



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL -
PPGECA

LIDIANE MARINHO TEIXEIRA

ANÁLISE QUALITATIVA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO SISTEMA DE
INFERÊNCIA FUZZY

CAMPINA GRANDE - PB

2023

LIDIANE MARINHO TEIXEIRA

ANÁLISE QUALITATIVA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO SISTEMA DE
INFERÊNCIA FUZZY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof.^a. Dr.^a. Andréa Carla Lima Rodrigues.

Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a. Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda

CAMPINA GRANDE

2023

T266a Teixeira, Lidiane Marinho.
Análise qualitativa de água subterrânea utilizando sistema de inferência Fuzzy / Lidiane Marinho Teixeira. - Campina Grande, 2023.
101 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.
"Orientação: Profa. Dra. Andréa Carla Lima Rodrigues, Profa. Dra. Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda."
Referências.

1. Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos. 2. Saneamento Ambiental. 3. Resolução CONAMA nº 396/08. 4. Modelagem Matemática. 5. Qualidade da Água. I. Rodrigues, Andréa Carla Lima. II. Roveda, Sandra Regina Monteiro Masalskiene. III. Título.

CDU 556.18(043)

LIDIANE MARINHO TEIXEIRA

ANÁLISE QUALITATIVA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO REQUISITO À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada em: 16/12/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dr.^a. Andréa Carla Lima Rodrigues.
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof.^a. Dr.^a. Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Prof.^a. Dr.^a. Dayse Luna Barbosa
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof.^o. Dr.^o. Henrique Ewbank de Miranda Vieira
Centro Universitário, FACENS

**CAMPINA GRANDE - PB
2023**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
 POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
 Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

2. **ALUNO(A): LIDIANE MARINHO TEIXEIRA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a ANDRÉA CARLA LIMA RODRIGUES - PPGECA/UFMG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR.^a SANDRA REGINA MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA - COORIENTADORA, DR.^a DAYSE LUNA BARBOSA - UFGM – EXAMINADORA INTERNA, DR. HENRIQUE EWBANK DE MIRANDA VIEIRA – FACENS – EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 65/2022). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE QUALITATIVA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA UTILIZANDO SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL / HORA DE INÍCIO: 14:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: POR VÍDEO CONFERÊNCIA.**

3. **EM SESSÃO REALIZADA POR VÍDEO CONFERÊNCIA, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDO O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**

4. **CAMPINA GRANDE, 16 DE DEZEMBRO DE 2022**

5.

6.

7.

8. **SANDRA REGINA MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA - COORIENTADORA**

9.

10.

11.

12. **HENRIQUE EWBANK DE MIRANDA VIEIRA – FACENS – EXAMINADOR EXTERNO**



Documento assinado digitalmente
 HENRIQUE EWBANK DE MIRANDA VIEIRA
 Data: 08/02/2023 21:09:15-0300
 Verifique em <https://verificador.iti.br>



Documento assinado eletronicamente por **ANDREA CARLA LIMA RODRIGUES, PROFESSOR**, em 20/12/2022, às 09:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON LAURENTINO DOS SANTOS, SECRETÁRIO (A)**, em 20/12/2022, às 10:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DAYSE LUNA BARBOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/12/2022, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lidiane Marinho Teixeira, Usuário Externo**, em 22/12/2022, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda, Usuário Externo**, em 22/12/2022, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2983915** e o código CRC **8239744F**.

À Deus, minha família e meu esposo aos quais eu sinto amor em grandeza que não pode ser expressa em termos linguísticos.

AGRADECIMENTOS

À Deus que tem me amparado e me sustentado, em todas as vezes que eu pensei em desistir me mostrou a direção, me concedeu sabedoria, força e determinação para alcançar os meus objetivos.

À minha família pelo apoio e incentivo nesse árduo caminho, em especial a minha irmã Cássia, que abriu as portas da sua casa e da sua família e me recebeu no momento mais difícil da minha vida. Meu querido esposo Caio Raveli Freitas Barbosa, que todos os dias me anima, incentiva e me encoraja, sou grata a Deus pela sua vida.

Às minhas orientadoras, as professoras Dr^a. Andréa Carla Lima Rodrigues e Dr^a Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda, por todo incentivo, cuidado, paciência e confiança durante o mestrado. Minha admiração por toda a dedicação e empenho ao ensino e a pesquisa, vocês fizeram os meus dias mais leves. Ao professor Dr. José Arnaldo Frutuoso Roveda que prontamente se disponibilizou em me ensinar a Lógica Fuzzy.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, que contribuíram para a minha formação acadêmica e aos demais funcionários que conduzem esse programa.

Aos meus colegas de curso, que mesmo distante contribuíram e dividiram a minha carga, minhas companheiras de trabalho Glauce Lene Rufino Chaves, Regina Maria Pereira, Sabrina Holanda e aos meus amigos pelo incentivo ao ingresso do mestrado, Leília Mara, Juliana Filgueras e Miguel Adriano Gonçalves Cirino. Aos meus amigos Petrônio Olivera e Jonilson Michel Galvão que dividiram seu conhecimento comigo e por horas de dedicação ao aprendizado de Lógica Fuzzy. Aos meus pais, sobrinhos, cunhados, amigos que me ajudaram a desenvolver meu trabalho, com apoio e conhecimento.

Aos profissionais da área de recursos hídricos que contribuíram para minha pesquisa, meus agradecimentos. E a companhia de água e esgoto do Ceará por prontamente contribuir para o desenvolvimento do meu trabalho e da comunidade acadêmica.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPEGCA e a CNPq pelo apoio no desenvolvimento do meu trabalho.

E, por fim, agradeço a banca composta pela professora Dr^a Dayse Luna Barbosa e ao Dr^o Henrique Ewbank de Miranda Vieira, por aceitarem nosso convite e contribuírem com o desenvolvimento do meu trabalho.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.
(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

A água é o principal elemento do ciclo hidrológico, recurso natural renovável e indispensável para as atividades humanas, porém considerado como finito. Atualmente, a qualidade das águas subterrâneas no Brasil vem constantemente se degradando devido ao aumento exponencial de fontes poluidoras. O crescimento populacional, a urbanização, a deficiência no sistema de esgotamento sanitário e as alterações climáticas destacam-se como as principais causas da má qualidade dos recursos hídricos. Conhecendo a importância e a carência de disponibilidade na forma potável, vê-se a urgente necessidade de sua preservação a fim de mitigar os efeitos da sua escassez. Em regiões semiáridas ou em locais com gestão inadequada, a conservação desse recurso é um grande desafio. Este trabalho trata do desenvolvimento do Índice de Qualidade de Água Subterrânea por meio dos sistemas de Inferência Fuzzy do tipo Mamdani – IQASF. O índice de qualidade é uma importante ferramenta para interpretação de dados qualitativos. A qualidade da água é baseada na agregação dos valores de vários parâmetros: turbidez, sólidos totais dissolvidos, pH, nitrito, nitrato, cloreto, coliformes totais e E.coli. Os parâmetros foram agrupados por características afins em três dimensões: físicas, químicas e bacteriológicas que posteriormente geraram o Índice de qualidade de água subterrânea (IQASF). Finalmente, após o desenvolvimento do IQASF, o modelo foi aplicado em um estudo de caso de Juazeiro do Norte - CE, Brasil, em 36 poços de diferentes características. O IQASF determina a qualidade de água subterrânea bruta dos poços, utilizando como referência os valores máximos permitidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008, os intervalos entre os valores foram estabelecidos com o auxílio de especialistas. Os resultados obtidos na aplicação do IQASF apontaram que a maioria dos poços apresentam ótima qualidade. No entanto, alguns poços têm persistência de classificação de baixa qualidade, indicando a necessidade de monitoramento constante. A partir do diagnóstico dos poços estudados, foi verificada a veracidade do IQASF. De forma geral, o IQASF mostrou-se muito útil no rastreamento de mudanças na qualidade da água em um determinado local de amostragem ao longo do tempo, podendo ser aplicado em benefício de uma gestão eficaz, auxiliando os tomadores de decisão.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos subterrâneos; Resolução CONAMA nº 396/08; Modelagem matemática.

ABSTRACT

Water is the main element of the hydrological cycle, a renewable and indispensable natural resource for human activities, but considered finite. Currently, the quality of groundwater in Brazil is constantly degrading due to the exponential increase in polluting sources. Population growth, urbanization, deficiency in the sanitary sewage system and climate change stand out as the main causes of the poor quality of water resources. Knowing the importance and lack of availability in potable form, there is an urgent need for its preservation to mitigate the effects of its scarcity. In semi-arid regions or in places with inadequate management, the conservation of this resource is a major challenge. This work deals with the development of the Groundwater Quality Index through Mamdani-type Fuzzy Inference systems – IQASF. The quality index is an important tool for interpreting qualitative data. Water quality is based on the aggregation of the values of several parameters: turbidity, total dissolved solids, pH, nitrite, nitrate, chloride, total coliforms and E.coli. The parameters were grouped by similar characteristics in three dimensions: physical, chemical, and bacteriological, which later generated the Groundwater Quality Index (IQASF). Finally, after developing the IQASF, the model was applied in a case study in Juazeiro do Norte - CE, Brazil, in 36 wells with different characteristics. The IQASF determines the raw groundwater quality of the wells, using the maximum values allowed by CONAMA Resolution No. 396/2008 as a reference, the intervals between values were established with the help of specialists. The results obtained in the application of the IQASF indicated that most of the wells have excellent quality. However, some wells have poor grade persistence, indicating the need for constant monitoring. From the diagnosis of the wells studied, the veracity of the IQASF was verified. In general, the IQASF proved to be very useful in tracking changes in water quality in each sampling site over time and can be applied to the benefit of effective management, helping decision makers.

Keywords: Management of underground water resources; CONAMA Resolution No. 396/08; Mathematical modeling.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Objetivo geral.....	17
1.2 Objetivo específico.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Segurança hídrica	18
2.2 Águas Subterrâneas: aspectos quantitativos e qualitativos	19
2.3 Gestão de Águas Subterrâneas	23
2.4 Ferramentas de Apoio a Gestão das Águas Subterrânea.....	25
2.5 Teoria dos Conjuntos Fuzzy.....	27
2.5.1 Conceitos fundamentais.....	29
2.6 Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF)	30
2.6.1 Módulo de Fuzzificação	31
2.6.2 Base de Regras.....	32
2.6.3 Inferência Fuzzy	32
2.6.4 Defuzzificação	33
3 METODOLOGIA	33
3.1 Natureza da Pesquisa.....	33
3.2 Caracterização da área de estudo	35
3.2.1 Aspectos Gerais	35
3.2.2 Aspectos Ambientais	36
3.2.3 Disponibilidade Hídrica.....	36
3.2.4 Caracterização do sistema de esgotamento sanitário.....	39
3.3 Coleta dos Dados.....	39
3.4 Modelo Fuzzy para o índice de Qualidade de Águas Subterrânea.....	40
3.4.1 Definição das variáveis de entrada	40
3.4.2 Elaboração da Arquitetura Geral do Modelo Fuzzy	41
3.4.3 Consulta a especialistas	42
3.4.4 Fuzzificação.....	42
3.5 Implementação na Linguagem de Programação R.	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1 Resultados do diagnóstico dos poços	52

4.2 Aplicação do modelo Fuzzy desenvolvido.....	58
4.2.1 Análises dos resultados do modelo IQASF escala semestral.....	58
4.2.2 Análises dos resultados do modelo IQASF proposto mensal.....	65
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	76
REFERÊNCIAS.....	78
APÊNDICE A - Consulta aos especialistas sobre os intervalos dos indicadores que compõem o Índice de Qualidade de Água Subterrânea	96
APÊNDICE B – Base de regras dos grupos: Químicos, Bacteriológicos e Intermediário	98

Lista de Ilustração

Figura 1: Comparativo entre a Lógica Clássica e Lógica Fuzzy	28
Figura 2: Funções de Pertinência: (a) Triangular (b) Trapezoidal (c) Sigmoidal (d) função de	29
Figura 3: Módulos para a elaboração de Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF)	31
Figura 4: Variável Linguística da Alteração do pH.....	32
Figura 5: Fluxograma das Etapas do Estudo	34
Figura 6: Localização da Área de Estudo – Juazeiro do Norte/CE	35
Figura 7: Índice de abastecimento de Juazeiro do Norte.....	36
Figura 8: Localização dos Poços de Juazeiro do Norte	37
Figura 9: Arquitetura Geral do Modelo Fuzzy do índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy.....	42
Figura 10: Termos linguísticos do grupo Físico	43
Figura 11: Fuzzificação de parâmetros da qualidade da água	46
Figura 12: Inferência fuzzy- Exemplo do grupo Físico.....	49
Figura 13: Exemplo Defuzzificação do grupo Físico.....	49
Figura 14: Gráfico de superfície do grupo Físico.....	51
Figura 15: Ausência de esgotamento sanitário, bairro João Cabral	53
Figura 16: (A) e (B) - lançamento de esgoto no Riacho dos Macacos, (C) localização do PT-03 e (D) e distância do PT-03 ao lançamento de esgoto.....	54
Figura 17: Variação da precipitação de Juazeiro do Norte em 2021	62
Figura 18: Índice de qualidade da água dos poços estudados por semestre.....	62
Figura 19: Distribuição espacial da qualidade dos Poços.....	64
Figura 20: Evolução dos valores obtidos 2021 e 2022 nas três dimensões e IQASF - POA Leste.....	67
Figura 21: Evolução dos valores obtidos 2021 e 2022 nas três dimensões e IQASF - POA Central.....	69
Figura 22: Evolução dos valores obtidos 2021 e 2022 nas três dimensões e IQASF - POA Oeste	72

Lista de Tabelas

Tabela 1: Caracterização dos Poços Estudados	38
Tabela 2: Variáveis monitoradas e métodos para análises.....	40
Tabela 3: Descrição das variáveis de entrada e de saída do IQASF	43
Tabela 4: Descrição das variáveis de entrada e de saída do Sistema Intermediário	46
Tabela 5: Descrição dos termos linguísticos do Sistema Final IQASF	47
Tabela 6: Poços com teores de nitrato acima do valor máximo permitido	52
Tabela 7: Poços com presença de Coliformes Totais e E.coli, resultados semestrais	55
Tabela 8: Classificação dos poços do POA - Leste	65
Tabela 9: Classificação dos Poços do POA Central	68
Tabela 10: Classificação dos Poços do POA Oeste	71
Tabela 11: Classificação dos poços quanto a qualidade das águas.....	73

Lista de Quadros

Quadro 1: Variáveis de entrada do modelo fuzzy para criação do IQASF.....	41
Quadro 2: Base de Regra do Grupo Físico	48
Quadro 3: Classificação dos poços por semestre	61

Lista de Quadros Apêndice

Quadro A 1: Base de Regras do Grupo Químico.....	98
Quadro A 2: Base de Regras do Grupo Bacteriológico	100
Quadro A 3: Base de Regras do Grupo Intermediário	100

1 INTRODUÇÃO

A água, substância química, maior parte fluida de todos os seres e principal elemento do ciclo hidrológico, apesar de ser um recurso natural renovável é, hoje, considerado como finito, e de suma importância para a manutenção da vida no planeta Terra (RIBEIRO e ROLIM, 2017).

A necessidade pelo recurso hídrico sempre acompanhou a sociedade. A partir do momento que o homem deixou a vida nômade e passou a ter a vida de forma sedentária, a captação da água se tornou indispensável, sendo um bem essencial (DONATO et al., 2017). Porém parte das águas superficiais e subterrâneas disponíveis na natureza apresentam parâmetros físico-químicos e bacteriológicos divergentes dos padrões exigidos pelo Ministério de Saúde para o consumo humano e agrícola.

Diante da sua importância e conhecendo a carência de disponibilidade na forma potável (ONU, 2020), vê-se o valor desse bem e a necessidade de preservação, a fim de mitigar os efeitos da má distribuição e escassez. De acordo com Von Sperling (1996), a disponibilidade de água em potabilidade, cada vez mais, não está de acordo com o consumo da população.

Os usos múltiplos de águas subterrâneas e superficiais são imprescindíveis para as atividades humanas e a qualidade desse recurso possui relação direta com o uso do solo, desmatamento e impermeabilização (TUCCI, 2016). As águas subterrâneas são oriundas da capacidade de armazenamento, provenientes do escoamento natural do ciclo hidrológico (GONÇALVES et al., 2019). Considerando o aumento crescente de urbanização, industrialização e agricultura esse recurso vem sendo explorado potencialmente, tornando-se importante tanto o seu gerenciamento como a sua preservação.

A conservação dos recursos hídricos é um grande desafio para as gerações presentes e futuras, pois compreende a manutenção tanto qualitativa como quantitativa. Dessa forma, é necessário um desenvolvimento de gestão da sustentabilidade da água subterrânea (PEIXOTO, 2019). Na região semiárida brasileira a conservação e o estudo sobre a qualidade das águas subterrâneas são vitais, pois a partir de sua exploração é garantido o abastecimento de comunidades, da agricultura e indústrias locais (GOMES e CAVALCANTE, 2017).

Hirata et al., (2019) afirmam que as águas subterrâneas exercem grande importância para a população, pois são utilizadas para diversos fins, sendo 30% destinadas ao atendimento doméstico, 24% para agropecuária, 22% são distribuídos entre atividades urbanas, lazer e outros, 14% para abastecimentos múltiplos e, 10% para serviços industriais. Em algumas cidades nas regiões semiáridas brasileiras a água subterrânea é o único recurso hídrico disponível para consumo humano.

A falta de gerenciamento adequado pode provocar contaminação do aquífero, impactando diretamente a saúde humana, principalmente quando não há um monitoramento sobre a qualidade desses recursos. Para Jesus et al. (2021), dentre as atividades antrópicas, os serviços industriais são grandes potenciais poluidores das águas subterrâneas.

Diante da emblemática sobre a conservação dos mananciais subterrâneos, a análise da qualidade torna-se uma importante ferramenta para interpretação de dados qualitativos, o que possibilita a tomada de decisão na melhor gestão do uso das águas.

A qualidade desse recurso deve ser suficiente para satisfazer as necessidades humanas, atividades econômicas e conservação de ecossistemas aquáticos (ANA, 2019), a situação se agrava no semiárido brasileiro devido ao uso insustentável dessas águas, a grande demanda e a redução dos recursos, provocando a degradação da sua qualidade (CAETANO et al., 2020).

Para avaliar a qualidade de água existem índices baseados em alguns parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, como o WQI - NSF, criado em 1970 pela *National Sanitation Foundation* (Fundação Nacional de Saneamento). Em 1975, a CETESB iniciou a utilização do WQI - NSF e acrescentou alguns outros índices, entre eles o Índice de Qualidade de Água Subterrânea. A grande problemática é que esses índices não trabalham na prevenção do caimento da qualidade dos parâmetros e sim para indicar se aquele recurso hídrico se classifica dentro dos valores máximos permitidos.

Segundo Santi et al. (2018), o índice é uma ferramenta importante que incentiva uma gestão baseada no cumprimento de metas, mensurando a variabilidade e corrigindo a operação de um processo. A utilização de modelos matemáticos tem sido frequente na criação de índices, auxiliando o gestor na tomada de decisão, pois é um instrumento importante para a construção de bases quantitativas de apoio ao gerenciamento dos recursos hídricos. Por conseguinte, é necessário a criação de um índice numérico que possibilite quantificar a qualidade da água subterrânea (PEREIRA BORGES et al., 2019).

A Teoria dos Conjuntos Fuzzy tem sido comumente usada para lidar com a informação imprecisa, com sentido não-probabilística, permitindo a integração de vários parâmetros para a modelagem e processo de avaliação. Esta teoria tem se mostrado útil na elaboração de índices sobretudo por incorporar as incertezas dos parâmetros e trabalhar com os aspectos qualitativos das variáveis, auxiliando, assim, na tomada de decisão sobre sistemas complexos.

Considerando a complexidade da água subterrânea e as incertezas inerentes, faz-se necessário a criação de índice que auxilie a interpolar e prever valores e que também meça a incerteza dos parâmetros. Assim optou-se pela utilização da lógica Fuzzy, pois essa

metodologia consegue trabalhar com os aspectos qualitativos e incorpora as incertezas presentes em cada parâmetro de qualidade de água subterrânea.

Este estudo busca contribuir com a gestão de recursos hídricos no que se refere a uma metodologia de classificação da qualidade de águas subterrâneas, que ofereça subsídios para os tomadores de decisão na melhoria de monitoramento dos poços. Tal proposta é aplicada para análise da qualidade de água subterrânea do município de Juazeiro do Norte, localizado no sul do estado do Ceará, na região do Cariri semiárido nordestino, cujo abastecimento é realizado exclusivamente por águas subterrâneas. O município está inserido na bacia hidrográfica do Salgado, com as principais drenagem riacho dos Macacos e do rio Salgado.

1.1 Objetivo geral

Criar um Índice de Qualidade de Água Subterrânea através do sistema de Inferência Fuzzy do tipo Mamdani para municípios que possuem esse tipo de abastecimento como fonte principal.

