fornecidas. Cada regra na base de regras define uma relação entre as variáveis linguísticas de entrada e a variável linguística de saída, com o objetivo de mapear as condições do sistema para uma resposta apropriada.

O sistema Fuzzy que determina o indicador *Global* de nutrientes, possui duas entradas e uma saída, cada uma com três funções de pertinência. O número total de regras de inferência é determinado pelo número de combinações possíveis entre as categorias dessas variáveis de entrada, requerendo $3 \times 3 = 9$ regras. A Tabela 5 exemplifica como foi construída a base de regras utilizada para a o subsistema Fuzzy *Global*.

Tabela 5 – Construção da base de regras do subsistema Fuzzy *Global*.

Regra	Umidade	pH	Global
0	Baixa	Baixo	Baixa
1	Baixa	Bom	Baixa
2	Baixa	Alto	Baixa
3	Ideal	Baixo	Ideal
...	...	...	...
8	Alta	Alto	Alta

Fonte: a autora

Por outro lado, o sistema Fuzzy de saída que infere a saúde da plantação de milho é composto por três entradas (*Global*, *Cor* e *Área*) e uma saída (*Saúde*). Com três entradas, e cada uma delas com três categorias possíveis (*Muito Favorável* (MF), *Favorável* (F) e *Pouco Favorável* (PF)), o número total de regras possíveis é $3 \times 3 \times 3 = 27$ regras, como ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Construção da base de regras do sistema Fuzzy de saída - Tabela simplificada.

Regra	Global	Cor	Área	Saúde
0	MF	MF	MF	MF
1	MF	MF	F	MF
2	MF	MF	PF	MF
3	MF	F	MF	MF
...	...	...	...	...
26	PF	PF	PF	PF

Fonte: a autora

As regras de inferência são formuladas de acordo com a lógica Fuzzy, e cada regra tem a seguinte estrutura geral:

Se (*Global* é *X*) E (*Cor* é *Y*) E (*Área* é *Z*), então (*Saúde* é *W*),

onde *X*, *Y*, *Z*, e *W* representam as variáveis linguísticas (MF, F, PF) das entradas e da saída. O operador lógico *AND* foi utilizado para combinar as condições das entradas. Este operador determina a ativação da regra, onde a regra é considerada ativa se todas as condições forem verdadeiras, levando em consideração o grau de pertencimento de cada entrada. Por exemplo, a regra “Se o Indicador *Global* é MF e o Indicador *Cor* é MF e o Indicador *Área* é F, então a

Saúde é MF” só será acionada se todos os parâmetros de entrada satisfizerem seus respectivos graus de pertinência.

A Tabela 6 apresenta uma versão simplificada da base de regras, onde as diferentes combinações de entradas (*Global*, *Cor* e *Área*) resultam em diferentes valores de saída (*Saúde*). As combinações são organizadas de forma que representem as possíveis condições do sistema, refletindo diferentes estados de saúde da plantação em função dos parâmetros de entrada. Por exemplo, na Tabela 6, a Regra 0 indica que se todas as entradas estiverem na categoria *Muito Favorável* (MF), a saída também será *Muito Favorável* (MF), refletindo uma plantação saudável. Já a Regra 26, onde todas as entradas são *Pouco Favorável* (PF), resulta em uma saída *Pouco Favorável*, indicando um estado de saúde ruim para a plantação e o agricultor precisa fazer uma intervenção na área do cultivo.

A implementação do sistema Fuzzy na ferramenta Xfuzzy pode ser observada no Apêndice A.

3.2 Sistema Embarcado de Inferência

Para aprimorar a visualização dos dados fornecidos ao produtor, foi desenvolvido um aplicativo para *smartphone* utilizando a plataforma *App Inventor* (TECHNOLOGY, 2024). De forma separada, o aplicativo exibe as também informações sobre a saúde da plantação através dos valores de entrada manual e independentes, permitindo que o produtor acompanhe a saúde da plantação de maneira prática e remota. Esse recurso facilita o monitoramento dos parâmetros gerais da plantação como *Global*, *Cor* e *área*,

Conforme ilustrado nas Figuras 10,11 e 12, a interface do aplicativo foi projetada para exibir o *status* da saúde da plantação de forma clara, com indicações visuais simples, como ícones coloridos e mensagens diretas (“Muito Favorável”, “Favorável” e “Pouco Favorável”).

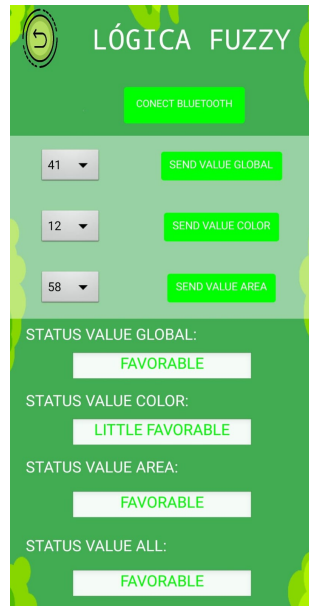


Figura 10 – Cenário "Favorável"

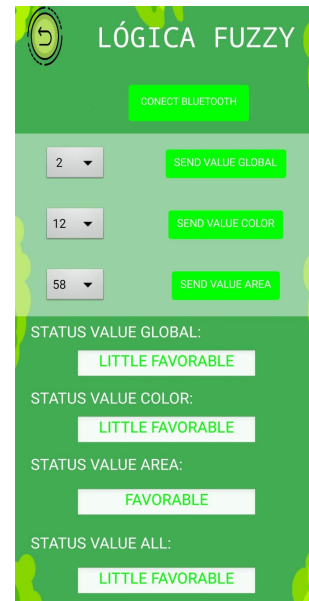


Figura 11 – Cenário "Pouco Favorável"

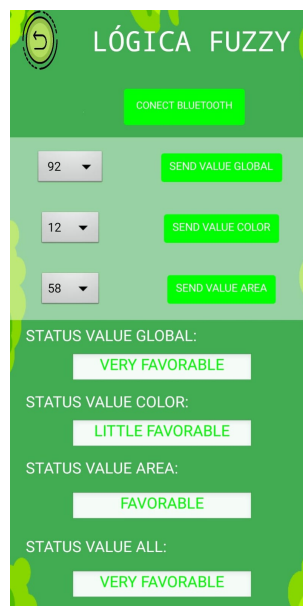


Figura 12 – Cenário "Muito Favorável"

Figura 13 – Resultado das três telas no aplicativo "Horta Plus: Lógica Fuzzy" (Fonte: a autora)

O processo de desenvolvimento do aplicativo, ilustrado na Figura 14, envolveu a criação de blocos de programação no *App Inventor*. A partir estrutura de blocos, o mesmo permite a leitura e a exibição dos dados, que podem ser recebidos diretamente dos sensores ou inserida manualmente, garantindo que o aplicativo seja uma ferramenta eficaz e de fácil utilização para o produtor, mesmo sem conhecimentos técnicos avançados. Isto indica ao produtor de que uma intervenção e/ou verificação precisa ser feita no local da plantação.