1.2 Objetivo específico

Existem diversas finalidades para o alcance do objetivo geral, assim destacam-se as principais, quais sejam:

- Selecionar os parâmetros de qualidade de água subterrânea mais relevantes para o desenvolvimento do Índice;
- Desenvolver um modelo Fuzzy para a gerar o índice de qualidade de água subterrânea;
- Realizar experimentos computacionais para avaliar o desempenho do modelo Fuzzy;
- Analisar a qualidade de água subterrânea para o abastecimento no município de Juazeiro do Norte a partir da aplicação do Índice criado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Segurança hídrica

Os recursos hídricos são vitais para a subsistência humana e são igualmente importantes para o desenvolvimento social e econômico (ENGELBRECHT et al., 2019). Paul Obade e Moore (2018) afirmam que quando todas as pessoas têm acesso físico e econômico a água de forma suficiente, segura e limpa que atenda às necessidades básicas pode ser chamada de segurança hídrica, mas que esse recurso está sendo ameaçado pelos desastres ambientais, práticas indiscriminadas de manejo da terra e contaminantes.

O grande aumento populacional e o crescimento de atividades econômicas são também fatores determinantes para o comprometido e a disponibilidade hídrica do planeta (RIBEIRO et al., 2018). De acordo com os dados da *United Nations* de 2017 a projeção para o aumento populacional é de 30% em até 2050, com isso a grande preocupação é em relação à garantia de disponibilidade de água que atenda essa população.

A Lei Federal 9.433 de 1997 que rege o controle dos usos múltiplos da água e a disponibilidade hídrica, tem como objetivo central “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” (BRASIL, 1997).

A conservação dos recursos hídricos, compreende a manutenção das condições qualitativas dos reservatórios superficiais e subterrâneos e é um grande desafio para a atual e as futuras gerações. A exploração inadequada desse recurso pode comprometer a disponibilidade hídrica afetando diretamente a economia, o meio ambiente e as estruturas sociais (SANTOS, 2015).

A Assembleia Geral das Nações Unidas (ONU) estabeleceu uma resolução intitulada “*Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*” que traça várias metas para alcançar o desenvolvimento sustentável até 2030. O objetivo 6 do documento define porquê e como “garantir gestão sustentável da água de modo que haja disponibilidade, saneamento e higiene da água potável, apropriados e equitativos para todas as pessoas do planeta.

A organização estimou que, em média, a cada 90 segundos, uma criança morre de uma doença relacionada à água. A falta de água em aspectos qualitativos e quantitativos produz uma perda de aproximadamente 260 bilhões de dólares anuais, enquanto o acesso à água e

saneamento básico traria um benefício econômico anual de 32 bilhões de dólares (LAY-EKUAKILLE et al., 2019).

De acordo com Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (2018), a demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% ao ano, dessa forma a disponibilidade de água em padrão potável somada a outros fatores ambientais, pode acarretar o risco de escassez hídrica e estima-se que em 2050 1,8 milhão de pessoas serão atingidas pelas secas.

Esses dados alertam sobre a necessidade de uma gestão integrada dos recursos hídricos e de um monitoramento das águas, tanto sob aspectos quantitativos quanto qualitativos. Assim, para garantir fontes seguras de água potável, no presente e no futuro, é imperativo compreender a qualidade das águas superficiais e subterrâneas existentes (SINGHA et al., 2021). Nesta pesquisa será dada ênfase às reservas subterrâneas.

2.2 Águas Subterrâneas: aspectos quantitativos e qualitativos

A água subterrânea é uma parte essencial do sistema de suporte à vida e representa 35% do total de água doce disponível no planeta (JING et al., 2020; ADIMALLA e WU, 2019 e THOMAS, 2018). Segundo Hirata et al (2019), ela auxilia na sustentabilidade de outros sistemas aquáticos como rios, lagos, mangues e pântanos. Bertolo et al., (2019) identificam as principais funções ecossistêmicas como habitat, regulação, informação, produção, provisão, regulação, suporte e cultural.

De acordo com a resolução CONAMA nº 369/2008, as águas subterrâneas ocorrem naturalmente ou artificialmente no subsolo. Encontradas abaixo da superfície do solo, fazem preenchimento dos poros das rochas e dos sedimentos (HIRATA, et al., 2019). As águas subterrâneas são classificadas como livres e confinadas. Aquífero livre é aquele que está submetido a pressão atmosférica, sua área de recarga é toda a extensão do aquífero, o confinado sua pressão é maior que a da atmosférica permitindo a entrada ou saída de água pelo topo e/ou pela base por drenagem vertical (TUCCI e CABRAL, 2003; SUGUIO, 1998)

As águas subterrâneas têm suas extensões laterais sujeitas a alterações significativas em função da variação do nível do lençol freático (SOUZA et al., 2019), sendo importantes tanto para o equilíbrio da dinâmica da infiltração e escoamento, como para armazenamento para futuras demandas. Quando a extração da água subterrânea ultrapassa a recarga natural por longos períodos, os aquíferos sofrem depleção e o lençol freático começa a baixar (SANTOS, 2015).

As alterações climáticas também são fortemente responsáveis pela redução desse recurso (JING et al., 2020), pois podem mudar a quantidade de água infiltrada no solo, a percolação mais profunda e o aumento da temperatura que eleva a demanda evaporativa sobre a terra, o que limita a quantidade de água para reabastecer as águas subterrâneas (WU, ZHANG e ZHO., 2020).

Apesar de não serem consideradas como uma solução para a escassez hídrica, as águas subterrâneas são uma fonte importante, principalmente para o abastecimento público e consumo humano (BERTOLO et al., 2015). Segundo Li et al., (2018), a maioria dos recursos mundiais de água doce para consumo humano ocorre utilizando a água subterrânea e aproximadamente um terço da população mundial depende dessa fonte hídrica. Água subterrânea também suporta 40% da produção mundial de alimentos, fornecendo água de irrigação para a agricultura.

No Brasil as águas subterrâneas estão diretamente ligadas à segurança hídrica e são fundamentais para cumprir os compromissos da Agenda 2030. Estima-se que a disponibilidade de água subterrânea no país seja em torno de 14.650 m³/s (ANA, 2017).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento (2019) afirma que 52% dos 5.570 municípios brasileiros são abastecidos com águas subterrâneas, o seu uso é distribuído principalmente entre atendimento doméstico (30%), agropecuário (24%) e abastecimento público urbano (18%). Em regiões semiáridas a água subterrânea entra como opção de abastecimento quando a baixa pluviosidade gera ausência de rio permanente (JAFARI e MOSTAFAVI, 2019). É uma alternativa também para complemento do abastecimento industrial, fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de uma região (COSTA et al., 2020; GAYE e TINDIMUGAYA, 2019).

Entretanto, atividades antrópicas tais como: mudanças no uso da terra, o bombeamento inadequado de águas subterrâneas, uso excessivo da água e os efeitos indiretos da irrigação têm afetado a quantidade e qualidade desse recurso (LO e FAMIGLIETTI, 2013). Para Dangar, Asoka e Mishra, (2021) o bombeamento excessivo e sem planejamento de águas subterrâneas é um dos principais fatores de seu esgotamento. O contínuo e rápido aumento da demanda tem colocado imensa pressão sobre a disponibilidade de água subterrânea e aptidão (MALLIK, MISHRA e PAUL 2021).

A exploração desse recurso acontece por meio de poços tubulares que são obras de engenharia que permitem acesso a reservatórios de água subterrânea (aquíferos). Em 2019, cerca de 17.580 m³/ano (557 m³/s) foram exploradas por meio de poços tubulares no Brasil,

esse volume seria capaz de abastecer 217 milhões de pessoas (HIRATA et al., 2019; Trata Brasil, 2019).

Para o Trata Brasil (2019) não há como estimar o número correto de poços tubulares existentes no país, pois apesar da obrigatoriedade da outorga pelo uso da água o número de captações regulares e legais desse tipo de poço é de pouco mais de 1%.

No estado do Ceará, nordeste brasileiro, havia um total de 35.146 poços escavados em 2021, tendo um aumento de 14.275 poços escavados em relação a 2013. Quase metade desses poços não estão sendo utilizados para nenhuma atividade devido a soterramento e salinidade da água (SIAGAS, 2021; CPRM, 2000). Os poços com maior capacidade de produção do estado do Ceará estão localizados na região metropolitana do Cariri (ARAÚJO, 2022).

A segurança de abastecimento de água subterrânea é muitas vezes vista de uma perspectiva de quantidade, mas é necessário atentar-se também para os aspectos de qualidade, pois estes comprometem a segurança desse recurso (LAPWORTH et al., 2017).

A disponibilidade e a qualidade das águas subterrâneas não só influenciam no desenvolvimento industrial, agrícola e a urbanização, mas também afetam significativamente a segurança alimentar e energética, a sustentabilidade ambiental e a saúde humana (IAH, 2015). A saúde humana é afetada por questões relacionadas à escassez de água, pois com o esgotamento de água potável aumenta o risco de certas doenças com a ingestão da água má qualidade (AWADH, AL-MIMAR e YASEEN, 2020).

Em relação aos aspectos qualitativos, as águas subterrâneas são, em geral, consideradas de boa qualidade e possuem propriedades físico-químicas e bacteriológicas adequadas inclusive para o consumo humano (ZACARIA et al., 2020; ANA, 2017). Portanto, na maioria das vezes, não necessita de tratamento para o seu consumo, devido ao processo de filtragem natural do subsolo (FRANCO et al., 2018). Por apresentarem boa qualidade, podem ser utilizadas para múltiplos propósitos, quando comparados com águas superficiais (WU, ZHANG, e ZHOU et al., 2020). É um recurso importante para o desenvolvimento humano, fonte confiável fornecida em muitas áreas do mundo (ZACARIA et al., 2020).

A vulnerabilidade da qualidade de água subterrânea surge da complexa interação da dinâmica natural do ciclo hidrológico com as alterações físicas da superfície da terra, devido à exploração de recursos hídricos e emissões de resíduos provenientes de atividades antrópicas (BURRI, WEATHERL e MOECK, 2019). Essas atividades humanas atingem diretamente a qualidade das águas subterrâneas e são uma preocupação persistente e cada vez maior (LAPWORTH et al., 2017).

Existem diversas fontes potenciais de contaminação de águas subterrâneas, as que mais se destacam são deficiência e/ou ausência do sistema de esgotamento sanitário, contaminação por necrolixívia ocasionada por cemitérios e crescimento desordenado urbano (SILVA, 2020).

O abastecimento de água e o esgotamento sanitário são elementos importantes para as políticas ecológicas, sociais e econômicas (PIASECKI, 2019). Em áreas urbanas é comum a descarga de esgoto ou efluentes em superfícies terrestres próximas ou dentro de áreas de proteção de poços, principalmente quando não há controle sobre as fontes poluidoras (BARILARI, et al., 2020).

Do total de águas residuárias produzidas no mundo, cerca de 80% são lançadas em rios, mar e solo sem nenhum tipo de tratamento (MERCHÁN-SANMARTÍN, et al., 2022). Estudo realizado por Kheirandish et al., (2020) no Irã mostra que a implementação do sistema de esgoto municipal melhoraria significativamente a qualidade das águas subterrâneas no período de 15 anos. Esgotos sanitários não tratados resultam em contaminação dos mananciais (BASHAR e FUNG, 2020).

Outra fonte de poluição são os cemitérios, embora forneçam serviços ecossistêmicos, incluindo espaços verdes, controle de micrometeorologia e infiltração de águas pluviais (DŁUGOZIMA, 2022; LEONARD, 2022), os cemitérios podem ser considerados como potenciais poluidores pois no processo de decomposição, os cadáveres geram efluentes gasosos e líquidos, que podem causar impactos no solo, na superfície e na água subterrânea em áreas ao entorno dos cemitérios, pois os poluentes migram dos túmulos para os aquíferos (SABA, et al., 2021; LINS, et al., 2019; ABIA, et al., 2019).

De acordo com Neckel et al., (2022) esses espaços podem ser insalubres por conter elevadas quantidades de contaminantes metálicos em relação à sua área de cobertura, o que pode provocar a contaminação dos recursos hídricos e solo. Apesar do elevado potencial poluidor, os cemitérios são negligenciados como possíveis fontes de contaminação, sendo necessário entender sua posição e impacto no ciclo da água (MAHLANGU et al., 2020).

Também são fatores que podem provocar contaminação das águas subterrâneas o uso e a ocupação do solo e o crescimento urbano sem planejamento, pois no primeiro caso ocorre a diminuição do fluxo de água devido ao aumento das taxas de sedimentação e no segundo, a ocupação de áreas indevidas que facilitam o escoamento de efluentes para dentro dos mananciais subterrâneos (MARIANNO DE OLIVEIRA, et al., 2022; MOURÃO e PEREIRA, 2020; MENDES, et al., 2017).

A avaliação da qualidade da água é extremamente importante para a proteção e gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos que sofrem pressões físicas e químicas

(MACHIWAL et al., 2018). Adimalla e Taloor (2019) em pesquisa feita sobre águas subterrâneas apontam que entre as principais razões para deterioração da qualidade hídrica estão a falta de uma estratégia adequada de gestão, má gestão de resíduos, crescimento populacional e urbanização. A má qualidade das águas subterrâneas induzida pelo aumento das atividades humanas reduzirá a disponibilidade do recurso, agravando a crise hídrica (WU, ZHANG e ZHOU, 2020).

Em relação aos aspectos naturais, Badeenezhad et al (2020) afirmam que a qualidade da água subterrânea é influenciada por processos químicos como mistura de água, descarga e recarga de aquíferos, caminho do fluxo de água e interação entre minerais rochosos de aquíferos, mas são os aspectos antrópicos que alteram mais fortemente a qualidade desses recursos.

Os usos múltiplos das águas subterrâneas são determinados com base na sua qualidade e, a partir dessa análise, os gestores de recursos hídricos podem alocá-las para variados fins (ASADI et al., 2020).

Assim, a avaliação da qualidade de água é uma das maiores preocupações da atualidade. O índice de qualidade da água (WQI) proposto por Brown et al., (1970) é uma abordagem subjetiva que tem sido amplamente utilizado em diversos estudos para avaliar a adequação das águas subterrâneas e superficiais para o consumo (SINGHA et al., 2021) sendo necessárias outras ferramentas atuais que auxiliem os gestores nessa avaliação, de forma mais precisa.

Uma avaliação confiável das situações de qualidade da água subterrânea para diferentes usos (potável, indústria e agricultura) pode definitivamente melhorar a gestão dos recursos hídricos subterrâneos (NAJAFZADEH et al., 2022).

Há variedade de ferramentas e técnicas, convencionais e modernas, para a caracterização da qualidade das águas subterrâneas, proporcionando melhores capacidades de interpretação da qualidade da água em diferentes escalas espaciais (MACHIWAL et al., 2018).

2.3 Gestão de Águas Subterrâneas

A gestão hídrica compreende a formulação, o estabelecimento e a implementação de políticas de recursos hídricos, com base na legislação e nas instituições vigentes que fará a alocação da água nos seus serviços e na sua distribuição (CASTILLA-RHO, et al., 2019; CONICELLI e HIRATA, 2016).

Devido a sua fragilidade, os recursos subterrâneos necessitam de atenção especial dos órgãos ambientais e dos gestores, pois são grandes reservatórios naturais e garantem a

sustentabilidade de parte dos recursos hídricos superficiais (SOLDERA e OLIVEIRA, 2017). A descarga das águas dos aquíferos para um corpo superficial é a mais importante função ecológica que desempenham as águas subterrâneas (TRATA BRASIL, 2019).

Um das ferramentas da gestão das águas subterrâneas está na existência de leis que norteiam a qualidade desse recurso tendo em vista atender aos usos da água, no Brasil a principal é a Resolução CONAMA 396/2008 que “dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas”. A resolução CONAMA 396/2008 classifica as águas subterrâneas em: Classe Especial, quando destinados à preservação de ecossistemas em unidades de conservação; Classe I quando não há alteração da sua qualidade por atividade antrópica; Na classe II a água tem alteração de qualidade, mas não é necessário tratamento em função dessas alterações; Já na classe IV as águas que tem alteração da sua qualidade, só podem ser utilizada mediante a tratamento e a classe IV são águas que não têm requisitos de qualidade para uso.

O enquadramento estabelece a meta ou objetivo de qualidade da água a ser alcançado ou mantido em um aquífero (PINNTO e ALMEIDA, 2009; BRASIL, 2008). Os parâmetros mínimos necessários ao acompanhamento da condição de qualidade da água subterrânea incluem pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos, nitrato, condutividade elétrica e coliformes termotolerantes.

Para Hirata et al., (2016), a grande problemática é que as águas subterrâneas não recebem a devida atenção por parte dos órgãos gestores, pois a sociedade subestima a importância desse recurso. Apesar da sua relevância e da sua exploração, a governança desse recurso é precária, a gestão dos aquíferos enfrenta dificuldades tais como: superexploração, poluição, faltam redes de monitoramento no que diz respeito a qualidade e volume das reservas (VILLAR, 2016).

A exploração sem gestão desse recurso pode acarretar diversos impactos negativos, entre eles, a redução sensível das descargas aquíferas, nos volumes de lagoas e do fluxo de base de rios, além de comprometer as características ambientais (BOENO, FREITAS e SILVÉRIO et al., 2022). Os impactos negativos se derivam principalmente das atividades antrópica, biológica ou natural entre rocha e água e afetam diretamente a sua qualidade (RINAUDO et al., 2020; ADIMALLA e WU, 2019; SILVA P, BARBOSA e SILVA A, 2018).

Uma boa gestão deve considerar os aspectos quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos subterrâneos sob as pressões combinadas das alterações climáticas e das atividades humanas, tais como crescimento populacional e densidade demográfica (MOHAMMED et al., 2020).

Peixoto e Cavalcante (2019) afirmam que é necessário desenvolver uma gestão eficiente que possibilite a conservação da água subterrânea e que atinja a sustentabilidade hídrica, pois esse recurso subterrâneo é a água doce mais abundante a ser explorada.

Para que aconteça a sustentabilidade dessas águas com a capacidade de analisar e compatibilizar os múltiplos usos garantindo a qualidade é necessária uma gestão participativa e integrada. Entretanto, atualmente não há informações precisas e adequadas que auxiliem na gestão das águas subterrâneas, sendo considerado um recurso complexo (BURRI, WEATHERL e MOECK 2019).

Nesse contexto é preciso buscar metodologias que ofereçam aos gestores suporte nas tomadas de decisão para gerir os recursos hídricos subterrâneos, ferramentas que possam estimar a ocorrência de situações críticas, servindo como prevenção para futuros danos ambientais (BOENO, FREITAS e SILVÉRIO, 2022), alertando sobre a variação do decaimento da qualidade da água subterrânea. Assim, ferramentas para monitorar águas subterrâneas torna-se fundamental para auxiliar a gestão (LAY-EKUAKILLE et al., 2019).

2.4 Ferramentas de Apoio a Gestão das Águas Subterrânea

De acordo com as regulamentações e normas nacionais e com as diretrizes da Organização Mundial da Saúde - OMS (2021), a atividade de monitoramento e a transparência das informações sobre a qualidade da água estão se tornando cada vez mais importantes. Essas atividades podem ser consideradas como ferramentas de apoio e orientação para a identificação de riscos relacionados à saúde, para a construção de uma gestão segura dos sistemas de abastecimento de água potável e para aumentar a confiança do usuário no consumo de água da torneira (MAIOLO e PANTUSA, 2021).

Assim, monitorar a qualidade da água subterrânea é de sua importância para a sustentabilidade desse recurso e atenuar a problemática da seca para regiões que utilizam este sistema para o serviço de abastecimento, tal como ocorre no nordeste brasileiro. Nesse contexto, diversas ferramentas surgem com efeito de colaborar com estudos dos aspectos qualitativos das águas, tais como as ferramentas de aprendizado de máquina, que têm potencial de melhorar a previsão de águas subterrâneas (HUSSEN et al., 2020).

Os sistemas de informações utilizados para depósito de dados de qualidade de água subterrânea permitem fácil acesso e auxiliam na tomada de decisões, na construção de relatórios técnicos e na participação pública em gestão da água (STEVANOVIĆ e

MARINOVIĆ, 2020). No entanto, para facilitar a avaliação e organização desses dados torna-se imprescindível o uso de tecnologias e modelos matemáticos.

Carvalho et al., (2018), enfatizam que a matemática é uma ferramenta importante para compreender os aspectos dos recursos hídricos e pode ser utilizada como orientação para uma gestão de longo prazo. Guimaraes (2018) aborda que a utilização de ferramentas computacionais e matemáticas permitem que a gestão dos recursos hídricos seja realizada de modo eficaz e integrado, pois possibilita a modelagem quali-quantitativa da água em escala diária e/ou mensal.

O primeiro modelo matemático de qualidade da água em corpo hídrico surgiu em 1925 e com decorrência do advento da capacidade de processamento dos computadores e a robustez dos modelos matemáticos vieram a permitir modelar as interações físicas, químicas e biológicas entre os parâmetros de qualidade de água (GUIMARÃES, 2018).

Métodos de alta tecnologia, incluindo redes neurais, algoritmos genéticos e teoria dos conjuntos Fuzzy são cada vez mais aplicados para resolver os diversos problemas relacionados ao meio ambiente, uma vez que esses métodos são mais precisos na resolução de questões ambientais (BRAHIM, BOUGHARIOU e BOURI, 2021).

O indicador é a chave para representar os fenômenos complexos desse setor de forma completa e compreensível, tanto para os tomadores de decisão política quanto para o público em geral. A existência de bons indicadores ajuda os profissionais do setor de água a monitorar o progresso em direção ao cumprimento das metas de desenvolvimento do milênio relacionadas ao tema (VRBA e LIPPONEN, 2007; UNESCO, 2003).