Figura 14 – Bloco de programação com o *App Inventor*. "Horta Plus: Lógica Fuzzy" (Fonte: a autora).

3.3 Metodologia de Validação

Três cenários de validação foram utilizados neste trabalho, como ilustrado nas Figuras abaixo: Cenário 2 (Figura 15), Cenário 3 (Figura 17), e Cenário 4 (Figura 19). Para cada cenário, foram obtidas 10 amostras aleatórias, e os valores médios de entrada para cada um foram calculados posteriormente, conforme mostrado abaixo.

O Cenário 2 envolveu, em média, 100 dias de cultivo. Observou-se que a plantação estava mais seca e com a cor amarronzada, embora a altura estivesse boa e com um padrão uniforme de crescimento, conforme pode ser vista na Figura 15.



Figura 15 – Cenário 2: plantação de milho com 100 dias. (Fonte: a autora).

Dessa forma, todos os dados foram coletados para os testes realizados na área, incluindo 10 amostras com os valores brutos de pH, umidade, altura e diâmetro. Em seguida, os valores foram normalizados, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 2.

pH	Norm	Umidade	Norm	Altura	Norm	Diâmetro	Norm
7	0,5	20%	0,2	35	0,03	30	0,67
7	0,5	10%	0,1	60	0,81	20	0,35
7	0,5	10%	0,1	40	0,18	30	0,67
7	0,5	10%	0,1	50	0,50	40	1,00
7	0,5	10%	0,1	50	0,50	20	0,35
7	0,5	10%	0,1	56	0,68	20	0,35
7	0,5	10%	0,1	50	0,50	30	0,67
7	0,5	10%	0,1	51	0,53	30	0,67
7	0,5	20%	0,2	34	0	30	0,67
7	0,5	20%	0,2	66	1	30	0,67

Fonte: a autora.

Após a coleta de dados foi realizado o processo de normalização das entradas *Cor* (cor); *Área* (altura + diâmetro); *Global* (basaedo nas entradas de pH e umidade), conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 2.

<i>Cor</i> Normalizada (0-1)	<i>Área</i> Normalizada (0-2)	<i>Global</i> (0-2)
0,20	0,70	1,34
0,10	1,16	1,35
0,30	0,85	1,46
0,20	1,50	1,13
0,20	0,85	1,02
0,10	1,03	1,24
0,20	1,17	1,13
0,10	1,20	1,35
0,30	0,67	1,67
0,30	1,67	1,67

Fonte: a autora.

Após a coleta dos dados iniciou-se a etapa de testes de simulação e verificação do sistema Fuzzy. Esse processo é realizado no menu “Verification” do Xfuzzy, que permite validar e analisar detalhadamente todos os parâmetros configurados dentro do universo de discurso definido. Através dessa interface, é possível observar o comportamento do sistema de inferência Fuzzy frente a diferentes valores de entrada, conferindo a consistência e a precisão dos resultados obtidos.

Para fins de verificação, ajustaram-se as configurações do Xfuzzy para os valores médios da Tabela 7, onde tem-se as entradas normalizadas das amostras medidas pelos sensores. Assim, ao considerar a configuração do Xfuzzy para o Cenário 2, conforme ilustrado na Figura 16, obtiveram-se os seguintes valores médios de entrada: *Umidade* = 0.2, *pH* = 0.5, *Cor* = 0.31 e *Área* = 1.30. Na saída, o sistema indicou um valor de 41.19 para a saúde da plantação, interpretado pela lógica Fuzzy como *Favorável*.

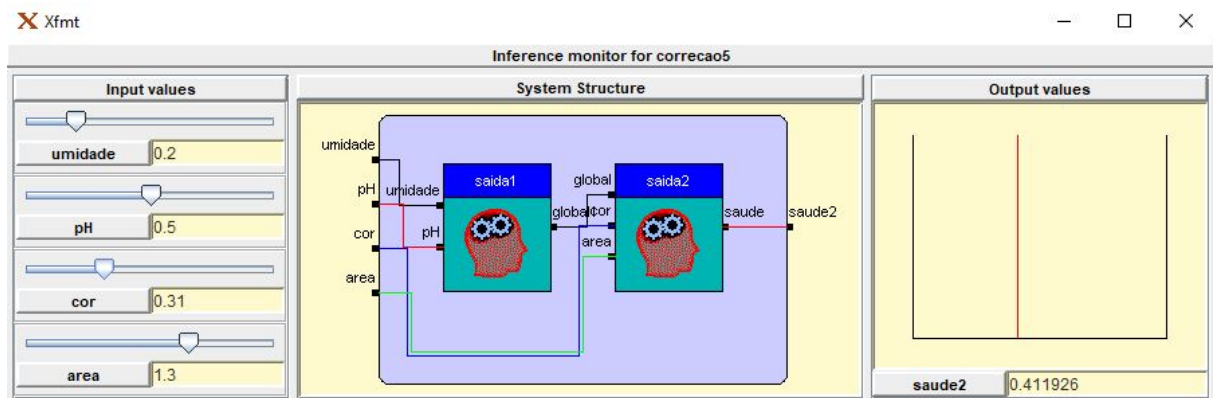


Figura 16 – Cenário 2: saída XFUZZY *Favorável* (Fonte: a autora).

Dando continuidade aos testes de validação, analisou-se o Cenário 3, caracterizado por uma área de cultivo com aproximadamente 64 dias de desenvolvimento, conforme observando na Figura 17.



Figura 17 – Cenário 3: plantação de milho com 64 dias (Fonte: a autora).

Mantendo o mesmo padrão de coleta de dados dos cenários anteriores, apresenta-se na Tabela 9 os dados brutos coletados para as variáveis pH, umidade do solo (%), altura (cm), e diâmetro do colmo (mm).

Tabela 9 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 3.

pH	Norm	Umidade	Norm	Altura	Norm	Diâmetro	Norm
7	0,5	80%	0,8	114	0,17	14,9	0,32
7	0,5	80%	0,8	230	1,00	18,5	0,65
7	0,5	80%	0,8	122	0,23	12,9	0,17
7	0,5	80%	0,8	160	0,50	13,0	0,18
7	0,5	80%	0,8	116	0,19	10,9	0,00
7	0,5	80%	0,8	135	0,32	11,5	0,05
7	0,5	80%	0,8	89	0,00	11,5	0,05
7	0,5	80%	0,8	150	0,43	18,5	0,65
7	0,5	80%	0,8	160	0,50	15,2	0,36
7	0,5	80%	0,8	184	0,67	22,6	1,00

Fonte: a autora.

Após a coleta de dados foi realizada a normalização e a configuração das entradas, *Cor*, *Área* e *Global*, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 3.

<i>Cor</i> Normalizada (0-1)	<i>Área</i> Normalizada (0-2)	<i>Global</i> (0-2)
0,9	0,49	1,83
1,0	1,65	2,50
0,8	0,40	2,16
0,9	0,68	1,83
0,8	0,19	1,83
1,0	0,37	1,83
0,9	0,05	1,50
0,9	1,08	2,16
0,8	0,86	1,83
1,0	1,67	1,83

Fonte: a autora.

No Cenário 3 obtiveram-se os seguintes valores médios de entrada: *Umidade* = 0.80, *pH* = 0.50, *Cor* = 0.80 e *Área* = 1.36. No parâmetro da saída, a *Saúde* da plantação apresentou o valor de 76.59%, sendo interpretado pela lógica Fuzzy como *Muito favorável*, como visto na Figura 18.

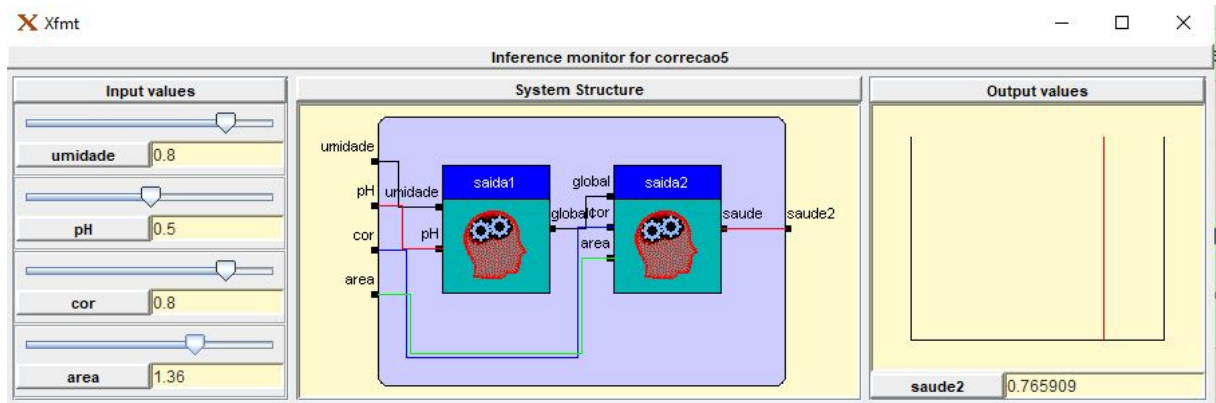


Figura 18 – Cenário 3: Xfuzzy *Muito favorável* (Fonte: a autora).

O Cenário 4, corresponde a uma área de cultivo com mais de 120 dias de desenvolvimento. Nesse estágio, a plantação apresentava-se extremamente seca, com coloração amarronzada e altura irregular, sem linearidade no tamanho das plantas. A configuração dessa área pode ser observada na Figura 19.



Figura 19 – Cenário 4: plantação de milho com mais de 120 dias (Fonte: a autora).

Os dados brutos coletados para as variáveis pH, umidade do solo (%), altura (cm) e diâmetro do colmo (mm) referente ao Cenário 4, apresentam-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores dos dados gerais coletados no Cenário 4.

pH	Norm	Umidade	Norm	Altura	Norm	Diâmetro	Norm
7	0,5	20%	0,2	129	0,3	30	0,5
7	0,5	10%	0,1	114	0	20	0
7	0,5	10%	0,1	160	1	30	0,5
7	0,5	10%	0,1	112	0	40	1
7	0,5	10%	0,1	140	0,5	20	0
7	0,5	10%	0,1	130	0,3	20	0
7	0,5	10%	0,1	140	0,5	30	0,5
7	0,5	10%	0,1	125	0,2	30	0,5
7	0,5	20%	0,2	150	0,7	30	0,5
7	0,5	20%	0,2	114	0	30	0,5

Fonte: a autora.

Após a coleta de dados foi realizado a normalização e a configuração das entradas *Cor* ; *Área* e *Global*, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Valores das entradas normalizadas no Cenário 4.

<i>Cor</i> Normalizada (0-1)	<i>Área</i> Normalizada (0-2)	<i>Global</i> (0-2)
0,20	0,8	1,3
0,30	0	1,4
0,20	1,5	1,6
0,10	1	1,1
0,10	0,5	0,8
0,20	0,3	1,2
0,30	1	1,1
0,30	0,7	1,4
0,30	1,2	1,9
0,20	0,5	1,9

Fonte: a autora.

Para fins de validação, ajustou-se o menu “Verification” no Xfuzzy para o Cenário 4, conforme ilustrado na Figura 20.

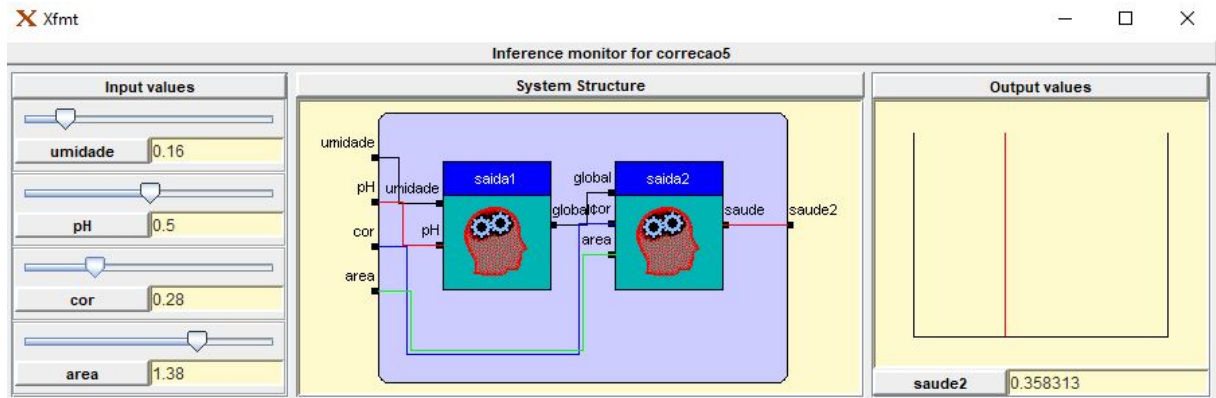


Figura 20 – Cenário 4: saída Xfuzzy *Pouco Favorável* (Fonte: a autora).

Essa análise inicial demonstrou a adequação do sistema desenvolvido no Xfuzzy para capturar e processar variações nos parâmetros, oferecendo uma avaliação sobre os Cenários 2,3 e 4 em relação a saúde da plantação.