Devido a água subterrânea ser de natureza complexa é necessário aplicar técnicas e métodos que auxiliem a interpolar e prever valores no local não amostrado e que meçam a incerteza dos parâmetros estudados (MALLIK, MISHRA e PAUL, 2021). Chidambaram et al., (2022) afirmam que nos últimos anos, problemas ambientais têm sido amplamente resolvidos com a adoção de teorias de conjuntos Fuzzy, incluindo aplicação no índice de qualidade da água (IQA) devido a redução da imprecisão utilizadas nas ferramentas de decisão.

De acordo com Silvert (2000), a lógica Fuzzy pode ser aplicada no desenvolvimento de índices e indicadores ambientais de uma forma que resolve vários problemas comuns, incluindo a incompatibilidade de observações e a necessidade de juízos de valor implícitos. Bressane et al (2020), afirmam que os sistemas Fuzzy têm sido utilizados para apoiar o planejamento participativo e em diversas áreas ambientais tais como qualidade ambiental, gestão ambiental, meio ambiente e reconhecimento de padrões.

A utilização da lógica Fuzzy iniciou-se nessa área devido à incerteza causada principalmente por erros de coleta de dados, heterogeneidade de parâmetros hidrogeológicos, e procedimentos de informatização (ELZAIN et al., 2021). Para Jaafari et al., (2019) esses modelos geraram dados mais precisos e com desempenho superior. A lógica fuzzy é uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar tanto a qualidade das águas subterrâneas quanto a adequação dos poços (SINGH et al., 2019; YASEEN et al., 2018).

Singh et al (2017) abordam que para tomada de decisão em relação a parâmetros hídricos a lógica Fuzzy é o método mais indicado, pois é uma abordagem de inteligência artificial, que fornece uma técnica útil para lidar com a imprecisão na classificação com base nos padrões de qualidade da água subterrânea. Por possuir uma ampla gama de capacidades de classificação, essa ferramenta pode ser aplicada para identificar e superar as incertezas em relação ao limite de classe das águas subterrâneas mais precisas (MAHAMED et al., 2019).

A técnica de lógica Fuzzy é ideal para análises de parâmetros hídricos, utilizando o método Mamdani como sistema de adequação Fuzzy, esse método é projetado para transmitir todo o conhecimento contido na forma de regras Se-Então (JAFFAR et al., 2020; NGUYEN et al., 2019; E. MAMDANI e S. ASSILIAN, 1975). Para Singh et al (2017), a ferramenta Mamdani é o método de Fuzzy mais utilizado para resolução de problemas que envolva águas subterrâneas, pois esta lida efetivamente com a complexidade associada à caracterização desses recursos.

2.5 Teoria dos Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos fuzzy foi desenvolvida para permitir um tratamento matemático para informações qualitativas (BARROS E BASSANEZI, 2010). Zadeh (1965) propôs esta teoria quando trabalhou com problemas de classificação de conjuntos que não tinham limites bem definidos (CHAVES, 2014), e afirmava que a teoria dos conjuntos fuzzy pode ser usada efetivamente no desenvolvimento de ferramentas computadorizadas de apoio à decisão (LIN et al., 2016, L. ZADEH, 2015, WANG, 2009).

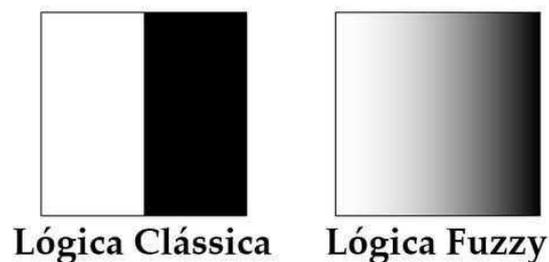
Com a possibilidade de um tratamento rigoroso para o raciocínio aproximado, os conjuntos fuzzy permitem quantificar informações inexatas e incertas e representam aspectos qualitativos por meios de palavras ou sentenças em uma linguagem natural, permitindo a avaliação de conceitos não-quantificáveis (JING et al., 2019; LEITE et al., 2019; SAMPAIO FILHO, et al., 2018;).

Essa teoria tem contribuído para a formulação de modelos em diversas áreas, desde a aplicação em engenharias, inteligência artificial, controle e gestão de processos ligados ao meio ambiente dentre outras. Estudos foram realizados por Pereira (2021) no controle de aeronaves em operações críticas de voo, por Peter et al. (2020) na simulação de produtividade industrial, por Correa et al. (2019) no gerenciamento de energia e por Conde (2022) na aplicação de fuzzy para o monitoramento dos impactos ambientais.

Diferente da teoria clássica de conjuntos que determina de maneira bem definida a inclusão de um determinado elemento no conjunto ou não (POURJAVAD e SHAHIN, 2017). A teoria dos conjuntos fuzzy, em uma abordagem mais abrangente, possui a capacidade de avaliar que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Assim, o 0 indica o não pertencimento e o 1 o pertencimento total ao conjunto, sendo possível definir valores intermediários entre 0 e 1 (BARROS; BASSANEZI, 2010).

Nesse sentido pode-se compreender a teoria dos conjuntos fuzzy como uma extensão da teoria clássica. A Figura 1 representa o comportamento de um valor quando aplicado nas duas teorias: clássica e fuzzy. Enquanto na teoria clássica o pertencimento do objeto a ser estudado é 0 ou 1, preto ou branco, verdadeiro ou falso, na teoria fuzzy é criado linguisticamente escalas de valores que buscam quantificar o objeto a ser estudado, sendo possíveis os valores intermediários, onde pode ser totalmente branco, parcialmente branco, se derivando até chegar na cor preta, o mesmo acontece com verdadeiro e falso, 0 e 1, caracterizando um detalhamento dentro dos sistemas que a teoria clássica não consegue tratar. Teoria Fuzzy (SILVA JÚNIOR, 2015).

Figura 1: Comparativo entre a Lógica Clássica e Lógica Fuzzy



Fonte: SILVA JÚNIOR, 2015

A seguir são apresentados, de forma breve, alguns conceitos fundamentais visando estabelecer uma linguagem comum para o entendimento dos sistemas de inferência desenvolvidos neste trabalho. Para a elaboração desta seção os textos de referência utilizados foram o de Barros, Bassanezi e Lodwick (2016), Pedrycz e Gomide (2007) e Ross (2016).

2.5.1 Conceitos fundamentais

Um conjunto clássico é descrito pela função característica $\mu_A(x)$ definida por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

na qual U é um universo e A um subconjunto de U .

A função μ_A , com domínio U e imagem contida no conjunto $\{0,1\}$, indica que um elemento x está em A quando $\mu_A(x) = 1$ enquanto $\mu_A(x) = 0$ caracteriza um elemento x que não está em A .

A partir desta formalização e considerando que existem casos nos quais não sabemos dizer se um elemento pertence efetivamente a um conjunto ou não, Zadeh (1965) propôs a formalização dos subconjuntos fuzzy F , caracterizados por uma função de pertinência φ_F :

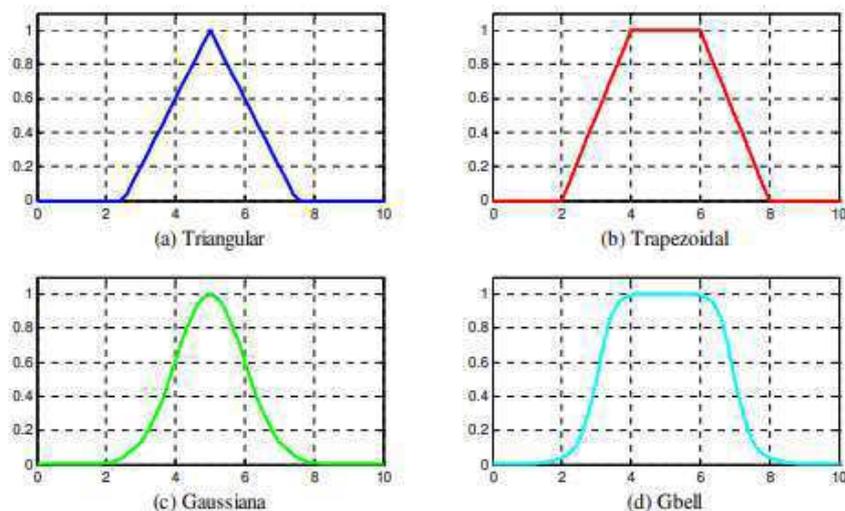
$$\varphi_F: U \rightarrow [0,1], \quad (2)$$

na qual U é um conjunto universo (clássico). O valor $\varphi_F(x) \in [0,1]$ indica o grau com que o elemento x de U está no conjunto fuzzy F , sendo que $\varphi_A(x) = 0$ indica a não pertinência e $\varphi_A(x) = 1$ a pertinência total ao conjunto.

Nesse sentido, teoria dos conjuntos fuzzy pode-se observar que um determinado elemento pode pertencer a mais de um grau de pertinência, ou seja, a mais de um grupo, onde suas características ditam o grau de pertinência em cada grupo.

A função de pertinência caracteriza inteiramente o conjunto fuzzy, e isso pode ser expresso de várias formas, considerando diferentes tipos de funções como trapezoidal, triangular, gaussiana, pseudo-exponencial, sigmoidal e assim por diante. A Figura 2 ilustra alguns tipos de funções de pertinência.

Figura 2: Funções de Pertinência: (a) Triangular (b) Trapezoidal (c) Sigmoidal (d) função de



Fonte: PUC-RIO

As operações padrões de conjuntos fuzzy são: intersecção, união e complemento de subconjuntos fuzzy. Dados dois ou mais conjuntos fuzzy, estas operações conectam esses conjuntos de modo que produzem um único subconjunto fuzzy, isto é, um agregado dos subconjuntos dados. A partir das operações de conjuntos estabelece-se também as propriedades algébricas para os conjuntos fuzzy. O detalhamento dessas operações e propriedades fogem ao escopo desta dissertação, mas são apresentadas em detalhes nos textos de Barros, Bassanezi e Lodwick (2016), Ross (2016) e Pedrycz e Gomide (2007).

Uma variável cujos nomes são valores de conjunto fuzzy é denominada variável linguística. A noção de variável linguística desempenha um papel importante nas aplicações de conjuntos fuzzy pois estas variáveis utilizam descrições linguísticas para caracterizar fenômenos complexos ou mal definidos. Conforme proposto por Pedrycz e Gomide (2007) uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla $(X, T(X), U, G, M)$, onde:

X: Nome da variável;

$T(X)$: Conjunto de termos de X, ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de X;

U: Universo de discurso;

G: Regra sintática (geralmente uma gramática) para gerar os valores de X como uma composição de termos de $T(X)$, conectivos lógicos (negação, intersecção e união), modificadores e delimitadores.;

M: Regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto fuzzy em U.

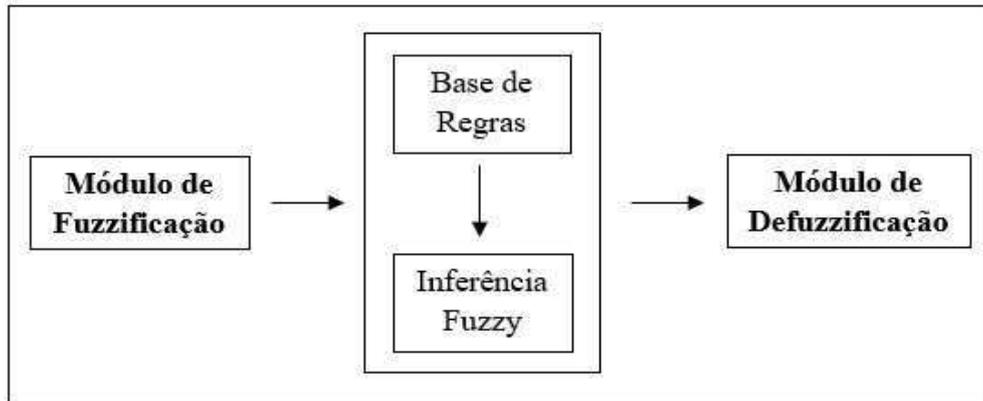
O conceito de variável linguística é fundamental para elaborar os sistemas de inferência fuzzy. Como é apresentado na próxima seção, estas variáveis como entradas para regras de controle fuzzy. Permitindo assim, incorporar habilidades e a experiência do especialista através de um conjunto de regras fuzzy SE-Então (K. PASSINO e S. YURKOVICH, 1998; PEDRYCZ e GOMIDE, 1993; MAMDANI e ASSILIAN, 1975).

2.6 Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF)

Um Sistema Baseado em Regras Fuzzy (SBRF) é um processo de mapeamento de um conjunto de entradas para um conjunto de saída, podendo ser utilizado em diversas áreas como engenharias, ciências ambientais, ciências exatas, gestão de recursos hídricos, onde há a necessidade de aperfeiçoar, melhorar e/ou fundamentar com ferramenta as tomadas de decisão da gestão.

Para a elaboração de um SBRF utilizando o método Mamdani são necessários quatro módulos. A entrada dos dados é denominada fuzzificação, seguida pelos módulos de base de regra de inferência fuzzy e, por fim, a saída dos dados é conhecida também como defuzzificação, como mostra a figura 3.

Figura 3: Módulos para a elaboração de Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF)



Fonte: Adaptado de Santos, 2018; Barros e Bassanezi, 2010

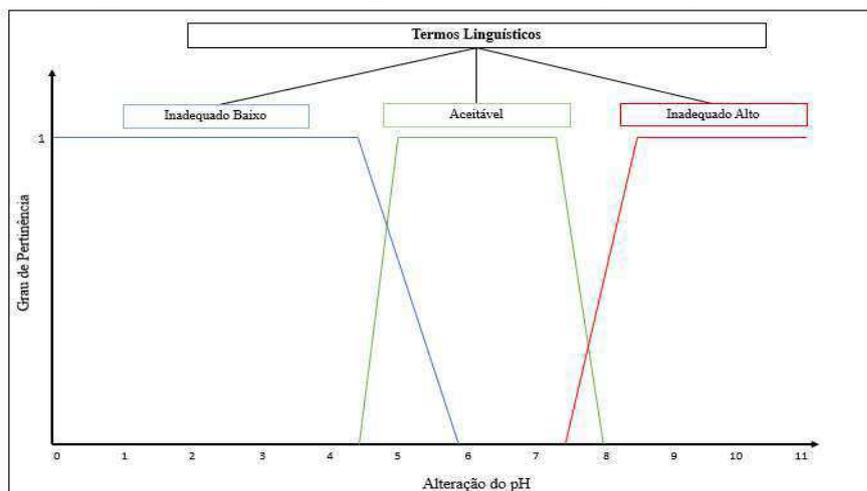
2.6.1 Módulo de Fuzzificação

O módulo de Fuzzificação é um operador responsável pelo mapeamento da entrada em conjuntos Fuzzy com domínios apropriados ao caso de estudo. No módulo fuzzificação, as variáveis de entrada do SBRF são moldadas por conjuntos Fuzzy com seus domínios (BARROS, BASSANEZI e LODWICK, 2016). Utilizada para transformar os limites nítidos das entradas em um grau de pertinência, atribuindo um valor entre zero (sem pertinência) e um (com total pertinência) (MALLIK, MISHRA e PAUL et al., 2021). O objetivo desta etapa é obter os graus de pertinência para os subconjuntos fuzzy (PIVOVAROVA et al., 2020).

A fuzzificação envolve a conversão das variáveis de entrada e saída do modelo em conjuntos fuzzy, caracterizadas por suas funções de pertinência e termos linguísticos (SANTOS et al., 2020; SINGH et al., 2019). A variável linguística é uma variável que se exprime em valores qualitativo e quantitativo, expressos na função de pertinência, ou seja, a variável linguística será formada por uma variável figurativa e por um valor numérico.

Por exemplo, considerando a variável linguística da alteração do Ph (potencial hidrogeniônico) variando de 0 a 11, assumem-se seus termos linguísticos como Inadequado Baixo, Aceitável e Inadequado Alto. Estes valores são representados por meio de conjuntos fuzzy conforme mostra a Figura 4.

Figura 4: Variável Linguística da Alteração do pH



Fonte: Autoria Própria, 2022

A consulta a especialistas nessa etapa é de extrema importância, pois auxilia na formulação das funções de pertinência para cada conjunto fuzzy (BARROS, e BASSANEZI e LODWICK, 2016). Com os termos linguísticos estabelecidos, as etapas seguintes do SBRF podem ser estabelecidas.

2.6.2 Base de Regras

As regras do sistema de inferência fuzzy, compõem a parte central do SBRF, e representam as relações entre suas entradas e suas saídas, formando a base de conhecimento do sistema (NEVES et al., 2019). É integrada por proposições Fuzzy do tipo “Se - Então”, que de modo geral são da forma:

Se x_1 é A_1 e x_2 é A_2 ... e x_n é A_n

Então μ_1 é B_1 e μ_2 é B_2 ... e μ_m é B_m .

2.6.3 Inferência Fuzzy

É nesse módulo que cada proposição fuzzy é avaliada matematicamente por meio da(s) regra(s) de inferência fuzzy definida. O sucesso do sistema fuzzy depende significativamente deste módulo, pois fornece a saída fuzzy a ser adotada (BARROS e BASSANEZI, 2010).

Para este estudo será adotado o método de inferência de Mamdani, ou seja, é uma relação fuzzy binária, baseado na composição de inferência max-min (BARROS, BASSANEZI e LODWICK, 2016).

2.6.4 Defuzzificação

A defuzzificação consiste em converter a saída fuzzy para uma quantidade real (valor crisp). Existem diversos métodos de defuzzificação, sendo o Centro da Área ou Centróide, o Centro dos Máximos e a Média dos Máximos os mais conhecidos. Para Barros, Bassanezi e Lodwick (2016) o centróide é o mais utilizado, mesmo sendo o mais complexo. O centróide calcula o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da saída do sistema Fuzzy (ESCOTTÁ e BECCARO, 2019).

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a elaboração do modelo Fuzzy para avaliar a qualidade de águas subterrâneas e os procedimentos metodológicos para obter os objetivos propostos pelo estudo.

3.1 Natureza da Pesquisa

A presente pesquisa classifica-se, conforme sua finalidade, em descritiva, pois registra e descreve as características do recurso hídrico e seu resultado após aplicação da metodologia fuzzy, bem como exploratória, pois torna a problemática da classificação das águas subterrâneas mais explícitos (PRODANOV e DE FREITAS, 2013; OLIVEIRA, 2011).

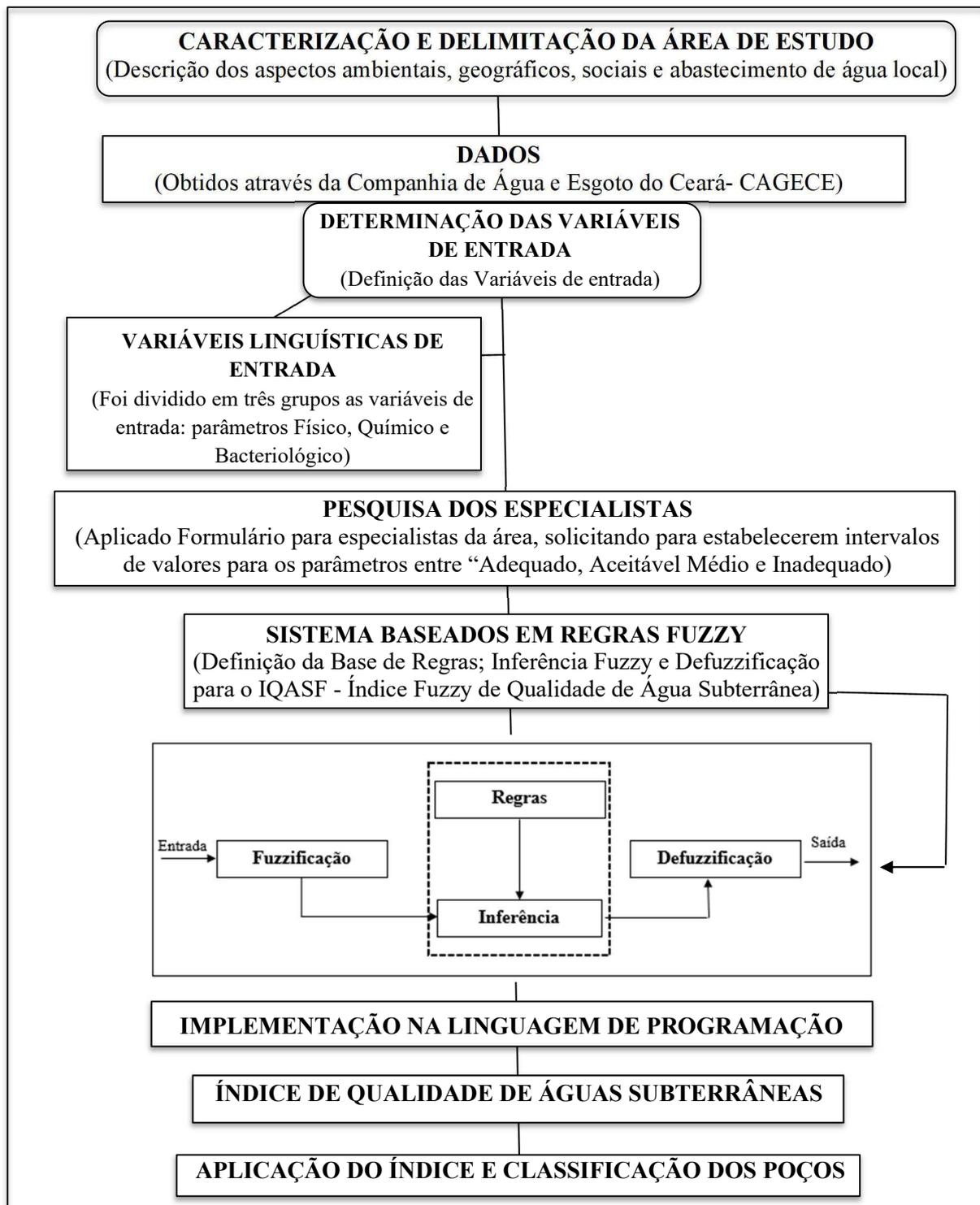
A pesquisa descritiva realiza caracterização do objeto, podendo estabelecer relações entre as variáveis estudadas (GERHARDT e SILVEIRA, 2009; GIL, 2008). Já a pesquisa exploratória tem como finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos, com formulação de problemas mais precisos permitindo aproximação do fato estudado. Se enquadram nessa categoria pesquisas que tentam adquirir maior familiaridade com o fenômeno pesquisado (GIL, 2008; GIL 2002; SELLTIZ et al., 1965)

Buscou-se estabelecer o estado da arte sobre o tema, para isto empregou-se análise bibliográfica para explorar pesquisas realizadas por meio de artigos publicados em periódicos indexados na base de dados da *Web of Science* (WoS) além de teses e dissertações, livros, nacionais e internacionais. O *VOSviewer*, ferramenta útil para construir redes de publicações científicas, revistas científicas, pesquisadores, organizações de pesquisa, países, palavras-chave ou termos (ECK, WALTMAN, 2022) foi utilizado para fazer a seleção refinada dos periódicos desse estudo.