3.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou os métodos aplicados ao estudo de caso, incluindo o cenário de referência para o modelo Fuzzy proposto e os três cenários de validação no Xfuzzy. Foram descritos os passos do desenvolvimento do estudo, que abrangem a caracterização da área de plantio, a disposição das culturas de milho, e a coleta de dados agrícolas sobre pH, umidade, altura e diâmetro do colmo. Em seguida, foi explicada a metodologia de normalização dos dados coletados, apresentados em uma tabela geral.

Além disso, o capítulo demonstrou como os dados brutos foram preparados e configurados como parâmetros de entrada, organizados em três variáveis principais: *Cor* (entrada de cor), *Área* (combinação das entradas de altura e diâmetro) e *Global* (entrada de Umidade e pH). Os valores ajustados passaram por uma base de regras que gerou saídas para cada um dos cenários, possibilitando a comparação direta com as imagens das plantações dos cenários reais. A comparação desses resultados com as avaliações dos especialistas será explorada no próximo capítulo.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho, incluindo as simulações realizadas no software Xfuzzy e a análise dos dados por especialistas. São discutidos o desempenho do modelo de inferência Fuzzy na avaliação da saúde das plantações de milho e os resultados experimentais dos diferentes cenários. Por fim, este capítulo também inclui uma comparação entre os valores estimados pelo sistema Fuzzy e as avaliações realizadas pelos especialistas.

4.1 Resultados de Simulação

Os resultados foram tratados por meio dos dados gráficos e simuladores, através do Xfuzzy. Assim, testes foram realizados em quatro cenários distintos de plantações de milho, com estimativas variáveis de saúde. A análise demonstra que o sistema Fuzzy desenvolvido foi capaz de estimar o estado de saúde das plantações, variando de *Muito Favorável* a *Pouco Favorável*.

No Cenário 1, utilizou-se um conjunto de valores, incluindo *umidade* = 0.8, *pH* = 0.5 *cor* = 0.85 e *área* = 1.4. De forma semelhante, no Cenário 3, foram usados valores como *umidade* = 0.8, *pH* = 0.5 *cor* = 0.8 e *área* = 1.36. Os valores estimados de *saúde da plantação* foram de 82,28% e 76.59%, respectivamente, ambos indicando um estado de saúde da plantação *Muito Favorável*. Esses resultados sugerem que a saúde das plantações é satisfatória, não requerendo nenhuma intervenção, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados para os Cenários 1 e 3.

Cenário	Umidade	pH	Cor (0-2)	Área (0-2)	Saúde Xfuzzy (%)
Cenário 1	0.8	0.5	0.85	1.4	82.28
Cenário 3	0.8	0.5	0.80	1.36	76.59

Fonte: a autora.

Nos Cenários 2 e 4, foram obtidos os seguintes resultados de inferência Fuzzy. Para o Cenário 2, foi utilizado o conjunto de valores *Umidade*=0.2, *pH*=0.5, *cor*=0.31 e *área*=1.30. A *saúde da plantação* estimada foi de 41.19%. De forma semelhante, para o Cenário 4, foram utilizados os seguintes valores de entrada: *Umidade*=0.16, *pH*=0,5, *cor*=0.28 e *área*=1.38. A *saúde da plantação* estimada foi de 35.83%. Em ambos os cenários, a inferência Fuzzy indicou um estado de saúde da plantação *Favorável*, sugerindo que a saúde da plantação é satisfatória e não requer intervenção imediata, conforme apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados para os Cenários 2 e 4.

Cenário	Umidade	pH	Cor (0-2)	Área (0-2)	Saúde Xfuzzy (%)
Cenário 2	0.20	0.5	0.31	1.30	41.19
Cenário 4	0.16	0.5	0.28	1.38	35.83

Fonte: a autora.

4.2 Resultados pelos Especialistas

As imagens das áreas de plantação de milho, referentes aos diferentes cenários de validação (Figuras 6, 15, 17 e 19), foram apresentadas a especialistas na cultura do milho para fins de comparação. Durante a avaliação, os especialistas utilizaram tanto valores numéricos quanto subjetivos, dependendo da variável analisada.

- Indicador Global: Foi utilizada uma escala linguística com as categorias: bom, ruim, ideal e razoável.
- Indicador Cor: Foi atribuída uma escala numérica de 0 a 1, onde o valor 0 representa colorações mais amareladas ou amarronzadas e o valor 1 indica uma coloração verde-escura.
- Indicador Área: Foi avaliado numericamente em uma escala de 0 a 2, sendo que valores próximos a 0 correspondem a plantas pequenas e de talo fino, enquanto valores próximos a 2 representam plantações mais altas e com colmos grossos.
- Indicador Saúde da plantação: Foi atribuída uma escala de 0 a 100, onde o valor 0 indica uma plantação em condições muito ruins e o valor 100 representa uma plantação de milho em excelente estado de saúde.

Os resultados podem ser vistos nas Tabelas abaixo, onde a Tabela 15 refere-se ao Cenário 1, a Tabela 16 refere-se ao Cenário 2, a Tabela 17 refere-se ao Cenário 3 e a Tabela 18 refere-se ao Cenário 4.

Tabela 15 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 1.

	Entrada Global	Entrada Cor (0-2)	Entrada Área (0-2)	Saúde da plantação
Especialista 1	Bom	0.9	2.0	80
Especialista 2	Bom	1.0	2.0	100
Especialista 3	Razoável	1.5	0.75	60
Média Saúde				80

Fonte: a autora.

Tabela 16 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 2.

	Entrada Global	Entrada Cor (0-2)	Entrada Área (0-2)	Saúde da plantação
Especialista 1	Razoável	2.0	1.5	20
Especialista 2	Ruim	0.3	0.5	60
Especialista 3	Ruim	1.0	0.9	40
Média Saúde				40

Fonte: a autora.

Tabela 17 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 3.

	Entrada Global	Entrada Cor (0-2)	Entrada Área (0-2)	Saúde da plantação
Especialista 1	Bom	1.0	2.0	90
Especialista 2	Bom	1.5	2.0	80
Especialista 3	Bom	1.5	1.0	70
Média Saúde				80

Fonte: a autora.

Tabela 18 – Análise da saúde da plantação pelos especialistas - Cenário 4.

	Entrada Global	Entrada Cor (0-2)	Entrada Área (0-2)	Saúde da plantação
Especialista 1	Ruim	0.8	0.5	20
Especialista 2	Razoável	0.4	1.0	70
Especialista 3	Ruim	1.0	1.5	40
Média Saúde				43.3

Fonte: a autora.

Após a análise dos valores de entrada e dos resultados das inferências para os quatro cenários, foi gerada uma tabela comparativa contendo todos os resultados, incluindo uma comparação entre as estimativas do sistema Fuzzy e as avaliações dos especialistas (agricultores rurais). Esta comparação pode ser visualizada na Tabela 19.

Tabela 19 – Comparação da inferência do sistema Fuzzy vs especialistas

Cenários	Global	Cor	Área	Saúde Fuzzy	Saúde especialista	Estado da plantação	Intervenção necessária?	Fuzzy × especialistas (%)
Cenário 1	2.2	0.85	1.40	82.28	80.00	Muito Favorável	No	97.15
Cenário 2	1.12	0.31	1.30	41.19	40.00	Favorável	Yes	97.03
Cenário 3	1.81	0.8	1.36	76.59	80.00	Muito Favorável	No	95.74
Cenário 4	1.37	0.28	1.38	35.83	40.00	Favorável	Yes	89.58

Embora não tenha havido uma diferença significativa quanto a avaliação da saúde das plantações de milho entre do sistema Fuzzy e os especialistas, observou-se que os agricultores

apresentaram fatores relevantes dentro da agricultura familiar. Entre esses fatores, destacam-se:

- **Reutilização de recursos:** Em muitas situações, plantas de milho que não estão em condições ideais para consumo humano ainda podem ser aproveitadas de outras formas, como alimentação para animais (aves, bovinos ou suínos).
- **Ervas daninhas:** A presença de ervas daninhas ao redor das plantas de milho é comum, mas muitas vezes não é um fator que comprometa significativamente a saúde da plantação, especialmente quando é possível controlá-las com intervenções manuais.
- **Assimetrias no crescimento:** Embora o crescimento simétrico das plantas seja considerado ideal, os especialistas sabem que pequenas variações podem ser comuns e, muitas vezes, aceitáveis, desde que o resto dos fatores estejam favoráveis.

Apesar destes aspectos não terem sido configurados na base de regras do Xfuzzy, esses fatores podem contribuir para que o sistema se aproxime da percepção humana na avaliação da saúde das plantações, tornando o sistema mais refinado.

4.3 Discussão dos Resultados

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das simulações realizadas no Xfuzzy, evidenciando a eficiência do modelo Fuzzy no tratamento de dados incertos e não lineares. Os testes e ajustes realizados na base de regras foram discutidos, assim como as comparações realizadas com as opiniões dos especialistas entrevistados, fortalecendo a validação do modelo.

Os cenários analisados permitiram avaliar diferentes condições da plantação de milho, enquanto a comparação entre os resultados do sistema Fuzzy e as avaliações dos especialistas mostrou uma forte correlação, em todos os cenários com valores acervativos de até 97% entre os especialistas e o sistema Fuzzy.

Os resultados apresentados consolidam a proposta deste trabalho, destacando o potencial do sistema Fuzzy para auxiliar agricultores na tomada de decisões, e apontam caminhos para aprimoramentos futuros no modelo e na coleta de dados.

5 Conclusões

Esta pesquisa apresentou a concepção e implementação de um sistema inteligente baseado em lógica nebulosa, desenvolvido para diagnosticar a saúde de plantações de milho no contexto da agricultura familiar. O sistema foi estruturado para avaliar a qualidade da plantação em três níveis linguísticos: "Pouco Favorável", "Favorável" e "Muito Favorável". A escolha da lógica nebulosa se mostrou particularmente eficaz devido à sua capacidade de lidar com dados imprecisos e subjetivos, permitindo a utilização de variáveis linguísticas, em contraste com a lógica clássica que opera estritamente com valores binários. Esse diferencial é especialmente relevante para a agricultura familiar, onde muitas decisões dependem de análises qualitativas e da experiência dos produtores.

A pesquisa também contribuiu para preencher uma lacuna identificada no estado da arte, ao integrar automação e tecnologias inteligentes em ambientes rurais, um campo ainda pouco explorado, mas com enorme potencial de aplicação. A modelagem do sistema fuzzy e a base de regras dos dados foram realizadas com base em um processo colaborativo, que envolveu entrevistas com agricultores familiares e reuniões com acadêmicos do curso de agronomia. Essa abordagem colaborativa foi essencial para assegurar que o sistema estivesse alinhado com a realidade e as necessidades do campo, refletindo o conhecimento empírico dos agricultores combinado à fundamentação teórica e técnica dos pesquisadores.

O núcleo do desenvolvimento do sistema foi dividido em dois níveis: a) um subsistema Fuzzy que considerou as variáveis *Umidade* e *pH* para inferir um indicador *Global* da qualidade dos nutrientes do solo; b) o sistema principal, com os indicadores *Global*, *Área* e *Cor* média das plantas. Todos os parâmetros do modelo foram configurados e simulados no ambiente Xfuzzy, que se mostrou uma ferramenta robusta para a construção e validação do sistema proposto.

Os resultados obtidos demonstraram a eficácia do sistema proposto. As avaliações geradas pelo modelo fuzzy foram comparadas com as análises realizadas por produtores rurais, obtendo margens de precisão entre 89% e 97% para quatro áreas diferentes usadas no processo de validação. Esses resultados não apenas comprovam a viabilidade técnica do sistema, mas também evidenciam o seu potencial como uma solução acessível para pequenos produtores, promovendo a inclusão tecnológica na agricultura familiar e permitindo tomadas de decisão mais precisas e assertivas.

Os resultados parciais desta pesquisa foram apresentados na conferência internacional *IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence* (LACCI 2024) (MEN-DONÇA et al., 2024).

5.1 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros se concentrarão na integração de redes de sensores IoT e a infraestrutura Wi-Fi, incluindo a implementação do código C em um microcontrolador de baixo custo, bem como a utilização do recurso da câmera do ESP32 para avaliar o parâmetro de entrada *Cor* de forma automática. Em relação ao sistema de inferência Fuzzy, a presença de ervas daninhas poderá também ser incluída como um novo parâmetro de entrada e o uso potencial dos grãos para consumo animal e produção de ração também poderá ser estimado como outra saída do sistema.

Um aspecto importante é a incorporação de novas grandezas tais como o tempo de plantio, a luminosidade média recebida pela plantação, a qual depende tanto da localização geográfica como do mês no ano, e novas grandezas que permitam inferir a qualidade dos nutrientes do solo.

Além disso, as funções de pertinência e a base de regras serão refinadas no local da plantação, com o objetivo de incorporar AgroTICs à agricultura familiar por meio de uma solução embarcada de lógica Fuzzy de baixo custo.