Em relação a técnica abordada, a pesquisa caracteriza-se, também, como de abordagem quali-quantitativa, onde os dados coletados foram quantificados mediante a utilização de dados

estruturados e estatísticos de natureza aplicada (OLIVEIRA, 2011). Torna-se estudo de caso, pois a metodologia abordada foi aplicada ao município de Juazeiro do Norte, Ceará. Para obter os objetivos propostos foi utilizada a lógica fuzzy do tipo Mamdani para a criação do Índice. Dessa forma, a pesquisa foi desenvolvida seguindo o fluxograma da Figura 5.

Figura 5: Fluxograma das Etapas do Estudo



Fonte: Autor (2022).

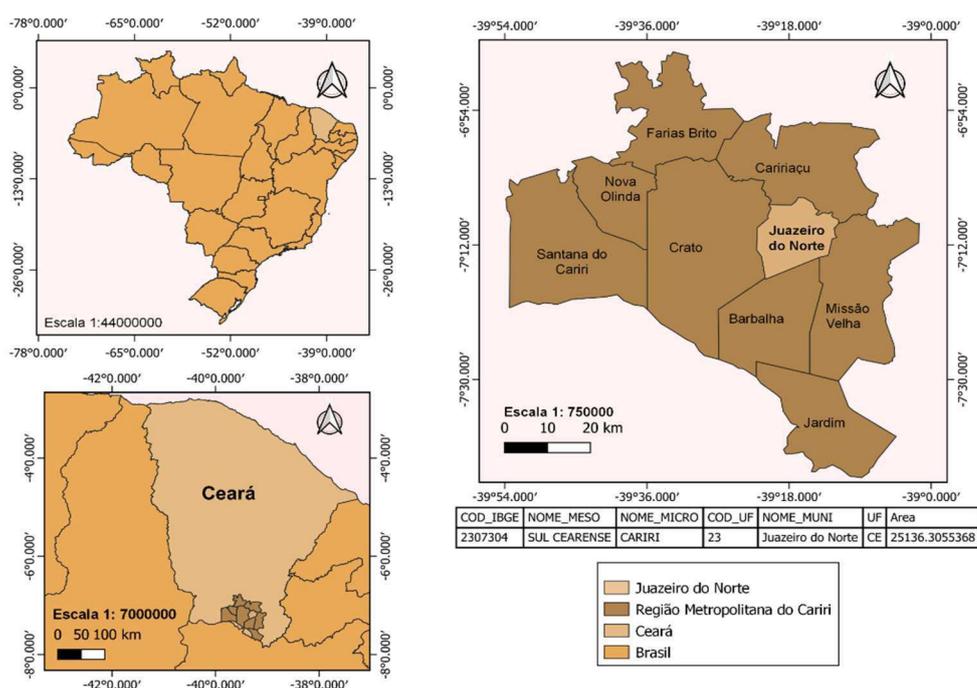
3.2 Caracterização da área de estudo

3.2.1 Aspectos Gerais

O município de Juazeiro do Norte, está localizado no sul do estado do Ceará nas coordenadas 7° 12' 47" ao Sul e 39° 18' 55" ao Oeste. Inserido na região metropolitana do Cariri (Figura 6), o município possui uma área de 248,8 km² e uma população de aproximadamente 276.264 habitantes, onde 96,07% residem em área urbana, com taxa de ocupação média por residência de 3,6 pessoas.

O Departamento de Economia da Universidade Regional do Cariri (URCA), afirma que entre os anos de 2004 e 2008 o município tornou-se a terceira economia mais importante do estado do Ceará, superando as cidades de Sobral e Caucaia (PEREIRA e CARDOSO, 2020; SANTOS, 2012). Oferece cerca de 50.000 postos de trabalhos para a população e detém o maior produto interno da região metropolitana do Cariri (TELES et al., 2020).

Figura 6: Localização da Área de Estudo – Juazeiro do Norte/CE



Fonte: Autor (2021)

Juazeiro do Norte é considerado como o polo de desenvolvimento regional, devido a sua forte expansão nas áreas de turismo, comércio, imobiliária e construção civil atraindo consumidores da macrorregião e recebendo também grandes redes atacadistas e do varejo no Brasil (FIGUEIREDO et al., 2021; LIMA, 2020; LIMA, 2017).

3.2.2 Aspectos Ambientais

Com relação aos aspectos ambientais, está inserido no semiárido nordestino brasileiro, na bacia hidrográfica do Rio Salgado. O período chuvoso ocorre de janeiro a maio, com pluviosidade de 925,1 (mm) e temperatura média de 24° a 26°C (IPECE, 2017). Teixeira et al., (2019) corrobora que a cidade abriga fontes de água e auxilia na sustentabilidade urbana, pois proporciona benefícios para a melhoria da qualidade de vida da população e do crescimento econômico e social.

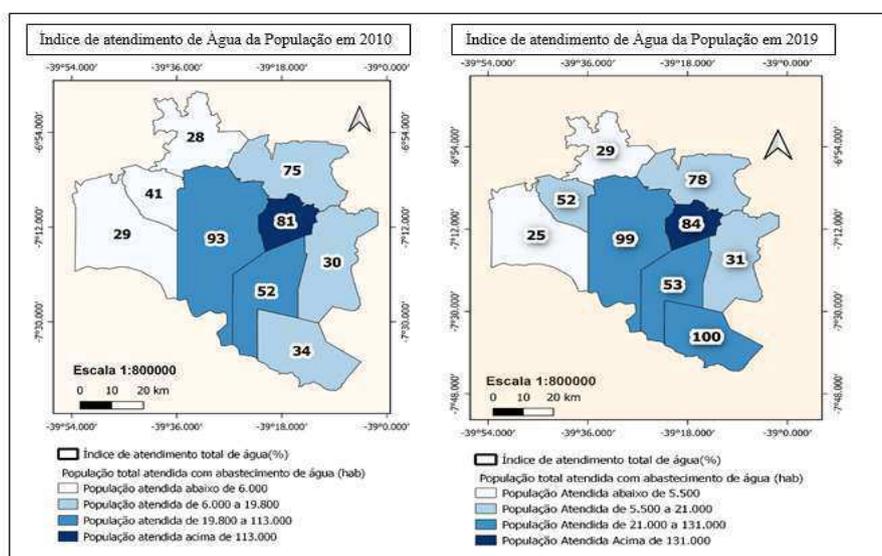
O município é constituído de sistemas de aquíferos com significativa reserva hídrica subterrânea, sendo a água subterrânea a principal fonte de abastecimento. Juazeiro do Norte está inserido no Geopark Araripe e abriga o Parque Natural Municipal das Timbaúba (TEIXEIRA et al., 2019).

3.2.3 Disponibilidade Hídrica

De acordo com a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) na região metropolitana do Cariri são explorados aproximadamente três mil litros de águas subterrâneas e Juazeiro do Norte tem capacidade de atender 100% da demanda populacional (COGERH, 1997).

O Sistema de Saneamento Nacional (2019) afirma que as águas subterrâneas do município abastecem cerca de 207.974 habitantes, com índice total de abastecimento de 84% da população urbana (Figura 7).

Figura 7: Índice de abastecimento de Juazeiro do Norte



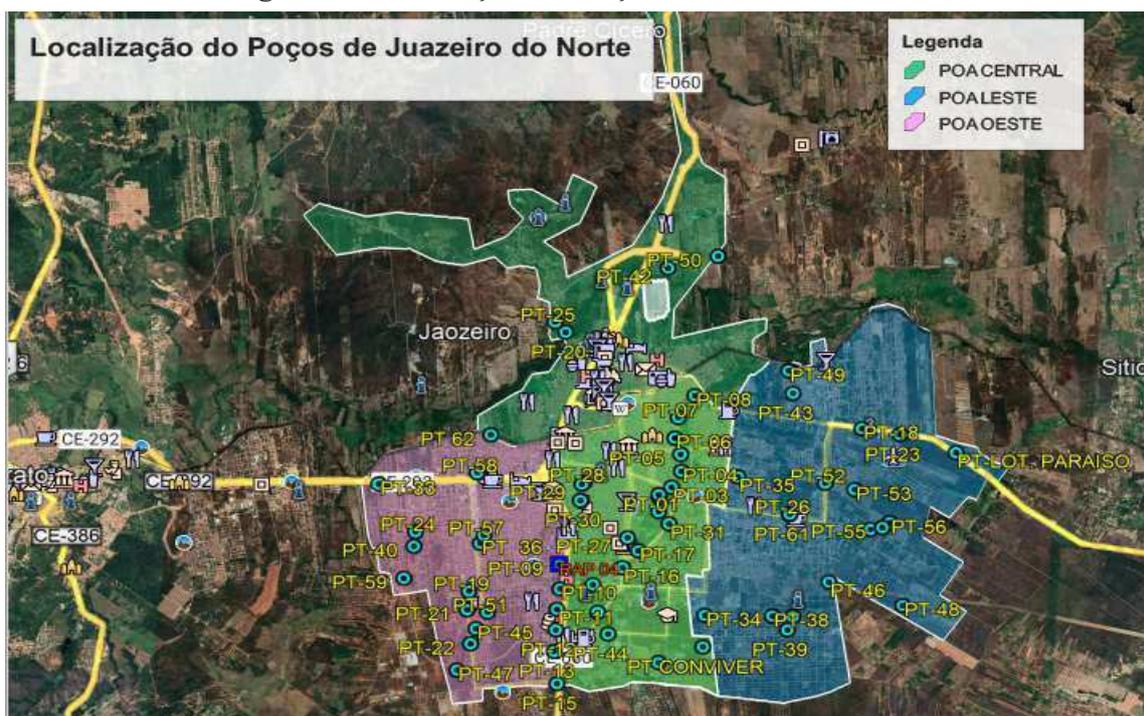
Fonte: Autor, 2021

O abastecimento de água encanada em 2010 atendia apenas 81% da população, em 2020 passou a atender 84%, tendo grande avanço na área de saneamento no requisito abastecimento de água (Figura 7).

Segundo a companhia de água e esgoto do estado – CAGECE, (2022) o município possui 70 poços tubulares (PT) distribuídos no seu território. Para melhor manutenção, operação e conservação são separados em três postos operacionais: POA oeste, POA leste e POA central, em cada área há um técnico que acompanha as manobras desses poços (Figura 8). Os técnicos ainda contam com a ajuda de operadores, que se mantêm em elevatórias próximas aos poços para dar suporte a qualquer emergência e monitoramento desses PT's.

O Posto de Operação central possui 26 poços dos quais 18 encontram-se em atividade e cerca de 51.250 ligações ativas que são monitoradas pela CAGECE. Abastecem os principais bairros comerciais do município e os mais populosos. O POA Oeste tem 15 poços ativos com 21.551 ligações. A área do POA leste contém 16 poços ativos e 19.915 ligações no sistema.

Figura 8: Localização dos Poços de Juazeiro do Norte



Fonte: Autor, 2022

Para Pereira (2013) o município de Juazeiro do Norte necessita de um plano de ação para garantir a qualidade da água ofertada à população. Silva (2022) destaca que é inaceitável que o uso da água de Juazeiro do Norte ocorra de forma inadequada, pois é uma ameaça a vida da população.

Para aplicação do índice de qualidade de água subterrânea desenvolvida, optou-se analisar 50% mais 1 dos poços, visando cobrir um valor significativo de poços do município e fazer maior cobertura da área de estudo, totalizando 36 poços distribuídos por todo o município. Dessa forma foram escolhidos 12 poços de cada Posto de Operação de Água (Tabela 1). Esses poços apresentam diferentes profundidades e vazões.

Tabela 1: Caracterização dos Poços Estudados

Poços	Posto de Operação de Água	Vazão Explorada (m ³ /h)	Profundidade (m)
7	POA - Central	150	130
28	POA - Central	20	173
42	POA - Central	35	88
27	POA - Central	80	152
20	POA - Central	50	144
4	POA - Central	150	152
50	POA - Central	70	118
5	POA - Central	150	194
8	POA - Central	60	210
3	POA - Central	150	248
14	POA - Central	250	170
44	POA - Central	25	180
24	POA - Oeste	80	147
36	POA - Oeste	20	119
40	POA - Oeste	50	96
19	POA - Oeste	60	160
15	POA - Oeste	90	140
47	POA - Oeste	130	420
58	POA - Oeste	-	105
62	POA - Oeste	-	-
59	POA - Oeste	60	105
21	POA - Oeste	40	80
45	POA - Oeste	40	120
9	POA - Oeste	100	227
35	POA - LESTE	-	102
34	POA - LESTE	25	80
23	POA - LESTE	90	166,4
53	POA - LESTE	-	-
38	POA - LESTE	50	-
26	POA - LESTE	90	135
41	POA - LESTE	120	100
48	POA - LESTE	35	110
46	POA - LESTE	90	90
60	POA - LESTE	75	96
55	POA - LESTE	-	-
64	POA - LESTE	39,6	112

Fonte: Autor, 2022

- Informação não disponível

3.2.4 Caracterização do sistema de esgotamento sanitário

De acordo com o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento - SNIS (2020) o município possui 24.507 ligações ativas de esgotos, atendendo 64.485 de população urbana, monitorado pela companhia de água e esgoto do Ceará. Apenas 21,97% dos domicílios de Juazeiro do Norte possuem esgotamento sanitário. Esse dado coloca o município entre as 20 piores posições no ranking do estado (TRATA BRASIL, 2022; SNIS, 2020).

De acordo com o relatório de esgotamento sanitário municipal (2017) apenas 38,3% dos esgotos, correspondendo a uma vazão de aproximadamente 87,4 L/s e 5.196,2 de carga gerada de kg DBO por dia, recebem coleta e tratamento adequados (SNIRH, 2017).

Oliveira (2012) afirma que a falta de esgotamento sanitário em Juazeiro do Norte oferece grandes riscos ao sistema de abastecimento de água, principalmente porque há existência de esgotos a céu aberto e o uso de fossas negras.

3.3 Coleta dos Dados

Os resultados das análises de água bruta foram fornecidos pela CAGECE, por meio da ouvidoria do Estado do Ceará, e promoveram discussões ponderando as legislações nacionais e a literatura. As coletas foram realizadas por técnicos em saneamento ambiental uma vez por mês, armazenadas em recipientes adequados, devidamente fechados e transportados para o laboratório regional de análises físico-químicas da CAGECE, localizado no município de Juazeiro do Norte. O período de coleta foi de 01/04/2021 a 01/04/2022, com periodicidade mensal.

As variáveis disponibilizadas pela concessionária para este estudo também estão contempladas na Resolução CONAMA nº 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento, prevenção e controle da poluição das águas subterrâneas (BRASIL, 2008).

As variáveis monitoradas pela CAGECE e utilizadas nesta pesquisa e os respectivos métodos adotados pela companhia para acompanhamento da qualidade das águas dos poços estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis monitoradas e métodos para análises

Variáveis	Unidade de medida	Valor Máximo Permitido (VPM)*	Método
Turbidez	uT	-	Turbidímetro
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000	Condutivímetro
pH	-	-	phmetro
Nitrato (como N)	mg/L	10	Espectro
Nitrito (como N)	mg/L	1	Espectro
Cloreto	mg/L	250	Titulação
Coliformes totais	NMP/100 mL	Ausência	Método Cromogênico
Escherichia coli	NMP/100 mL	Ausência	Método Cromogênico

Fonte: Autor, 2022

_ Sem unidade de medida

- Não determinado pela Resolução CONAMA n° 396/2008

* Valores Máximos Permitidos pela Resolução CONAMA n° 396/2008

Foram realizadas análises dos dados semestrais de 2021 e do primeiro semestre de 2022 e análises mensais entre abril de 2021 a abril de 2022 totalizando 13 meses de estudo em cada poço, em cumprimento ao estabelecido pela Resolução CONAMA n° 396/2008, onde devem ser coletadas e analisadas a qualidade de água bruta subterrânea semestralmente e mensalmente. As coletas foram realizadas em período chuvoso referente aos meses de janeiro a maio e no período de estiagem referente aos demais meses do ano.

3.4 Modelo Fuzzy para o índice de Qualidade de Águas Subterrânea

Esta seção descreve as etapas de construção do sistema de inferência fuzzy aplicado aos parâmetros de qualidade de água subterrânea do município de Juazeiro do Norte e contém os seguintes tópicos: seleção das variáveis de entrada, fuzzificação, base de regras, inferência e defuzzificação.

3.4.1 Definição das variáveis de entrada

Para a escolha das variáveis de entrada para o modelo fuzzy utilizou-se como referência o Índice de Qualidade das Águas – IQA criado em 1970, nos Estados Unidos, pela *National Sanitation Foundation* e adaptado para este estudo abrangendo a categoria de águas subterrâneas.

As variáveis de entrada do sistema, foram escolhidas entre aquelas mais utilizadas no monitoramento da qualidade da água feito pela CAGECE na área de estudo e estabelecidas a partir do levantamento bibliográfico e da Resolução CONAMA n° 396/2008.

As variáveis foram divididas em três grupos: físico, químico e bacteriológico. Os dados de Sólidos Totais Dissolvidos e Turbidez geraram o grupo físico; pH, nitrito, nitrato e cloreto o grupo químico e E.coli e coliformes totais o grupo bacteriológico. O Quadro 1 traz a descrição dos grupos, das variáveis e suas respectivas unidades de medida.

Quadro 1: Variáveis de entrada do modelo fuzzy para criação do IQASF

Grupo	Variáveis	Unidade de Medida
Físico	Sólidos Totais Dissolvidos (STD)	mg/L
	Turbidez	uT
Químico	pH	-
	Nitrito	mg/L
	Nitrato	mg/L
	Cloreto	mg/L
Bacteriológico	E. coli	NMP/100ml
	Coliformes Totais	NMP/100ml

Fonte: Autor, 2022

3.4.2 Elaboração da Arquitetura Geral do Modelo Fuzzy

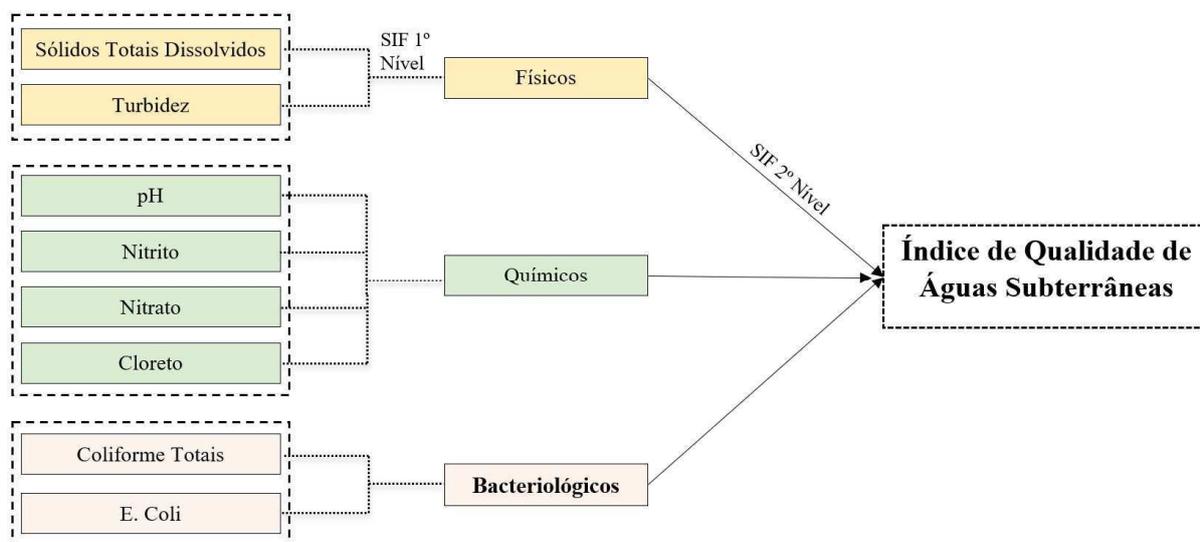
Na primeira etapa, foram determinadas as variáveis de entrada do modelo para determinação do índice de qualidade da água subterrânea.