Referências

- ALMEIDA, A. D. J. **Estação Meteorológica de Baixo Custo para Aplicação Agrícola**. 2018. P. 45. Orientador: Marco Diego Aurélio Mesquita, Coorientador: Cláwsio Rogério Cruz Sousa. Citado na p. 15.
- BARBOSA, A. B.; MARTINS, E. A. Irrigação Automatizada para Pequenas Propriedades. **Anais do Sintagro**, 2023. Acesso em: 31 out. 2024. Disponível em: <https://www.fatecourinhos.edu.br/anais_sintagro/index.php/anais_sintagro/article/view/79>. Citado na p. 15.
- BRASIL, C. **Agricultura Familiar Garante 70% da Mesa do Brasileiro, Mas Está Longe do Agro 4.0**. 2023. Acesso em: 24 set. 2024. Disponível em: <<https://contrafbrazil.org.br/noticias/agricultura-familiar-garante-70-da-mesa-do-brasileiro-mas-esta-longe-do-agro-4-0-979c/>>. Citado na p. 14.
- BRAZILIENSE, C. **Agricultura Familiar Ganha Força no Distrito Federal**. 2024. Acesso em: 24 set. 2024. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/cidades-df/2024/06/6880231-agricultura-familiar-ganha-forca-no-distrito-federal.html>>. Citado na p. 13.
- BUAINAIN, A. M.; GARCIA, G.; NORDER, L. A agricultura familiar no Brasil: características e desafios. **Revista Brasileira de Economia**, Embrapa, v. 68, n. 1, p. 111–135, 2014. Citado na p. 13.
- CAMPEROS REYES, J. T.; MOREIRA, F. M.; RODRIGUES, F. d. A.; SANT'ANA, R. C. G. **Tecnologias digitais e sustentabilidade no campo: A importância dos dados para o desenvolvimento rural**. Tupã: Faculdade de Ciências e Engenharia UNESP – Campus de Tupã, 2020. 151 p. : il. gráfs., tabs. Inclui bibliografia. ISBN 978-65-88374-01-6. Citado na p. 13.
- CAVALCANTI, M. T.; SILVA, F. L. H. D.; CAVALCANTI, J. H. F.; FLORENTINO, E. R.; FLORENCIO, I. M.; MOREIRA, R. T. **Aplicação da lógica fuzzy na análise sensorial de pão de forma enriquecido**. v. 17. 2013. P. 208–215. Citado na p. 22.
- COSTA BORBA, M. da; RAMOS, J. E. S.; RAMBORGGER, B. M.; MARQUES, E. O.; MACHADO, J. A. D. Agricultural management through Artificial Intelligence: an analysis of digitization of agriculture. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, University Center of Maringa, v. 15, 3 jul. 2022. ISSN 21769168. DOI: [10.17765/2176-9168.2022v15n3e9337](https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n3e9337). Citado na p. 18.
- CREVIER, D. **AI: The Tumultuous History of the Search for Artificial Intelligence**. Basic Books, 1993. Citado na p. 18.

- DE SOUZA, A. C.; DE OLIVEIRA, R. R. **Agricultura Familiar: Desafios e Oportunidades**. 2020. Acesso em: 24 set. 2024. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/asoc/a/Bwg7NVTs5kcrK6WRxbqh4LS/>>. Citado na p. 14.
- DEEPA, N.; GANESAN, K. Hybrid rough fuzzy soft classifier based multi-class classification model for agriculture crop selection. **Soft computing**, Springer, v. 23, p. 10793–10809, 2019. Citado na p. 22.
- ECK, N. J. van; WALTMAN, L. **VOSviewer - Visualizing Scientific Landscapes**. 2023. Accessed: 2024-11-01. Disponível em: <<https://www.vosviewer.com/>>. Citado na p. 29.
- EMBRAPA. **Educação para a Agricultura 4.0: Desafios e Oportunidades**. 2023. Acesso em: 24 set. 2024. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/166203/1/PL-Agro4.0-JC-na-Escola.pdf>>. Citado nas pp. 13, 20.
- GEHRKE, M.; WALKER, C. L.; WALKER, E. A. Normal forms and truth tables for fuzzy logics. In: v. 138, p. 25–51. DOI: 10.1016/S0165-0114(02)00566-3. Citado na p. 24.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy. **SBA Controle & Automação**, CP 6101, CEP 13081-970, Campinas - SP, v. 4, n. 3, p. 97, setembro-outubro 1994. Accessed: 2024-11-01. Citado na p. 24.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep Learning**. MIT Press, 2016. Citado na p. 18.
- GRISA, C.; SCHNEIDER, S. **Repertório para agricultura familiar**. Embrapa, 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-agricultura-familiar>. Citado na p. 14.
- GUDWIN, R.; MAEDA, E. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. **ResearchGate**, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268371800_CONCEITOS_FUNDAMENTAIS_DA_TEORIA_DE_CONJUNTOS_FUZZY_LOGICA_FUZZY_E_APLICACOES>. Citado na p. 23.
- HERMAN; SURANTHA, N. Smart hydroculture control system based on IoT and fuzzy logic. **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, ICIC International, v. 16, p. 207–221, 1 fev. 2020. ISSN 13494198. DOI: 10.24507/ijicic.16.01.207. Citado na p. 27.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Atlas do Espaço Rural Brasileiro**. 2017. Accessed: 2024-10-09. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/atlasrural/pdfs/01_00_Texto.pdf>. Citado na p. 15.
- JARARWEH, Y.; FATIMA, S.; JARRAH, M.; ALZU'BI, S. Smart and sustainable agriculture: Fundamentals, enabling technologies, and future directions. **Computers and Electrical Engineering**, Elsevier, v. 110, p. 108799, 2023. Citado na p. 20.

- KELLER, E. A.; RAKHMATOV, I. A. **Fuzzy Logic: Principles and Applications**. Berlin, Germany: Springer, 2023. ISBN 978-3-030-84825-3. Citado na p. 24.
- KOWALSKI, P.; JANI, A. The Use of IoT in Precision Agriculture to Bridge the Gap in Small Scale Farming. **International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering**, v. 12, n. 5, p. 41–58, 2020. Citado na p. 14.
- KUMAR, R.; SINGH, A.; SHARMA, V. Automated Agricultural Machinery Using Fuzzy Logic. **Journal of Agricultural Engineering**, Institute of Agricultural Engineers, v. 25, n. 1, p. 45–57, 2018. Citado na p. 28.
- LIU, Y.; MA, X.; SHU, L.; HANCKE, G. P.; ABU-MAHFOUZ, A. M. From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. **IEEE transactions on industrial informatics**, IEEE, v. 17, n. 6, p. 4322–4334, 2020. Citado na p. 19.
- LOPEZ, C.; MARTINEZ, A.; RODRIGUEZ, J. Environmental Monitoring in Greenhouses Using Fuzzy Logic. **International Journal of Smart Agriculture**, Smart Agriculture Press, v. 12, n. 4, p. 200–212, 2020. Citado na p. 27.
- MADHUMATHI, R.; ARUMUGANATHAN, T.; SHRUTHI, R. Soil Nutrient Detection and Recommendation Using IoT and Fuzzy Logic. **Computer Systems Science and Engineering**, Tech Science Press, v. 43, p. 455–469, 2 2022. ISSN 02676192. DOI: [10.32604/csse.2022.023792](https://doi.org/10.32604/csse.2022.023792). Citado na p. 22.
- MAGALHÃES, R.; VENDRAMINI, A. Os Impactos da Quarta Revolução Industrial. **GV executivo**, v. 17, n. 1, p. 41, 2018. Acesso em: 31 out. 2024. Citado na p. 15.
- MAMDANI. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. **Elsevier**, v. 6, p. 1182–1191, 1 dez. 1977. DOI: [10.1109/TC.1977.1674779](https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779). Citado na p. 22.
- MARRO, A. A.; CARVALHO SOUZA, A. M. de; SOUSA CAVALCANTE, E. R. de; BEZERRA, G. S.; OLIVEIRA NUNES, R. de. **Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações**. Natal – RN – Brasil, 2000. Accessed: 2024-11-01. Citado na p. 24.
- MCCARTHY, J.; MINSKY, M.; ROCHESTER, N.; SHANNON, C. E. **A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955**. AI Magazine, 2006. v. 27, p. 12–14. Citado na p. 18.
- MENDONÇA, V.; SANTOS, M.; MUÑOZ, D. M.; LLANOS, C. H. Fuzzy Logic for Assessing the Health of a Corn Crop within Family Farming. In: IEEE. PROCEEDINGS of the IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA CCI 2024). Colômbia, 2024. Disponível em: <https://ieeepress.org/la-cci2024/>. Citado nas pp. 16, 54.