Essas variáveis foram agrupadas por características afins em três dimensões: física, química e bacteriológica para favorecer a modelagem Fuzzy e simplificar o processo de construção. Essa estrutura em dimensão simplifica a aquisição da base de regra em cada dimensão. Quando não ocorre a separação das variáveis em dimensão há dificuldade em estabelecer a base de regra corretamente, prejudicando a obtenção de um bom modelo.

Dessa forma para cada dimensão foi construído um sistema de inferência Fuzzy – FIS dando origem a agregação de 1º nível, que permite saber o estado de qualidade da água subterrânea nas dimensões avaliadas.

Na segunda etapa, as saídas desses sistemas forneceram os aspectos físicos, químicos e bacteriológicos, tais aspectos tornam-se a entrada para um novo sistema, compondo o 2º nível do modelo. A arquitetura geral do modelo para gerar o Índice de Qualidade de Águas Subterrânea com inferência Fuzzy está apresentada na Figura 9.

Figura 9: Arquitetura Geral do Modelo Fuzzy do índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy



Fonte: Autor, 2022.

3.4.3 Consulta a especialistas

Para fortalecer e validar as informações na composição do IQASF foi realizada uma pesquisa junto a 12 profissionais da área de química, especialistas em águas subterrâneas que trabalham em companhia de abastecimento de água e/ou consultoria de tratamento de águas subterrâneas, de diversos estados, tais como: Ceará, Pernambuco, Paraíba, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Rio Grande do Sul.

Barros e Bassenezi (2010), afirmam que os especialistas colaboram com a formação das funções de pertinência, mesmo que a entrada seja *crisp*, posteriormente será fuzzificada através de sua função e que a eficiência das aplicações está relacionada com as informações fornecidas pelos especialistas para a construção da base de regras.

As perguntas foram realizadas na tipologia semi-estruturada, conforme Apêndice A. Os formulários foram aplicados através da ferramenta *Excel e Libre Office*. Na pesquisa foi solicitado aos especialistas a definição dos valores de intervalos para cada variável de entrada, que nesse caso são os parâmetros de qualidade. A partir das respostas obtidas foi possível identificar a zona de incerteza de cada parâmetro.

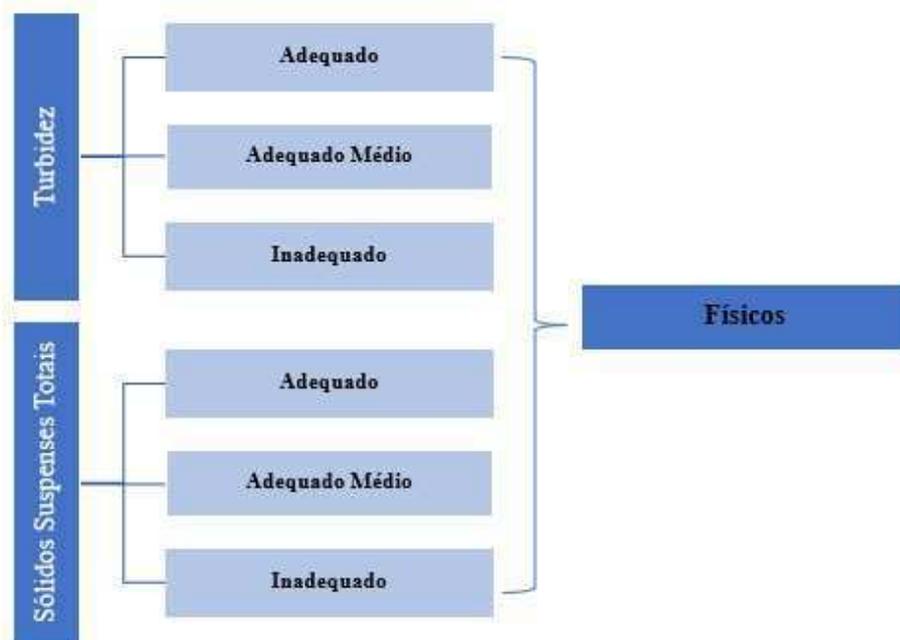
3.4.4 Fuzzificação

Nessa etapa, as variáveis de entrada são representadas por termos linguísticos e funções de pertinência Fuzzy triangulares e trapezoidais, onde há a conversão de um valor numérico

em conjunto fuzzy. As funções de pertinência utilizadas são devido a sua utilização tendo em vista a simplicidade da forma da função.

A Figura 10 traz como exemplo os termos linguísticos adotados para descrever as variáveis do grupo físico, a mesma metodologia foi utilizada para os demais grupos.

Figura 10: Termos linguísticos do grupo Físico



Fonte: Autor, 2022.

A Tabela 3 apresenta os termos linguísticos utilizados nas variáveis de entrada, bem como seus respectivos domínios.

Tabela 3: Descrição das variáveis de entrada e de saída do IQASF

Variáveis	VMP *	Termos Linguísticos	Domínios	Tipo	Saída
Sólidos dissolvidos totais	1000	Adequado	[0, 0, 500, 700]	Trapézio	Físico
		Médio	[500, 700, 900]	Triangulo	
		Inadequado	[700, 900, 1000, 1000]	Trapézio	
Turbidez	**	Adequado	[0, 0, 0.5, 1.5]	Trapézio	Físico
		Médio	[0.5, 1.5, 2,5]	Triangulo	
		Inadequado	[1.5, 2.5, 5, 5]	Trapézio	
pH	**	Inadequado Baixo	[0, 0, 4.5,7]	Trapézio	Químico
		Médio	[4.5, 7, 8.5]	Triangulo	
		Inadequado Elevado	[7, 8.5, 14, 14]	Trapézio	
Nitrito	1	Adequado	[0, 0, 0.4, 0.6]	Trapézio	Químico
		Médio	[0.4, 0.6, 0,8]	Triangulo	
Nitrato	10	Inadequado	[0.6,0.8,1,1]	Trapézio	Químico
		Adequado	[0, 0, 3, 6]	Trapézio	
		Médio	[3, 6, 8]	Triangulo	

		Inadequado	[6, 8, 10, 10]	Trapézio	
		Adequado	[0, 0, 50, 100]	Trapézio	
Cloreto	250	Médio	[50, 100, 200]	Triangulo	
		Inadequado	[100, 200, 250, 250]	Trapézio	
E.coli		Adequado	[0, 0, 0.3, 0.9]	Trapézio	Bacteriológico
		Inadequado	[0.3, 0.9, 1, 1]	Trapézio	
Coliformes		Adequado	[0, 0, 0.3, 0.9]	Trapézio	
Termotolerantes		Inadequado	[0.3, 0.9, 1, 1]	Trapézio	

Fonte: Autor, 2022

É importante salientar que, a variável pH foi classificada como: Inadequado Baixo, Médio Aceitável e Inadequado Alto, pois a resolução vigente aconselha que o pH deve-se manter na faixa de 6,0 à 9,0. Para as variáveis E.coli e coliformes totais também devem ser utilizados o termo Inadequado quando houver a presença e adequada na ausência das bactérias termotolerantes, essas definições foram consideradas com as respostas dos especialistas.

3.4.4.1 Grupo Físico

O valor máximo permitido (VMP) para sólidos suspensos totais (SST) segundo a Resolução CONAMA nº 396 é de 1000mg/L (BRASIL, 2008). A fuzzificação do SST considera adequado teores inferiores de 500 mg/L. O intervalo entre 500-700 mg/L e 800-900 mg/L são as faixas nebulosas, e os valores acima de 900 mg/L foram considerados “Inadequados” (Figura 11 (a)).

Já para a turbidez, de acordo com os especialistas, os valores de 0 a 1 foram considerados adequados, a zona de certeza entre os raciocínios dos especialistas foi de 0 a 0,5. Os valores de 1 até 2 foram considerados como Média Aceitável e a partir de 2 como inadequado (Figura 11 (b)).

3.4.4.2 Grupo Químico

Apesar do CONAMA nº 396/2008 não estabelecer valores máximo permitido (VMP) a Portaria nº888/2021 sugere o pH entre os valores 6 e 9. O pH baixo colabora com a baixa qualidade de água subterrânea, o pH entre 0 a 4 indica acidez das águas condicionando a sua potabilidade (LISBOA, 2022; MENEZES et al., 2013; LEWIS et al., 1986). Assim, a zona de certeza do pH para os especialistas foi de 0 até o valor 5 para Inadequado Baixo, 7 a 8 para médio aceitável e acima 8,5 para inadequado. As variações de $5 < \text{pH} < 6,5$ e $8 < \text{pH} < 9$ são as faixas nebulosas (Figura 11 (c)), ou seja, a zona de incerteza. Para Sampaio et al. (2007), as

áreas nebulosas ou indistinção (fuzziness) sugerem um aspecto de incerteza, por vezes considerado como ambiguidade.

Para os padrões de consumo humano a resolução CONAMA n° 396/2008 estabelece VMP para nitrito de até 1 mg/L (BRASIL, 2008). A presença do nitrito na água mesmo em pequenas quantidades é um indicativo de contaminação (LIMA, 2008; ROCHA, 2005). Nesse sistema a variação entre 0 e 0,4 foi estabelecida como adequada, 0,6 mg/L como médio aceitável e acima de 0,9 como inadequado. O intervalo de $0,4 < \text{Nitrito} < 0,5$ mg/L, $0,5 < \text{nitrito} < 0,6$ mg/L e $0,7 < \text{nitrito} < 0,9$ como nebulosa (Figura 11 (d)).

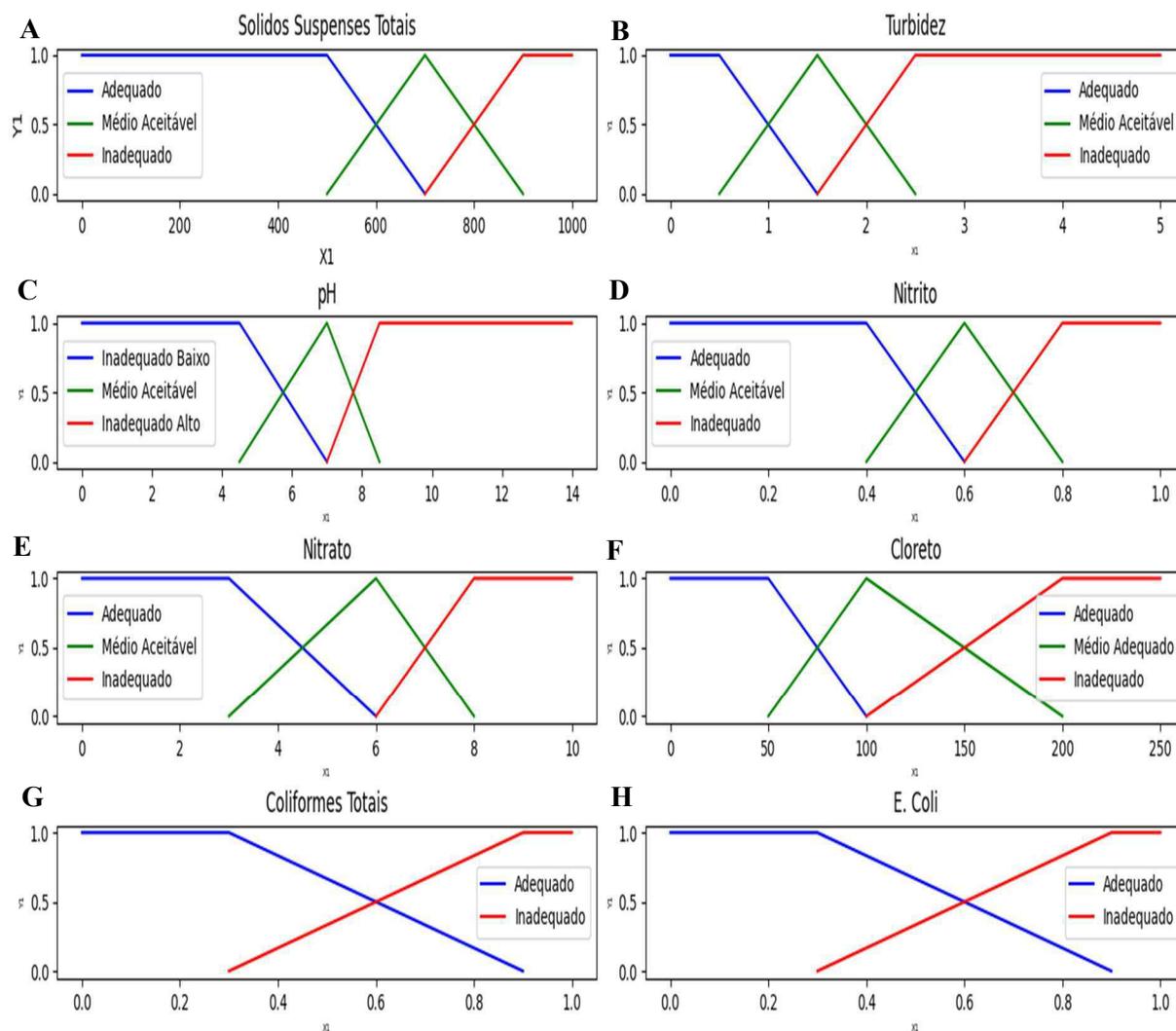
Os valores máximos permitidos para o nitrato são de 10 mg/L para o abastecimento humano (BRASIL, 2008). Meneses (2013) afirma que é um parâmetro de importância a ser analisado, pois sua presença em altos teores pode promover efeitos adversos à saúde humana, e que a água subterrânea pode ser vulnerável a carga de nitrato (LISBOA, 2019; LEITÃO, et al., 2003). Portanto, para teores de 0 a 3 mg/L foi considerado adequado, entre 3 a 7 mg/L média aceitável e acima de 8mg/L Inadequado. As variações entre $3,0 < \text{Nitrato} < 7$ e $7 < \text{nitrato} < 8,0$ as áreas nebulosas (Figura 11 (e)).

Em relação ao cloreto (Cl) o VMP é de 250 mg/L de acordo com a Resolução CONAMA n° 396/2008. Alto teor de cloreto é responsável pela corrosão, sendo necessário seu valor ser de até 200 mg/L quando se há baixa pressão (LI, et al., 2020; LISBOA, 2022; FILHO e SANTOS, 2013). O cloreto em águas subterrâneas diminui o acúmulo de nutrientes, a taxa de desnitrificação e a redução da decomposição da carga orgânica, deteriorando assim a qualidade de água (SZKLAREK et al., 2022; MACKIE et al., 2021; QIAN et al., 2020). Portanto, para teores de 0 a 60 mg/L a concentração foi considerada como adequada, entre 60 a 100 mg/L como média aceitável e acima de 200 mg/L como inadequada. As variações nebulosas ficaram entre $60 < \text{Cl} < 100$ mg/L e $100 < \text{Cl} < 200$ mg/L.

3.4.4.3 Grupo Bacteriológico

Para os parâmetros bacteriológicos, os especialistas concordaram que há a necessidade de três saídas: Adequado, média aceitável e Inadequado. O coliforme total é um indicador de confiabilidade para o abastecimento de água e a E. coli é uma espécie do grupo coliforme, que geralmente quando encontrada indica contaminação por fezes, acarretando problemas gastrointestinais quando ingerida (HUO et al., 2021; MAHAGAMAGE e MANAGE, 2019; BRASIL, 2008).

Figura 11: Fuzzificação de parâmetros da qualidade da água



Fonte: Autor, 2022

As saídas dos três sistemas geraram a definição do sistema do segundo nível. Todos os sistemas com cinco termos linguísticos, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Descrição das variáveis de entrada e de saída do Sistema Intermediário

Grupo	Termos Linguísticos	Domínio	Tipo	Saída
Físico	Inadequado	[0, 0, 20, 30]	Trapézio	Índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy - IQASF
	Baixo	[20, 30, 50]	Triângulo	
	Média	[30, 50, 70]	Triângulo	
	Adequado	[50, 70, 80]	Triângulo	
	Ótimo	[70, 90, 100, 100]	Trapézio	
Químico	Inadequado	[0, 0, 20, 30]	Trapézio	Índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy - IQASF
	Baixo	[20, 30, 50]	Triângulo	
	Média	[30, 50, 70]	Triângulo	
	Adequado	[50, 70, 80]	Triângulo	

	Ótimo	[70, 90 ,100, 100]	Trapézio
Bacteriológico	Inadequado	[0, 0, 20, 30]	Trapézio
	Baixo	[20, 30, 50]	Triangulo
	Ótimo	[70, 90 ,100, 100]	Trapézio

Fonte: Autor, 2022

Para os grupos Físico e Químico foram considerados como inadequado (In) os valores entre 0 a 30, baixa qualidade (Bq) de 40 a 50, média aceitável (Ma) de 60 a 70, adequada (Ad) para o consumo de 70 a 80 e ótima (Ot) de 90 a 100. As zonas nebulosas foram: $20 < In < 30$, $40 < Bq < 50$, $60 < Ma < 70$ e $70 < Ad < 80$, como mostra a Tabela 5.

A variável que indica o Índice de Qualidade foi fuzzificada considerando informações de dados reais de águas subterrâneas e estudos de indicadores de águas subterrâneas utilizando a lógica clássica (ALMEIDA e OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA, 2007; CADILHAC e ALBINET, 2003).

A Tabela 5 informa os termos linguísticos definidos para caracterizar esta variável bem como os domínios e as funções de pertinência utilizadas.

Tabela 5: Descrição dos termos linguísticos do Sistema Final IQASF

Grupo	Termos Linguísticos	Domínios	Justificativa para definição do domínio
Índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy - IQASF	Inadequada	[0 - 20]	
	Baixa Qualidade	[21 - 49]	Almeida e Oliveira, 2017;
	Média Aceitável	[50 - 70]	Cadilhac e Albinet, 2003;
	Adequadas	[71 - 80]	Santos 2009;
	Ótimo	[81 - 100]	

Fonte: Autor, 2022

3.4.4.5 Definição das Regras de Inferência Fuzzy para o IDASF

As regras foram elaboradas utilizando o condicional “Se-Então” que faz uma relação com as variáveis de entrada e de saída. O grupo Físico totalizou 9 regras, o grupo químico 81 regras e o grupo bacteriológico 6 regras. O grupo intermediário que é composto pelas saídas das variáveis totalizou 72 regras. O Quadro 2 apresenta as regras utilizadas para o grupo físico, sendo que as demais bases de regra estão apresentadas no Apêndice A.

Considerando que as variáveis de entrada detêm um quantitativo de três valores de saídas, exceto para o caso das bacteriológicas: coliformes totais e E. coli, que dispõe de apenas duas saídas, é importante ressaltar que, na construção das regras, a variável E. coli merece destaque, pois para o caso da presença deste parâmetro, o nível de saída é considerado inadequado, uma vez que põe a saúde humana em questão. A contaminação por esses

microrganismos atesta que a água é imprópria para consumo humano. A *Escherichia coli* (*E. coli*) é um indicador de contaminação humana ou animal. Mais preciso do que outras bactérias coliformes, a sua existência indica a presença potencial de bactérias nocivas causadoras de doenças (TROPEA, et al., 2021; KHAN e GUPTA, 2020).

Ao realizar as combinações entre as variáveis do grupo físico, obtém-se um total de nove regras, como é apresentado no Quadro 02.