- MILHO, E. **Variedade de milho é opção de baixo investimento com boa relação custo-benefício**. 2024. Acesso em: 31 out. 2024. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46885306/variedade-de-milho-e-opcao-de-baixo-investimento-com-boa-relacao-custo-beneficio>>. Citado na p. 14.
- MITRA, A.; VANGIPURAM, S. L.; BAPATLA, A. K.; BATHALAPALLI, V. K.; MOHANTY, S. P.; KOUGIANOS, E.; RAY, C. Everything you wanted to know about smart agriculture. **arXiv preprint arXiv:2201.04754**, 2022. Citado na p. 19.
- MUHAMMED, D.; AHVAR, E.; AHVAR, S.; TROCAN, M.; MONTPETIT, M. J.; EHSANI, R. **Artificial Intelligence of Things (AIoT) for smart agriculture: A review of architectures, technologies and solutions**. v. 228. Academic Press, ago. 2024. DOI: [10.1016/j.jnca.2024.103905](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2024.103905). Citado na p. 19.
- NIBIR, R.; HASSAN, J.; BOKANI, A.; RAY, B. Fuzzy Logic based Trajectory Optimization for Livestock Health Monitoring using Internet of Drones (IoD). In: 2023 13th International Conference on Cloud Computing, Data Science Engineering (Confluence). 2023. P. 692–697. DOI: [10.1109/Confluence56041.2023.10048844](https://doi.org/10.1109/Confluence56041.2023.10048844). Citado nas pp. 16, 20.
- NILSSON, N. J. **Artificial Intelligence: A New Synthesis**. Morgan Kaufmann, 1998. Citado na p. 18.
- PEREIRA NETO, M. A. **O Uso da Tecnologia Blockchain Aplicada às Relações Contratuais no Agronegócio como Ferramenta de Proteção aos Direitos à Saúde, à Segurança Alimentar e ao Ambiente Saudável**. 2023. Diss. (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Acesso em: 31 out. 2024. Disponível em: <<https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/6339>>. Citado na p. 15.
- PINTO, A. **Natureza e implicações da “heterogeneidade estrutural” da América Latina**. vol. 2, pp. 567-588. Cinquenta anos de pensamento na CEPAL. Rio de Janeiro/São Paulo: Record, 2000. Citado na p. 19.
- PROGRAMA Porteira pra Dentro. 2024. Acesso em: 13 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.agricultura.df.gov.br/programa-porteira-pra-dentro/#:~:text=0%20Porteira%20para%20Dentro%20busca,dentro%20das%20propriedades%20e%20infraestrutura.>>. Citado na p. 20.
- RADCLIFFE, D.; FINNERAN, E. Smart farming: Bridging smallholders’ technology gap. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 12–25, 2019. Citado na p. 14.

- ROSINI, P.; SILVA, R. Agricultura Familiar e o uso de Tecnologias na Agricultura 4.0: Desafios e Perspectivas no Brasil. **Revista de Estudos Agrários**, v. 14, n. 1, p. 89–107, 2021. Citado na p. 15.
- ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. McGraw-Hill, 1995. Citado na p. 22.
- RUSSELL, S.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 4th: Pearson, 2020. Citado na p. 18.
- SABRI, N.; ALJUNID, S. A.; AHMAD, R. B.; MALEK, M.; YAHYA, A.; KAMARUDDIN, R.; SALIM, M. Smart prolong fuzzy wireless sensor-actor network for agricultural application. **Journal of Information Science and Engineering**, Institute of Information Science Academia Sinica, v. 28, n. 2, p. 295–316, 2012. Citado na p. 22.
- SANDRI, S.; CORREA, C. **Lógica Nebulosa**. Citado na p. 24.
- SCHNEIDER, F.; COSTA, J. Tecnologias de monitoramento para pequenos produtores: um estudo de caso no Brasil. **Revista de Tecnologia e Sustentabilidade**, v. 12, n. 2, p. 35–48, 2016. Citado na p. 13.
- SCHNEIDER, S. **A pluriatividade na agricultura familiar**. 2nd ed.: Editora da UFRGS, 2003. P. 250. ISBN 9788538600404. DOI: <https://doi.org/10.7476/9788538603894>. Citado na p. 20.
- SILVA, J.; SANTOS, M.; PEREIRA, L. Fuzzy Logic Based Smart Irrigation System. **Journal of Agricultural Informatics**, Agricultural Informatics Association, v. 10, n. 2, p. 123–135, 2019. Citado na p. 27.
- TECHNOLOGY, M. I. of. **MIT App Inventor**. 2024. Accessed: 2024-11-03. Disponível em: <https://appinventor.mit.edu/>. Citado na p. 41.
- XFUZZY. **Fuzzy logic design tools - Xfuzzy 25th**. Universid de Sevilla, 2018. Disponível em: <http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/>. Citado nas pp. 32, 36.
- XIAOHUA, M. **Application of artificial intelligence in computer network technology**. 2023. P. 182–186. DOI: [10.1109/AIARS59518.2023.00043](https://doi.org/10.1109/AIARS59518.2023.00043). Citado na p. 18.
- ZADEH, L. A. **Fuzzy S e t s ***. v. 8. 1965. P. 338–353. Citado nas pp. 21, 24.
- ZHANG, W.; LIU, M.; CHEN, H. Fuzzy Logic Controller for Soil Nutrient Management. **Soil Science and Plant Nutrition Journal**, Agricultural Research Society, v. 15, n. 3, p. 89–102, 2021. Citado na p. 27.
- ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy set theory—and its applications**. Springer Science & Business Media, 2011. Citado na p. 22.

Apêndices

APÊNDICE A – Códigos de programação

A.1 Implementação do Sistema Fuzzy na Ferramenta XFuzzy

Código A.1 – Código Xfuzzy

```

1 operatorset opset {
2     and xfsg.min();
3     or xfl.max();
4     defuz xfl.FuzzyMean();
5 }
6
7 type cor [0.0,1.0;256] {
8     amarelada xfl.trapezoid(-0.25,0.0,0.05,0.5);
9     VerdeEscuro xfl.triangle(0.25,0.5,0.75);
10    VerdeClaro xfl.trapezoid(0.5,0.95,1.0,1.25);
11 }
12
13 type area [0.0,2.0;256] {
14     PoucoDesenvolvida xfl.trapezoid(-0.001,0.0,0.05,0.9);
15     Desenvolvida xfl.triangle(0.5,1.0,1.5);
16     MuitoDesenvolvida xfl.trapezoid(1.1,1.9,2.0,2.1);
17 }
18
19 type saude [0.0,100.0;256] {
20     PF xfl.trapezoid(-0.001,0.0,20.0,40.0);
21     F xfsg.triangle(20.0,50.0,80.0);
22     MF xfl.trapezoid(60.0,80.0,100.0,101.0);
23 }
24
25 type umidade [0.0,1.0;256] {
26     baixa xfl.trapezoid(-0.001,0.0,0.1,0.5);
27     ideal xfl.triangle(0.1,0.5,0.8);
28     alta xfl.trapezoid(0.6,0.8,1.0,1.25);
29 }
30
31 type pH [0.0,1.0;256] {
32     baixo xfl.trapezoid(-0.001,0.0,0.25,0.5);
33     bom xfl.triangle(0.25,0.5,0.75);
34     alto xfl.trapezoid(0.5,0.75,1.0,1.25);
35 }
36
37 type global1 [0.0,1.0;256] {

```

```

38   baixa xfl.trapezoid(-0.001,0.0,0.01,0.5);
39   ideal xfl.triangle(0.1,0.5,0.9);
40   alta xfl.trapezoid(0.55,0.99,1.0,1.25);
41 }
42
43 type saude2 [0.0,1.0;256] {
44   Poucosaudavel xfl.trapezoid(-0.001,0.0,0.02,0.5);
45   saudavel xfl.triangle(0.1,0.5,0.85);
46   MuitoSaudavel xfl.trapezoid(0.5,0.99,1.0,1.25);
47 }
48
49 type tem [0.0,50.0;256] {
50   mf0 xfl.trapezoid(-12.5,0.0,12.5,25.0);
51   mf1 xfl.triangle(12.5,25.0,37.5);
52   mf2 xfl.trapezoid(25.0,37.5,50.0,62.5);
53 }
54
55 rulebase saida1 (umidade umidade, pH pH : global1 global1) using
    opset {
56   if(umidade == baixa & pH == baixo) -> global1 = baixa;
57   if(umidade == baixa & pH == bom) -> global1 = baixa;
58   if(umidade == baixa & pH == alto) -> global1 = baixa;
59   if(umidade == ideal & pH == baixo) -> global1 = ideal;
60   if(umidade == ideal & pH == bom) -> global1 = ideal;
61   if(umidade == ideal & pH == alto) -> global1 = ideal;
62   if(umidade == alta & pH == baixo) -> global1 = alta;
63   if(umidade == alta & pH == bom) -> global1 = alta;
64   if(umidade == alta & pH == alto) -> global1 = alta;
65 }
66
67 rulebase saida2 (global1 global, cor cor, area area : saude2
    saude) using opset {
68   if(global == baixa & cor == amarelada & area ==
        PoucoDesenvolvida) -> saude = Poucosaudavel;
69   if(global == baixa & cor == amarelada & area == Desenvolvida) ->
        saude = Poucosaudavel;
70   if(global == baixa & cor == amarelada & area ==
        MuitoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
71   if(global == baixa & cor == VerdeEscuro & area ==
        PoucoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
72   if(global == baixa & cor == VerdeEscuro & area == Desenvolvida)
        -> saude = saudavel;
73   if(global == baixa & cor == VerdeEscuro & area ==
        MuitoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
74   if(global == baixa & cor == VerdeClaro & area ==
        PoucoDesenvolvida) -> saude = Poucosaudavel;
75   if(global == baixa & cor == VerdeClaro & area == Desenvolvida)
        -> saude = saudavel;
76   if(global == baixa & cor == VerdeClaro & area ==
        MuitoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
77   if(global == ideal & cor == amarelada & area ==
        PoucoDesenvolvida) -> saude = Poucosaudavel;

```

```

78  if(global == ideal & cor == amarelada & area == Desenvolvida) ->
    saude = saudavel;
79  if(global == ideal & cor == amarelada & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = MuitoSaudavel;
80  if(global == ideal & cor == VerdeEscuro & area ==
    PoucoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
81  if(global == ideal & cor == VerdeEscuro & area == Desenvolvida)
    -> saude = saudavel;
82  if(global == ideal & cor == VerdeEscuro & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = MuitoSaudavel;
83  if(global == ideal & cor == VerdeClaro & area ==
    PoucoDesenvolvida) -> saude = MuitoSaudavel;
84  if(global == ideal & cor == VerdeClaro & area == Desenvolvida)
    -> saude = MuitoSaudavel;
85  if(global == ideal & cor == VerdeClaro & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = MuitoSaudavel;
86  if(global == alta & cor == amarelada & area ==
    PoucoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
87  if(global == alta & cor == amarelada & area == Desenvolvida) ->
    saude = Poucosaudavel;
88  if(global == alta & cor == amarelada & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
89  if(global == alta & cor == VerdeEscuro & area ==
    PoucoDesenvolvida) -> saude = Poucosaudavel;
90  if(global == alta & cor == VerdeEscuro & area == Desenvolvida)
    -> saude = saudavel;
91  if(global == alta & cor == VerdeEscuro & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = saudavel;
92  if(global == alta & cor == VerdeClaro & area ==
    PoucoDesenvolvida) -> saude = Poucosaudavel;
93  if(global == alta & cor == VerdeClaro & area == Desenvolvida) ->
    saude = saudavel;
94  if(global == alta & cor == VerdeClaro & area ==
    MuitoDesenvolvida) -> saude = MuitoSaudavel;
95  }
96
97  system (umidade umidade, pH pH, cor cor, area area : saude2
    saude2) {
98    saida1(umidade, pH : i0);
99    saida2(i0, cor, area : saude2);
100 }

```