Quadro 2: Base de Regra do Grupo Físico

Regra	SE	E	Então
	Sólidos	Turbidez	Definição
1	Inadequado	Inadequado	Inadequado
2	Inadequado	Médio	Baixo
3	Inadequado	Adequado	Baixo
4	Médio	Inadequado	Baixo
5	Médio	Médio	Médio
6	Médio	Adequado	Adequado
7	Adequado	Inadequado	Baixo
8	Adequado	Médio	Adequado
9	Adequado	Adequado	Ótimo

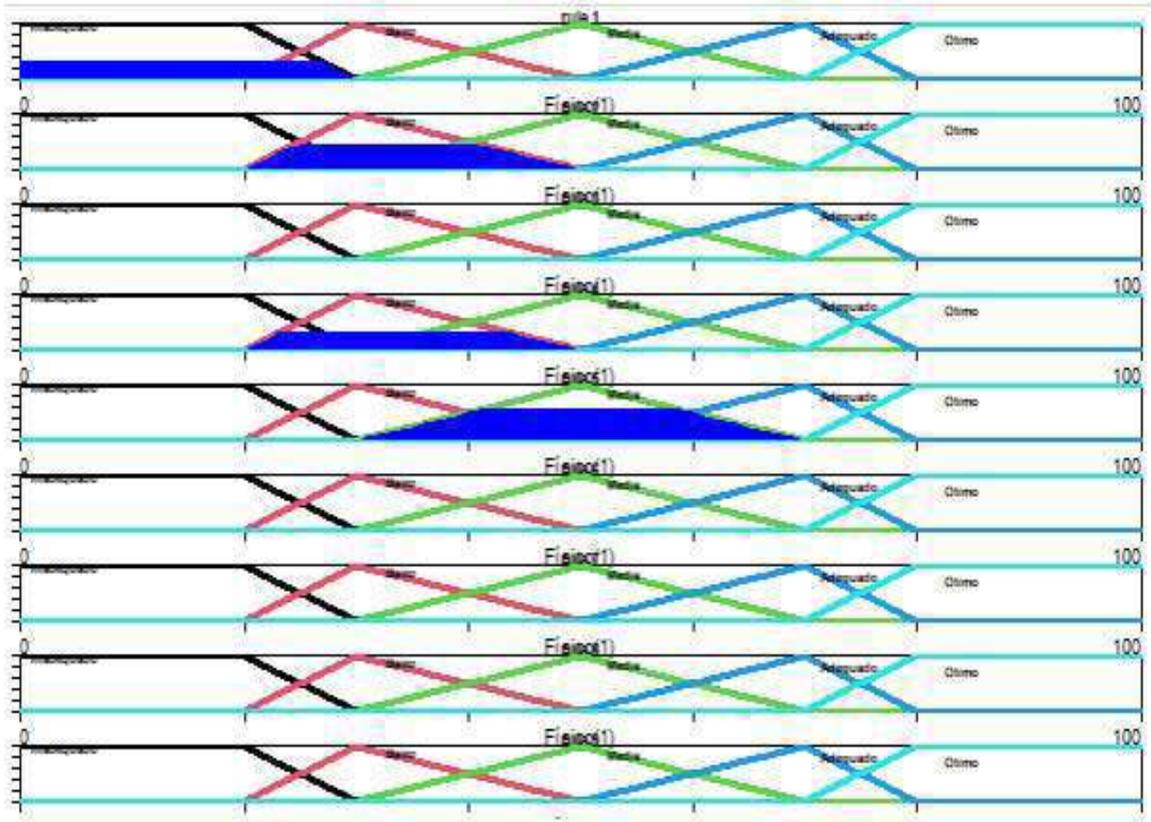
Fonte: Autor, 2022

3.4.4.6 Inferência Fuzzy

Após a criação da base de regra foi processada a inferência fuzzy aplicando o conceito Mamdani que utiliza os operadores Max-Min para as agregações. Nessa etapa a base de regras é modelada matematicamente (MAMDANI, 1975; PINTO et al., 2019). O operador *min* realiza a interseção entre os conjuntos fuzzy dos antecedentes através do conectivo E (and) nas regras Fuzzy. Calculando o grau de ativação de cada uma das regras e o operador *max* faz-se a união das saídas de todas as regras (FRANCISCO, 2021; ESCOTTÁ e BECCARO, 2019)

Nessa etapa são inseridos os valores para cada variável, onde é fornecido o grau de pertinência (representado pela cor azul da Figura 12) desses valores em cada regra elaborada. Para exemplificar, considerando um valor para sólidos totais de 616 e para turbidez 1.2, tem-se que para cada regra o sistema fornece o menor e o maior grau de pertinência para os valores adotados.

Figura 12: Inferência fuzzy- Exemplo do grupo Físico

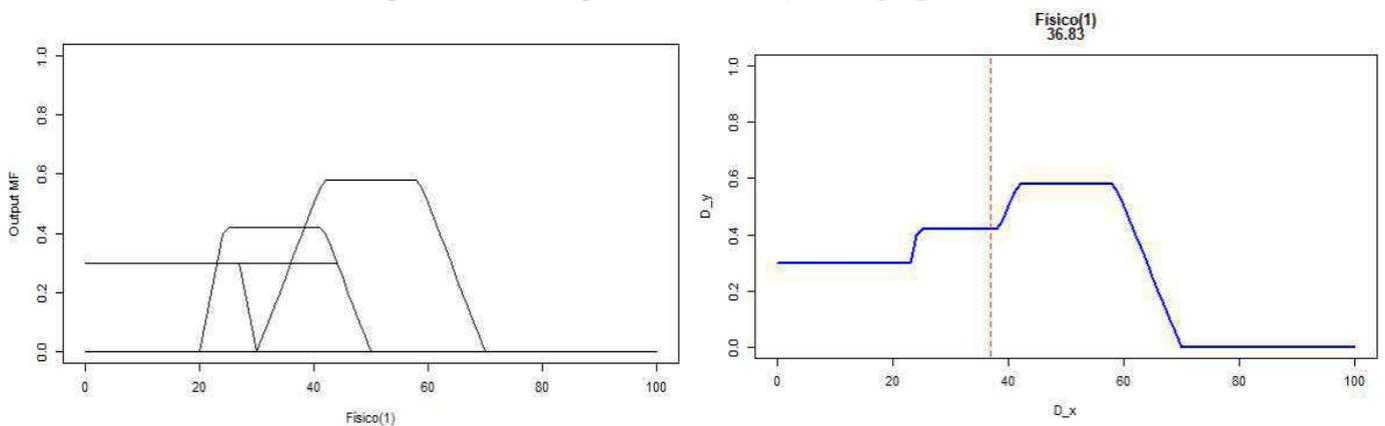


Fonte: Autor, 2022

3.4.4.7. Defuzzificação

Na etapa de defuzzificação, o resultado em conjunto fuzzy obtido pela etapa de inferência é transformado em um valor real. Neste estudo optou-se pelo método centróide, que calcula o centro de massa das áreas do conjunto fuzzy de saída (SANTOS, 2020; ESCOTTÁ e BECCARO, 2019). A Figura 13 exemplifica uma saída do conjunto fuzzy e sua defuzzificação.

Figura 13: Exemplo Defuzzificação do grupo Físico



Fonte: Autor, 2022

3.5 Implementação na Linguagem de Programação R.

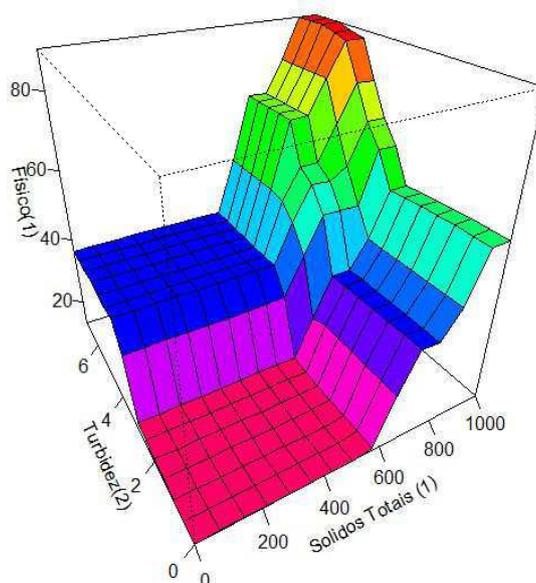
Para a implementação de cada sistema que compõe o IQASF foi utilizado o software livre RStudio na sua versão 4.2.1, especificamente o pacote FuzzyR (SERVIDONE et al., 2015). A escolha por essa linguagem é devido a sua viabilidade, pois é um recurso computacional acessível para o desenvolvimento de várias práticas da Lógica dos Conjuntos Fuzzy (IGLIORI e ARAÚJO, 2016).

A ferramenta computacional Rstudio conta com a interface simples e de linguagem R. A inserção de dados carece da criação de variáveis que mediam a estruturação do script. Cada variável deve ser desenvolvida linha por linha, com vista a carregar os pacotes, e nestes, os parâmetros que o norteiam.

Para a construção da linguagem, foram desenvolvidos quatro scripts: Sistema I (contendo variáveis, domínios e regras em relação aos parâmetros físicos); Sistema II (contendo variáveis, domínios e regras em relação aos parâmetros químicos); Sistema III (contendo variáveis, domínios e regras em relação aos parâmetros bacteriológicos); Sistema Final que foi agrupado as saídas do sistema I, II e III, criando uma saída denominada Índice de Qualidade de Água Subterrânea. Em seguida foi realizada a normalização do sistema e o script Main que adiciona os títulos principais e os rótulos de eixo com argumentos para a função plot () em R.

O gráfico de superfície da Figura 14, desenvolvido por meio do pacote “FuzzyR”, conta com o código “gensurf {FuzzyR}”, que cria “*Produce a graphical evaluated fuzzy inference system*”, ou seja, produz um sistema de inferência fuzzy em gráfico. Este modelo tridimensional é criado a partir dos parâmetros no SIF desenvolvido, tal como é. Vale ressaltar que o gráfico apresentado na Figura 14 é o plano de resposta das regras desenvolvidas, funciona para dois inputs e um output, ou seja, quando o sistema tem mais de dois inputs, deve-se analisar par a par.

Figura 14: Gráfico de superfície do grupo Físico



Fonte: Autor, 2022

Da mesma forma que o grupo Físico foi desenvolvido, os demais sistemas são produzidos em igual configuração. Vale ressaltar que estas superfícies apenas são projetadas, a partir da definição dos domínios estabelecidos e das bases de regras criadas considerando as questões levantadas junto aos especialistas. Após estes levantamentos, a elaboração e implementação do script, demonstra ser a parte menos complexa que há.

Contudo, o grau de complexidade deve estar de acordo com a especialidade do desenvolvedor do trabalho. Em virtude dos pormenores da escrita em R, após o delineamento de cada linha configurada, e o pré-processamento dos dados, a aplicação do modelo demonstra funcionalidade para com a objetividade proposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados primeiramente os resultados das análises das variáveis estudadas e obtidas através da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará para entender o comportamento dos poços e, em seguida, aplicado o Índice de Qualidade de Água Subterrânea Fuzzy - IQASF desenvolvido por meio dos Sistemas Baseados em Regras Fuzzy (SBRF). Por fim, serão apresentados os resultados da aplicação para o caso de estudo: Juazeiro do Norte – CE objetivando qualificar os poços em estudo.

4.1 Resultados do diagnóstico dos poços

Os parâmetros de monitoramento da qualidade de água bruta de Juazeiro do Norte, escolhidos como dados de entrada do IQASF: turbidez, sólidos totais dissolvidos, pH, nitrito, nitrato, cloreto, E.coli e coliformes totais estão em consonância com a Resolução CONAMA nº 396/2008.

A partir dos resultados das análises semestrais observou-se que na dimensão física, nenhum poço apresentou turbidez e sólidos totais dissolvidos acima dos valores máximos permitidos. Na dimensão química, o pH, o nitrito e o cloreto não exibiram teores maiores que o permitido, mas o parâmetro nitrato em alguns poços apontou valores acima de 10mg/L, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Poços com teores de nitrato acima do valor máximo permitido

Quantidade	Período	Poço	Localização	Nitrito mg/L	Nitrato mg/L	Cloreto
1	abr/21	36	POA Oeste	<0,005	17,55	37,00
	nov/21	36		<0,005	13,08	37,07
	mai/22	36		<0,005	12,6	32,97
2	abr/21	62	POA Oeste	<0,005	15,46	66,33
	nov/21	62		<0,005	11,09	36,07
	mai/22	62		<0,005	24,65	71,29
3	abr/21	7	POA Central	<0,005	14,78	42,00
	nov/21	7		<0,005	15,95	50,00
	mai/22	7		<0,005	15,95	33,48
4	abr/21	28	POA Central	<0,005	12,85	30,00
	nov/21	28		<0,005	14,71	30,06
	mai/22	28		<0,005	14,71	30,06
5	abr/21	27	POA Central	<0,005	11,35	24,05
6	abr/21	3	POA Central	<0,005	14,88	44,00
	nov/21	3		<0,005	18,53	44,00
	mai/22	3		<0,005	20,38	45,15
7	abr/21	35	POA Leste	<0,005	15,73	28,00
	nov/21	35		<0,005	15,35	28,00
	mai/22	35		<0,005	15,35	28,00

Informações: CAGECE – agosto, 2022; Fonte: Elaborado pela autora, 2022

O nitrato pode naturalmente ser encontrado em águas subterrâneas com valores variando entre 0,1 a 10 mg/L (BAIRD, 2002 apud BIGUELINI e GUMY, 2012). No diagnóstico dos resultados o nitrato ultrapassou o valor máximo permitido - VMP em 7 poços tanto na estação úmida como na estação seca (Tabela 6). Um dos meios de contaminação das águas subterrâneas por nitrato é através de esgoto domésticos e a sua predominância é

indicativo de contaminação antiga (PEIXOTO, 2017; VON SPERLING, 2014; FRANCA et al., 2006; VARNIER e HIRATA, 2002).

A persistência de elevado teor de nitrato inviabiliza o tratamento convencional, aumentando os custos operacionais (JENSEN, et al., 2014). Essa variação dos teores de nitrato pode requerer um tratamento mais rigoroso, uma vez que a Resolução CONAMA nº 396/2008 estabelece o valor máximo de 10mg/L para uso preponderante da água para consumo humano. O consumo da água com elevados teores de nitrato pode ocasionar doenças como metemoglobinemia e câncer (OLIVEIRA, et al., 2020; BEZERRA, et al., 2017; VARNIER; HIRATA, 2002).

Os valores altos de nitrato dos PT's 36, 62 e 07 podem estar relacionados com a ausência ou deficiência do sistema de esgotamento sanitário na área. Varnier et al (2019) e Gonçalves et al., (2018) afirmam que as falhas decorrentes de saneamento, tais como vazamento da rede de esgoto, fossas sépticas e negras, podem provocar a presença de altos níveis de nitrato nas águas.

O alto nível de nitrato no PT 28 pode estar associado com a localização do poço, que está situado no bairro João Cabral com grande densidade populacional, superior à 17.850 habitantes. O bairro possui cobertura de esgotamento sanitário, mas do tipo condominial, culturalmente as pessoas no local tampam o esgoto e voltam a utilizar a fossa séptica (SILVA, 2020), ou direcionam o esgoto para rua (Figura 15).

Para Guerra (2011) a grande densidade populacional, fossas sépticas e negras, redes coletoras mal projetadas e executadas podem ser fontes potenciais de contaminação por nitrato. Pois a elevada concentração de fossas negras, muito próximas aos poços cacimbas contribui para a migração dos efluentes líquidos (VARNIER, 2019).

Figura 15: Ausência de esgotamento sanitário, bairro João Cabral



Fonte: Imagens captadas pela autora, (2022).

Nos PT's 03 e 27 a contaminação pode ser justificada por esses estarem localizados próximos ao Riacho dos Macacos, a jusante de lançamentos de efluentes brutos e áreas de poluição do solo, com córregos de esgoto a céu aberto visíveis na vizinhança (FRANCA, et al., 2006), como registrado na Figura 16. Estudo realizado por Silva (2020) na localidade constatou que todos os poços próximos ao Riacho dos Macacos apresentaram altas concentrações de nitrato no período de 2013 a 2019.

Figura 16: (A) e (B) - lançamento de esgoto no Riacho dos Macacos, (C) localização do PT-03 e (D) e distância do PT-03 ao lançamento de esgoto



Fonte: Imagens captadas pela autora, (2022).

A contaminação do PT 35 possivelmente está relacionada com as contribuições advindas de esgotamento sanitário existente nas redondezas e pode ser decorrente do fato do poço está localizado próximo a dois cemitérios da cidade (Anjo da Guarda e São João Batista) (SILVA, 2020). Para HIRATA et al., (2015) e Lautz, Ledford e Beltran (2020) cemitérios próximos a poços é um fator que afeta a qualidade da água subterrânea. Estudos feitos por Batista et al., (2020) em Salvador, Bahia e por Bertachi et al., (2019) em Londrina, Paraná evidenciam altos níveis de nitrato na água em poços no entorno de cemitérios, devido a contaminação por necrochorume.

Na dimensão bacteriológica, 19 poços apresentaram coliformes totais e 5 destes poços também registraram presença de E.coli (Tabela 7).

Tabela 7: Poços com presença de Coliformes Totais e E.coli, resultados semestrais

Quantidade	Período	Poço	Localização	Coliformes Totais - NMP/100ml	E.coli - NMP/100ml
1	mai/22	19	POA Oeste	1	0
2	nov/21	47	POA Oeste	1	0
	mai/22	47		1	0
3	abr/21	62	POA Oeste	1	0
	nov/21	62		1	0
4	mai/22	59	POA Oeste	1	0
5	nov/21	21	POA Oeste	1	0
6	mai/22	45	POA Oeste	1	0
7	abr/21	7	POA Central	1	0
	mai/22	7		1	0
8	abr/21	42	POA Central	1	1
	nov/21	42		1	0
	mai/22	42		1	0
9	abr/21	20	POA Central	1	0
	mai/22	20		1	0
10	abr/21	4	POA Central	1	0
	nov/21	4		1	1
11	abr/21	50	POA Central	1	0
	nov/21	50		1	1
12	abr/21	5	POA Central	1	1
	nov/21	5		1	0
13	abr/21	8	POA Central	1	0
14	abr/21	3	POA Central	1	0
	mai/22	3		1	0
15	mai/22	44	POA Central	1	0
16	abr/21	35	POA Leste	1	0
17	abr/21	53	POA Leste	1	1
18	nov/21	55	POA Leste	1	0
	mai/22	55		1	0
19	nov/21	64	POA Leste	1	0
	mai/22	64		1	0

Informações: CAGECE – agosto, 2022; Fonte: Elaborado pela autora, 2022

Os poços da Tabela 7 apresentaram os parâmetros coliformes totais e E. coli, acima dos valores máximos permitidos pela Resolução CONAMA nº 396/2008. O período que mais registrou a presença dessas bactérias foi o chuvoso. De acordo com Da Silva, Sousa e Sodrê (2018), o período chuvoso apresenta valores maiores de E.coli e coliformes possivelmente por ter o maior carreamento de poluentes para os poços por infiltração, ou mesmo escoamento superficial.

No quadro 5 adaptado de Silva (2020) foram estabelecidas as possíveis fontes de poluição e o grau de contaminação, sendo consideradas fonte de poluição elevada e fontes de poluição baixa. Em complemento a pesquisa de Silva (2020) foi realizado o levantamento de novos poços ativados na área após o ano de 2020 e possíveis fontes de poluição associadas.

Em relação às análises mensais os PT's 03, 04 e 07 na maior parte dos meses também registraram altos teores de nitrato e presença de coliformes, as causas podem ser justificadas a partir do levantamento apresentado no quadro 5.

Considerando que os poços apresentados nas Tabelas 6 e 7 possuem altos teores de nitrato, acima do máximo permitido (10 mg/L) e presença de coliformes totais e E.coli, a possível causa de contaminação é por esgoto domésticos, como já discutido anteriormente.

Quadro 5: Possíveis fontes de poluição para poços com altos valores máximos permitidos de Nitrato, coliformes totais e E.coli.

Poços	Localização dos Poços Tubulares por Bairros	Densidade Populacional por bairro hab./10.000m ²	Ausência ou Deficiência de Esgotamento Sanitário	Drenagem Superficial – Riacho dos Macacos/Rio Salgado–Esgoto a céu aberto	Densidade Populacional (hab./10.000km ²)	Lixões/ Lixão céu aberto	Cemitério
PT - 03	Limoeiro	86,74	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 04	Limoeiro	86,74	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 05	Limoeiro	86,74	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 07	Limoeiro	86,74	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 08	Limoeiro	86,74	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 19	Frei Damião	19,25	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 20	Socorro	100,04	Poluição Baixa	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 21	Frei Damião	19,25	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 27	Pirajá	200,81	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Elevada	Poluição Baixa
PT - 28	João Cabral	258,08	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 35	Novo Juazeiro	45,43	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Elevada
PT - 36	Frei Damião	19,25	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 42	Vila Três Maria	5,52	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 44	Cidade Universitária	1,26	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 45	Frei Damião	19,25	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 47	Tiradentes	19,25	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 50	Vila Três Maria	5,52	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 53	Betolândia	11,47	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
	Profa. Francisca M ^a						
PT - 55	Geli Sá Barreto	12,18	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 59	São José	23,62	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 62	Antônio Vieira	73,30	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa
PT - 64	Pedrinhas	18,62	Poluição Elevada	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa	Poluição Baixa

Fonte: Adaptado de Silva 2022

4.2 Aplicação do modelo Fuzzy desenvolvido

Os resultados do modelo fuzzy aplicados aos dados das análises dos poços de Juazeiro do Norte têm como referência os anos de 2021 e 2022, apresentando-os a partir do índice final obtido (IQASF) e enfatizando também cada uma das dimensões utilizadas: física, química e bacteriológica.

4.2.1 Análises dos resultados do modelo IQASF escala semestral

A Tabela 9 apresenta dados de entrada do IQASF, de alguns poços da área de estudo, a apresentação desses poços é uma amostragem do funcionamento da aplicação do IQASF, sendo escolhidos por obterem os mais diversos resultados, sendo referentes a escala semestral e considerando as três dimensões utilizadas. Os demais poços foram avaliados seguindo igual metodologia.

Tabela 9: Dados de entrada do IQAS - Semestrais de 2021 e 2022

Poço	Período	Localização	Dimensão Física	Dimensão Química	Dimensão Bacteriológica	IQASF
36	abr/21	POA OESTE	100	60,56	100	99,92
	nov/21		100	49,68	100	72,17
	mai/22		99,07	61,24	100	99,83
24	abr/21	POA OESTE	100,00	93,16	100,00	100,00
	nov/21		100,00	92,55	100,00	100,00
	mai/22		76,98	92,36	100,00	99,11
19	abr/21	POA OESTE	100,00	98,67	100,00	100,00
	nov/21		100,00	98,73	100,00	100,00
	mai/22		100,00	93,31	50,00	72,17
47	abr/21	POA OESTE	94,50	87,44	100,00	100,00
	nov/21		92,67	92,16	50,00	72,17
	mai/22		85,35	85,67	50,00	72,17
62	abr/21	POA OESTE	100,00	61,73	50,00	27,86
	nov/21		100,00	60,81	50,00	27,84
	mai/22		90,66	58,81	100,00	96,44
59	abr/21	POA OESTE	100,00	99,10	100,00	100,00
	nov/21		100,00	96,08	100,00	100,00
	mai/22		100,00	96,19	50,00	72,17
21	abr/21	POA OESTE	100,00	90,18	100,00	100,00
	nov/21		95,04	98,74	50,00	72,17
	mai/22		100,00	87,54	100,00	100,00
45	abr/21	POA OESTE	100,00	89,44	100,00	100,00
	nov/21		100,00	89,28	100,00	100,00
	mai/22		100,00	89,29	50,00	72,17
7	abr/21	POA CENTRAL	99,38	53,89	50,00	28,31
	nov/21		100,00	55,50	100,00	88,00
	mai/22		100,00	46,17	50,00	34,83
28	abr/21	POA CENTRAL	100,00	58,81	100,00	96,44
	nov/21		100,00	67,12	100,00	98,96
	mai/22		100,00	67,12	100,00	98,96

42	abr/21	POA	100,00	88,23	0,00	50,00
	nov/21	CENTRAL	100,00	99,79	50,00	72,17
	mai/22		100,00	90,33	50,00	72,17
27	abr/21	POA	100,00	54,87	100,00	86,48
	nov/21	CENTRAL	100,00	55,63	100,00	88,32
	mai/22		97,28	54,61	100,00	85,85
20	abr/21	POA	100,00	98,76	50,00	72,17
	nov/21	CENTRAL	100,00	99,92	100,00	100,00
	mai/22		100,00	99,59	50,00	72,17
4	abr/21	POA	91,40	45,20	50,00	36,17
	nov/21	CENTRAL	100,00	51,94	0,00	34,89
	mai/22		100,00	48,48	100,00	72,14
50	abr/21	POA	81,86	81,26	50,00	72,17
	nov/21	CENTRAL	93,44	86,32	0,00	50,00
	mai/22		100,00	81,24	100,00	100,00
5	abr/21	POA	100,00	70,05	0,00	50,00
	nov/21	CENTRAL	100,00	73,14	50,00	49,23
	mai/22		100,00	57,29	100,00	92,38
8	abr/21	POA	87,99	72,29	50,00	45,32
	nov/21	CENTRAL	100,00	80,11	100,00	100,00
	mai/22		99,69	65,74	100,00	99,16
3	abr/21	POA	82,89	50,64	50,00	27,85
	nov/21	CENTRAL	100,00	53,33	100,00	82,72
	mai/22		100,00	52,82	50,00	28,11
44	abr/21	POA	100,00	98,59	100,00	100,00
	nov/21	CENTRAL	100,00	98,75	100,00	100,00
	mai/22		96,71	98,78	50,00	72,17
35	abr/21	POA LESTE	100,00	57,00	50,00	28,14
	nov/21		100,00	59,42	100,00	98,22
	mai/22		100,00	59,42	100,00	98,22
23	abr/21	POA LESTE	100,00	74,25	100,00	98,28
	nov/21		100,00	63,74	100,00	99,46
	mai/22		100,00	47,96	100,00	72,13
53	abr/21	POA LESTE	100,00	99,17	0,00	50,00
	nov/21		100,00	99,10	100,00	100,00
	mai/22		100,00	99,48	100,00	100,00
55	abr/21	POA LESTE	100,00	99,28	100,00	100,00
	nov/21		100,00	99,10	50,00	72,17
	mai/22		100,00	99,74	50,00	72,17
64	abr/21	POA LESTE	100,00	84,35	100,00	100,00
	nov/21		100,00	94,41	50,00	72,17
	mai/22		100,00	47,79	50,00	32,28

Fonte: autor, 2022

- Ótima
- Adequada
- Média Aceitável
- Baixa Qualidade

De acordo com a Tabela 9, na dimensão física os poços se classificam como adequados e/ou ótimos, na dimensão química é possível visualizar que 5 poços se categorizam com baixa qualidade (PT's: 04, 07, 23, 36 e 64), o nitrato foi o parâmetro que influenciou negativamente o resultado dessa dimensão. Nos poços 36 e 07 os valores de nitrato apresentaram-se acima do

VMP pela Resolução CONAMA nº 396/2008, já nos poços 04, 23 e 64 os resultados de nitrato se aproximam ao VMP da mesma resolução.

A partir da avaliação dessa dimensão, o IQASF desenvolvido mostra-se eficiente para o gestor, pois na medida que os valores se aproximam do VMP, o índice aponta qual dimensão está em desconformidade, alertando para a necessidade de maior monitoramento na área e levantamento das medidas preventivas a serem tomadas. Metodologias semelhantes foram adotadas por Pessoa et al., (2020) e Conceição et al., (2020) e mostraram resultados satisfatórios para avaliações de qualidade de água contidas nos relatórios disponíveis.

Obtiveram classificação “média aceitável” 11 poços (PT's: 03, 04, 05, 07, 08, 23, 27, 28, 35, 36 e 62) da área avaliada. Esses resultados foram influenciados pelas variações dos valores de pH e nitrato como mostra o Quadro 3.

Os poços 08 e 23, no 1º semestre de 2021, e o PT 05, no 2º semestre de 2021, classificaram-se como “adequados”, resultados decorrentes do decaimento dos valores de nitrato, uma vez que quanto mais se afasta dos VMPs melhor é o resultado do indicador. O restante dos poços obteve classificação “ótima”.

Em relação a dimensão bacteriológica, cinco poços assumiram baixa qualidade, PT's 04, 05, 42, 50 e 53, pois constatou-se a presença tanto de coliformes totais quanto de E.coli, influenciando negativamente o resultado dessa dimensão. Estudo realizado por Johnson et al., (2021) no sudoeste da Nigéria mostrou que dos 20 pontos avaliados no estudo apenas 8,3% se categorizam como adequados quando aplicado sistema baseado em fuzzy, isso ocorreu pelo impacto dos coliformes totais na área. Resultados semelhantes foram obtidos por Hu et al., (2022) no Canadá, onde a presença bacteriológica influenciou negativamente a avaliação sintética fuzzy – FSE da água estudada.

A classificação nas três dimensões influencia diretamente o resultado do IQASF. Dessa forma, os baixos valores de turbidez e sólidos suspensos totais influenciaram de forma positiva o resultado obtido pelo índice final, da mesma forma ocorre nas dimensões química e bacteriológica, onde baixos teores de nitrito, nitrato e cloreto e ausência de coliformes totais e E.coli contribuíram para essa avaliação positiva reproduzida pelo modelo Fuzzy desenvolvido.

O Quadro 3 apresenta a classificação da qualidade dos poços por semestre com a aplicação do IQASF, onde 15 dos poços analisados apresentaram classificação “ótima” para todos os semestres, são eles: PT's: 24, 40, 15, 58, 09, 28, 27, 14, 34, 38, 26, 41, 48, 46 e 60.

Quadro 3: Classificação dos poços por semestre

Poço Tubular	Posto de Operação de Água	Classificação		
		Semestres de 2021		Semestres de 2022
		1º Semestre	2º Semestre	1º Semestre
24	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
36	POA Oeste	Ótimo	Adequada	Ótimo
40	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
19	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Adequada
15	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
47	POA Oeste	Ótimo	Adequada	Adequada
58	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
62	POA Oeste	Baixa Qualidade	Baixa Qualidade	Ótimo
59	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Adequada
21	POA Oeste	Ótimo	Adequada	Ótimo
45	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Adequada
9	POA Oeste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
7	POA Central	Baixa Qualidade	Ótimo	Baixa Qualidade
28	POA Central	Ótimo	Ótimo	Ótimo
42	POA Central	Média Aceitável	Adequada	Adequada
27	POA Central	Ótimo	Ótimo	Ótimo
20	POA Central	Adequada	Ótimo	Adequada
4	POA Central	Baixa Qualidade	Baixa Qualidade	Adequada
50	POA Central	Adequada	Média Aceitável	Ótimo
5	POA Central	Média Aceitável	Baixa Qualidade	Ótimo
8	POA Central	Baixa Qualidade	Ótimo	Ótimo
3	POA Central	Baixa Qualidade	Ótimo	Baixa Qualidade
14	POA Central	Ótimo	Ótimo	Ótimo
44	POA Central	Ótimo	Ótimo	Adequada
35	POA Leste	Baixa Qualidade	Ótimo	Ótimo
34	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
23	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Adequada
53	POA Leste	Média Aceitável	Ótimo	Ótimo
38	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
26	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
41	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
48	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
46	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
60	POA Leste	Ótimo	Ótimo	Ótimo
55	POA Leste	Ótimo	Adequada	Adequada
64	POA Leste	Ótimo	Adequada	Baixa Qualidade

Fonte: Autor, 2022

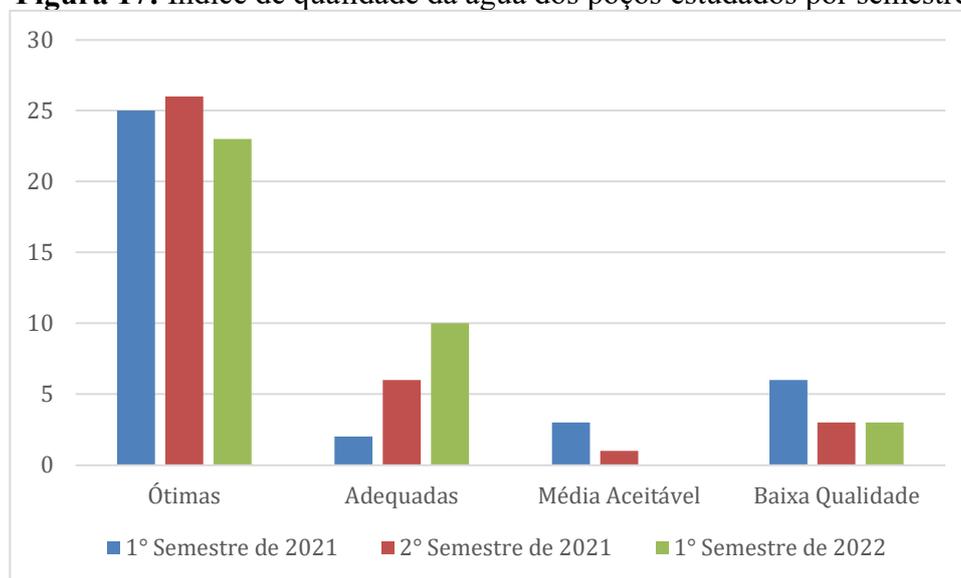
Os poços tubulares 4 e 62 apresentaram baixa qualidade nas semestrais de 2021, indicando ao gestor que há uma necessidade de monitoramento mais restritivo e que devem ser tomadas medidas apropriadas para restaurar a água em padrão de qualidade, bem como alertar os órgãos responsáveis quanto às possíveis causas de decaimento de qualidade da água desses poços.

Os poços 3 e 7 nos primeiros semestres de 2021 e 2022 apresentaram baixa qualidade da água, como mostra a Figura 17. Essas alterações de qualidade podem estar associadas às variações climáticas (precipitações e temperaturas) (ANA, 2022) visto que as alterações da qualidade ocorreram em períodos de chuvas. De acordo com o Climate Data (2022) no primeiro semestre de 2021 média de precipitação foi de 145,00 mm e temperatura de 24,7°, já no segundo semestre de 2021 a média de precipitação foi de 25mm e com temperatura de em média 29°.

Estudos realizados por Grott et al., (2018) em águas subterrâneas no Amapá e por Batista Vieira et al., (2020) em Pernambuco, apontaram que a qualidade das águas apresentou maior risco sanitário no período chuvoso. Von Sperling (2005) afirma que a qualidade da água pode ser interferida por fatores climáticos a partir da precipitação, que é responsável por carregar partículas de solo para o aquífero.

A Figura 18 apresenta o resultado da aplicação do IQASF na agregação das três dimensões nos 35 poços e para os três semestres de análises.

Figura 17: Índice de qualidade da água dos poços estudados por semestre



Fonte: Autor, 2022

No primeiro semestre de 2021, dos poços analisados 25 se classificaram como ótimos, 2 como adequados, 3 com média aceitável, 6 como de baixa qualidade e nenhum se classificou

como inadequado. Os parâmetros que mais se apresentaram fora do valor máximo permitido foram: coliformes totais, seguidos de E. coli e nitrato. Nenhum dos poços analisados ultrapassou o valor máximo permitido do nitrito (1 mg/L), cloreto (250 mg/L) e sólidos totais (1000 mg/L).

No segundo semestre de 2021, a classificação “ótima” teve a maior contagem de Índice de qualidade de água totalizando 26 poços, seguidos por “adequada” em 6 poços, “baixa qualidade” em 3 poços e 1 com classificação “médio aceitável”. Do primeiro para o segundo semestre de 2021 houve melhoria na qualidade, onde 8,33% poços saíram da categoria baixa qualidade para a categoria ótima, isso ocorreu pois na dimensão bacteriológica houve melhorias nos resultados das análises desses poços, o PT’s 03, 07, 08 e 35 no segundo semestre não apresentaram a presença de coliformes totais.

O modelo desenvolvido permite ao gestor visualizar em qual dimensão os poços estão com decaimento da qualidade, antes mesmo de chegar ao valor máximo permitido, sendo uma ótima ferramenta para prevenção de problemas, pois na medida em que os parâmetros se aproximam do VMP, o índice qualifica o resultado. Dessa forma o IQASF pode ser muito útil para os tomadores de decisão auxiliando no rastreamento de mudanças na qualidade da água ao longo do tempo e permitindo comparar resultados de diferentes poços em diferentes locais.

No primeiro semestre de 2022, 63,89% dos poços foram classificados como de ótima qualidade, 27,78% como adequada qualidade e 8,33% com baixa qualidade. Na análise desse semestre nenhum poço se classificou como média aceitável ou inadequado. Silva et al., (2020), Coutinho et al., (2013) e Lisboa et al., (2010) consideraram em seus estudos que a aplicação de lógica fuzzy na classificação de qualidade de água é um meio preciso e eficaz e sua aplicabilidade é significativa por contar com o conhecimento de especialistas possibilitando qualificar os resultados.

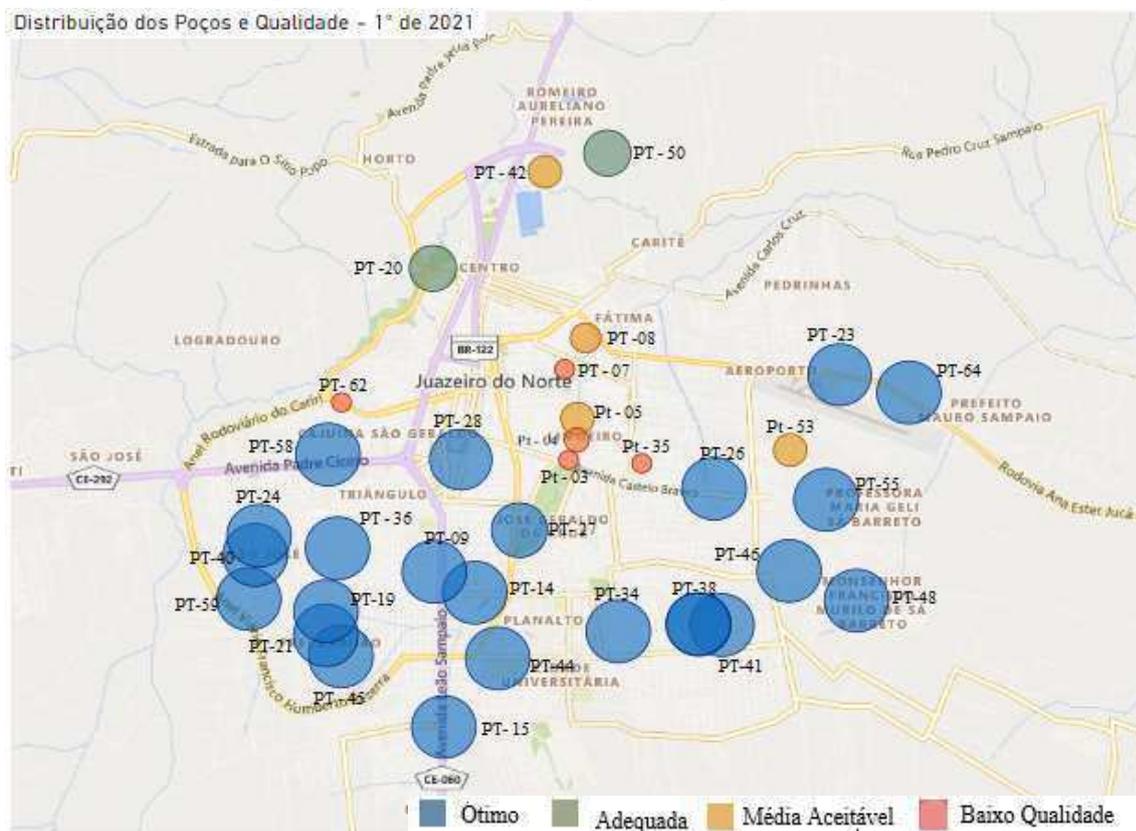
Na aplicação do índice o PT – 64 apresentou um comportamento de decaimento de qualidade, visto que o primeiro semestre de 2021 foi enquadrado como ótimo, no segundo como adequado, mas no primeiro semestre de 2022 como baixa qualidade. Este fato ocorreu devido ao aumento significativo dos resultados de nitrato que em 2021 foi de 4,63 mg/L (valor médio) e em 2022 7,43 mg/L, além de indicar a presença de coliformes totais.

Essa variação da qualidade pode estar associada a ausência de sistema de esgotamento sanitário no local. Sperling (2014) afirma que a presença de CT em águas é um indicativo de contaminação bacteriana encontrada nas fezes, por outro lado a presença de coliformes totais pode estar associada também à contaminação pelo solo

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial dos poços na área de estudo no 1º semestre de 2021. Os círculos com maior volume e de cores azuis representam a ótima qualidade do poço, de cores esverdeadas e com menor proporção de tamanho significa que o poço está com qualidade adequada, os de cores alaranjadas representam poços com qualidade média aceitável. Os círculos menores e de cores avermelhadas representam os poços que estão com baixa qualidade e que necessitam de maior atenção, monitoramento e medidas preventivas.

Observa-se que a maior concentração de poços que apresentaram baixa qualidade encontra-se no centro do município, onde há maior densidade urbana, centros comerciais, restaurantes e onde também ocorre uma maior deficiência ou ausência do sistema de esgotamento sanitário. A representação especializada facilita a interpretação dos valores, pois quanto maior a circunferência do círculo melhor será a qualidade do poço.

Figura 18: Distribuição espacial da qualidade dos Poços



Fonte: Autor, 2022

Com base nos resultados obtidos através do IQASF, a Figura 19 demonstra que os poços 03, 04, 05, 07, 08, situados em área mais central, de grande fluxo populacional, vulnerável à poluição e próxima ao riacho dos Macacos, apresentaram baixa qualidade. A partir dessa classificação o gestor poderá investigar possíveis causas de redução de qualidade associadas

ao uso do solo e fontes de poluição e mitigar a solução do problema, acionando órgãos fiscalizadores do meio ambiente.

4.2.2 Análises dos resultados do modelo IQASF proposto mensal

O índice de qualidade de água subterrânea – IQASF também foi aplicado nos poços a partir dos dados mensais, para verificar o comportamento em diferentes períodos do ano. Para melhor observar e discutir a aplicação do IQASF, os poços foram separados por posto de operação de água – POA leste, central e oeste no período de 13 meses.

i) Posto de Operação de Água Leste

A Tabela 8 mostra a quantidade de poços por classificação durante o mesmo período. Os valores IQASF mostram que, no geral, os poços localizados no POA – Leste apresentam boa qualidade, em outubro todos os poços se classificaram como de ótima qualidade. Apenas o PT – 35 apresentou qualidade baixa nos meses de maio, junho, agosto e setembro, devido a presença de coliformes totais e do alto teor de nitrato, nos demais meses o poço apresentou ótima qualidade.

Tabela 8: Classificação dos poços do POA - Leste

Ano	Mês/ Classificação	Ótima	Adequada	Média Aceitável	Baixa Qualidade	Inadequada
2021	Abril	8	3	1	0	0
	Maio	8	3	0	1	0
	Junho	6	5	0	1	0
	Julho	7	4	1	0	0
	Agosto	9	2	0	1	0
	Setembro	7	3	1	1	0
	Outubro	12	0	0	0	0
	Novembro	9	2	1	0	0
	Dezembro	9	2	1	0	0
	2022	Janeiro	8	4	0	0
Fevereiro		6	6	0	0	0
Março		10	1	1	0	0
Abril		9	2	1	0	0

Fonte: autor, 2022

Na dimensão física em nenhum mês estudado houve resultados negativos, influenciando assim o índice de forma positiva. O menor valor apresentado na dimensão

química foi 51,28, do PT – 23, nos meses de janeiro a abril de 2022, o nitrato apresentou valores entre 6,63 - 7,1 mg/L. Em complemento a Figura 20 apresenta o resultado das três dimensões e do IQASF no período analisado.

Em relação a dimensão bacteriológica somente os meses de maio e junho de 2021 geraram resultados positivos para coliformes totais influenciando negativamente o IAQSF. A Figura 20B demonstra que nos meses de novembro e dezembro de 2021 e fevereiro de 2022 a dimensão bacteriológica tem decaimento dos seus valores, influenciando negativamente o IQASF. O mesmo padrão é estabelecido para os demais poços.

Durante o período analisado apenas um poço (PT – 35, Figura 20A) se classificou com baixa qualidade. As dimensões que influenciaram esse resultado foram químicas e bacteriológicas, nos meses de maio, junho, agosto e setembro de 2021, entretendo, em nenhum mês de 2022 esse poço apresentou baixa qualidade.

ii) Posto de Operação de Água Central

Os resultados do modelo Fuzzy desenvolvido foram aplicados nos dados do POA – Central que têm como referência os meses de abril a dezembro de 2021 e janeiro a abril de 2022. A Tabela 9 apresenta a quantidade de poços por classificação e a Figura 21 ilustra o IQASF e aborda os resultados obtidos nas três dimensões.

Tabela 9: Classificação dos Poços do POA Central

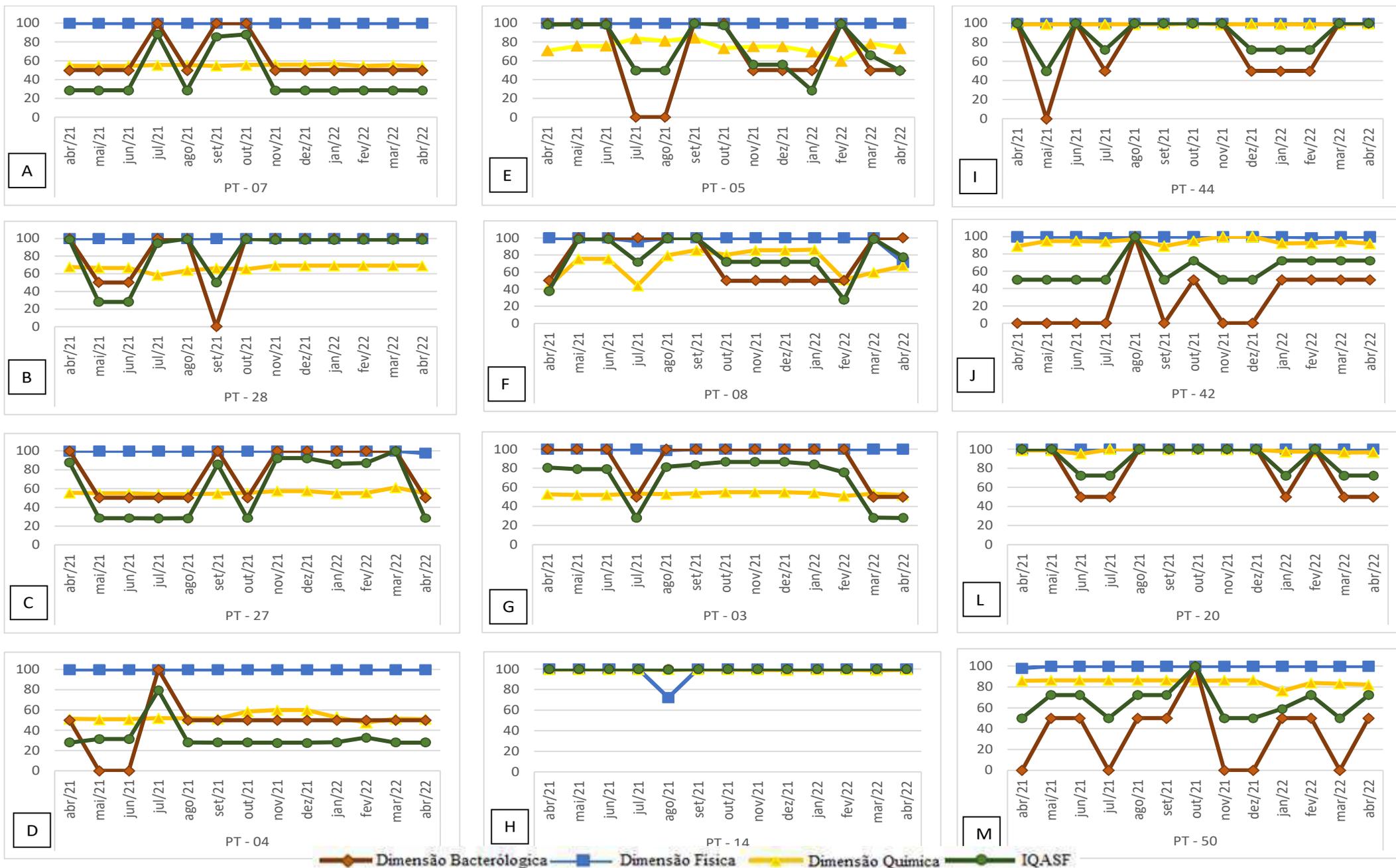
Ano	Mês/ Classificação	Quantidade de Poços				
		Ótima	Adequada	Média Aceitável	Baixa Qualidade	Inadequada
2021	Abril	6	1	2	3	0
	Maio	4	2	2	4	0
	Junho	4	3	1	4	0
	Julho	3	4	3	2	0
	Agosto	7	1	1	3	0
	Setembro	8	1	2	1	0
	Outubro	8	2	0	2	0
	Novembro	6	1	3	2	0
	Dezembro	5	2	3	2	0
2022	Janeiro	4	4	1	3	0
	Fevereiro	5	4	0	3	0
	Março	5	2	2	3	0
	Abril	3	4	0	5	0

Fonte: Autor, 2022

O POA – Central foi o posto de operação de água, que mais apresentou poços com classificação de baixa qualidade em comparação com o POA Oeste e POA Letes. Dos 12 poços estudados, 7 em diferentes meses obtiveram essa classificação e os meses com maior frequência foram abril, maio e junho.

Ao verificar as três dimensões, constatou-se que o menor valor obtido para o físico foi de 71,49 no PT – 08 (Figura 21F), o que pouco interferiu no resultado do índice. Já a dimensão química, o menor valor foi de 43,77 também encontrado no PT – 08 (Figura 21F).

Figura 20: Evolução dos valores obtidos 2021 e 2022 nas três dimensões e IQASF - POA Central



A dimensão bacteriológica foi a que mais influenciou negativamente o IQASF, sendo encontrada com baixos valores em 11 poços em diferentes meses do ano.

Na medida que há variação entre os valores em qualquer uma das três dimensões o índice sofre alterações, sejam elas positivas ou negativas, como por exemplo, nas Figuras 21C, D, F, G, J e M onde as variações na dimensão química no decorrer do período influenciaram o resultado do IQASF.

iii) Posto de Operação de Água Oeste

Os resultados do IQASF para o POA – Oeste estão indicados na Figura 22 em complemento a Tabela 10 apresenta a quantidade de poços por classificação. Os poços estudados nessa área, majoritariamente, apresentam boa qualidade. Em nenhum mês obtiveram classificação de inadequado, e em apenas dois poços as águas classificaram-se como de baixa qualidade, conforme observado nas Figuras 22C e I. Apesar da boa qualidade, os poços nessa área necessitam de contínuo monitoramento por parte dos gestores para manter o padrão atual uma vez que se observa um crescimento populacional no setor que pode influenciar a classificação atual de qualidade indicada pelo índice.

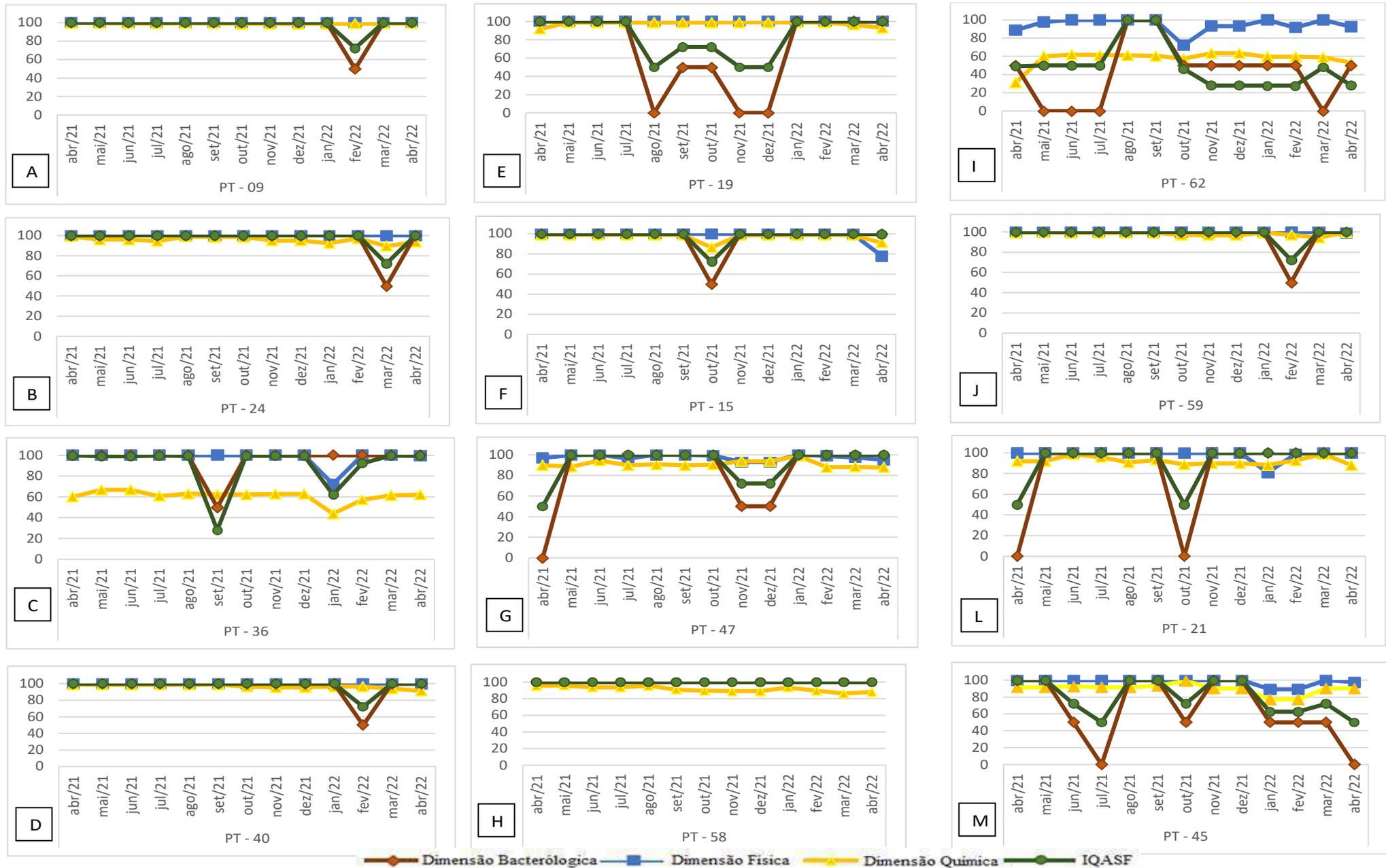
Para a dimensão física o menor valor obtido foi 72,17 no mês de janeiro de 2022 no PT – 36 (Figura 22C), esse valor não traz impactos negativos para o índice, pois dentro dos estabelecidos valores entre 71 e 80 são considerados adequados.

O mesmo poço (PT – 36) apresentou valor baixo na dimensão química, 43,77, impactando negativamente o IQASF (Figura 22C) pois, de acordo com a classificação estabelecida, são considerados de baixa qualidade valores entre 21 e 49. Com o resultado dessa dimensão, os tomadores de decisão podem investigar quais as possíveis fontes que impactam esses parâmetros e planejar estratégias para solucionar e prevenir para que esses recursos hídricos não sejam prejudicados futuramente. Na dimensão bacteriológica, 11 poços obtiveram valores parcialmente negativos em diferentes meses do ano, 4 poços obtiveram valores nulos nessa dimensão influenciando o IQASF como mostram as Figuras 22E, I, M, e G. Esses valores correspondem a presença de coliformes e E. coli nos resultados laboratoriais. O PT – 58 (Figura 22H) apresentou ótima classificação nas três dimensões.

Tabela 10: Classificação dos Poços do POA Oeste

Ano	Mês/ Classificação	Quantidade de Poços				
		Ótima	Adequada	Média Aceitável	Baixa Qualidade	Inadequada
2021	Abril	9	0	2	1	0
	Maio	11	0	1	0	0
	Junho	10	1	1	0	0
	Julho	10	0	2	0	0
	Agosto	11	0	1	0	0
	Setembro	10	1	0	1	0
	Outubro	7	3	1	1	0
	Novembro	9	1	1	11	0
	Dezembro	9	1	1	1	0
	Janeiro	9	0	2	1	0
2022	Fevereiro	7	3	1	1	0
	Março	9	2	0	1	0
	Abril	10	0	1	1	0

Figura 21: Evolução dos valores obtidos 2021 e 2022 nas três dimensões e IQASF - POA Oeste



iv) Discussão dos resultados do IQASF após a análise separada por posto

Os valores do IQASF mostram que, em geral, nos meses de julho, agosto, novembro e dezembro de 2021, além de janeiro de 2022 apresentam variações na qualidade da água na dimensão bacteriológica. Esses meses apresentam presença de coliformes totais e E.coli que segundo o modelo fuzzy desenvolvido são classificados como qualidade baixa, sendo um indicativo aos gestores da necessidade de monitoramento dos poços nesses meses e tratamento mais rigoroso após a captação da água. De acordo com Egbimhanlu et al., (2020) o monitoramento da qualidade da água é essencial para assegurar sua disponibilidade contínua de forma segura para uso doméstico.

A dimensão bacteriológica interfere negativamente no resultado do IQASF, pois aspectos como presença de coliformes e E.coli contribuem para que a água subterrânea seja classificada como de baixa qualidade e, conseqüentemente, requer mais atenção por parte dos órgãos fiscalizadores.

De uma forma geral na dimensão física, os poços estudados apresentam valores acima de 71%, elevando o valor do IQASF. Na dimensão química os resultados ficaram acima de 40% que também contribuíram para o aumento do valor do IQASF. A avaliação por dimensão, mostra-se como ferramenta importante, pois permite aos gestores analisarem os parâmetros que têm características afins, facilitando a busca das possíveis causas que provocam o decaimento da qualidade da água e os melhores tratamentos para cada caso.

A Tabela 11 apresenta a quantidade de poços por classificação. De uma forma geral a categoria “ótima” obteve a maior contagem de Índice de Qualidade de Água no período estudado, seguido de “adequado”, “baixa qualidade”, “média aceitável” e nenhum dos poços se classificou como inadequado. A persistência na classificação baixa qualidade é um indicativo para o gestor que o poço precisa de manutenção e maior supervisão, para trabalhar na prevenção de melhoria da qualidade desse recurso.

Tabela 11: Classificação dos poços quanto a qualidade das águas

Ano	Mês/ Classificação	Ótima	Adequada	Média Aceitável	Baixa Qualidade	Inadequada
2021	Abril	23	4	5	4	0
	Maio	23	5	3	5	0
	Junho	20	9	2	5	0
	Julho	20	8	6	2	0
	Agosto	27	3	2	4	0
	Setembro	25	5	3	3	0

	Outubro	27	5	1	3	0
	Novembro	24	4	5	3	0
	Dezembro	23	5	5	3	0
	Janeiro	21	8	3	4	0
2022	Fevereiro	18	13	1	4	0
	Março	24	5	3	4	0
	Abril	22	6	2	6	0

Fonte: Autor, 2022

A contagem de qualidade baixa apresentou-se 50 vezes nas análises desses poços, sendo necessária a atenção e alertando para as possíveis causas que podem levar esses poços a apresentarem parâmetros abaixo do preconizado pela legislação e distribuição desse recurso.

Contabilizando todos os meses analisados, 68 poços apresentaram com ótima qualidade, 37 poços com baixa qualidade, 31 foram classificados como adequados, 20 com média aceitável e nenhum inadequado. Os PT's 04, 07 e 27 apresentaram-se com baixa qualidade em 12, 10 e 6 meses, respectivamente, do período estudado, seguidos dos PT's 03, 05 e 08 que tiveram variações da qualidade. Os poços que apresentam persistência com baixa qualidade de água têm parâmetros como nitrato e coliformes totais ultrapassando os valores máximos exigidos.

Com a avaliação dos resultados semestrais e mensais apresentado na seção 4.1, o modelo Fuzzy desenvolvido mostrou-se eficiente, pois considerou o peso da base de regra em cada dimensão, respondendo corretamente em todos os testes aplicados.

Na primeira dimensão, aspectos físicos apresentaram ótimos resultados, o que indica que os poços estudados estão adequados. Na segunda dimensão os poços começam a ter variações de qualidade devido os aspectos químicos estarem próximo ou ultrapassarem os valores máximos permitidos, indicando a necessidade de melhoria de infraestrutura e monitoramento constante, além de alertar para a investigação das causas e até mesmo monitoramento da qualidade de água após o tratamento, para verificar sua eficiência. Nessa dimensão o modelo desenvolvido respondeu adequadamente a essas variações da qualidade.

Na terceira dimensão, bacteriológica, os resultados mostram uma condição parcialmente adequada, pois alguns poços persistiram com baixa qualidade, exercendo influência negativa no resultado IQASF. O modelo desenvolvido nesta dimensão, mostra-se uma ferramenta útil para o gestor, especialmente para a tomada de decisão tanto para indicação de tratamento a ser dados para água e o momento que ele deverá acontecer, como também para ações de prevenção e estímulo à promoção de obras de esgotamento sanitário no município.

Por fim, o desempenho do modelo fuzzy IQASF desenvolvido nesta pesquisa, aplicado aos dados de análises de qualidade de água de Juazeiro do Norte mostrou-se satisfatório, pois permitiu a avaliação dos poços em três importantes dimensões, além de possibilitar a avaliação o gestor na agregação das três dimensões e acompanhar a classificação dos poços mês a mês.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização da teoria dos conjuntos fuzzy como ferramenta para desenvolver modelos de apoio à tomada de decisão, ganha cada vez mais espaço nos mais variados campos da ciência. O método Mamdani propõe uma modelagem, com base na matemática, munido de uma base de regras. Desta forma, o desenvolvimento de um índice de disponibilidade de água subterrânea enaltece tal assertiva.

Os resultados da aplicação do IQASF no município de Juazeiro do Norte – CE demonstra que a maior parte dos poços se classifica entre ótima e adequada qualidade. Os poços com classificação de baixa qualidade tiveram influências negativas das dimensões química e bacteriológica. Onde as variáveis que mais impactaram esse resultado foram nitrato e coliformes totais. A aplicação do IQASF na área de estudo validou o índice criado.

Com efeito, a consulta aos especialistas é de fundamental importância para o desenvolvimento da base de regras para a modelagem matemática do objeto estudado, assim, funções de pertinência fuzzy ajudam a capturar a imprecisão das variáveis que são de natureza subjetiva.

Os usos dos bancos de dados e das ferramentas computacionais gratuitas tornam a geração de informação pública, bem como a possibilidade de estudos para avanços tecnológicos de forma a beneficiar a sociedade, artificios para uso contínuo, além do fortalecimento das metodologias de coleta, armazenamento, processamento e criação de novos arcabouços comunicacionais.

Por conseguinte, a estruturação de um índice de qualidade de água subterrânea visa colaborar para a sociedade, e demais entidades e contribuir para um manejo sustentável desse bem, com vista a evitar problemas de escassez hídrica em um país com má distribuição espaço-temporal do recurso.

Dessa forma, o IQASF pode ser muito útil no rastreamento de mudanças na qualidade da água em um determinado local de amostragem ao longo do tempo, comparando-os diretamente entre locais diferentes. Se algum parâmetro utilizado como dado de entrada se aproximar ou ultrapassar o valor máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 396/2008, medidas apropriadas podem ser tomadas pelos gestores desse recurso para restaurar a água em padrão de qualidade, bem como alertar os órgãos responsáveis quanto às possíveis causas de decaimento de qualidade de água subterrânea.

O IQASF desenvolvido pode ser aplicado em benefício de uma gestão eficaz, auxiliando os tomadores de decisão, pois a metodologia adotada neste índice permite que os

resultados das análises em laboratórios possam ser qualificados em termos linguísticos. Tal classificação pode ser utilizada por gestores para o desenvolvimento e/ou melhoria de políticas sustentáveis em relação à qualidade da água subterrânea.

A metodologia utilizada no desenvolvimento de índice oferece uma avaliação da qualidade da água subterrânea flexível e sua estrutura é de fácil modificação e/ou implementação de valores caso, no local de estudo, seja necessária a adoção de outros critérios de valores máximos permitidos, regidos pelas legislações locais. Dessa forma é possível ser utilizada em qualquer região.

Em função dos conceitos explorados neste trabalho e dos resultados obtidos na aplicação de fuzzy para qualificar as águas subterrâneas, recomenda-se para trabalhos futuros a utilização do IQASF para diferentes cidades que tenham o abastecimento de água subterrânea. A segunda recomendação é utilizar a metodologia proposta neste trabalho para avaliar a qualidade da água para múltiplos usos como industrial, irrigação e pecuária. A terceira recomendação é comparar os resultados obtidos com o IQASF com o IQA.

Recomenda-se ainda a aplicação da lógica fuzzy para:

- Avaliar a disponibilidade de água subterrânea;
- Criar indicadores de qualidade do esgotamento sanitário;

REFERÊNCIAS

- ABIA, Akebe Luther King; ALISOLTANI, Arghavan; UBOMBA-JASWA, Eunice; DIPPENAAR, Matthys Alois (2019). Microbial life beyond the grave: 16S rRNA gene-based metagenomic analysis of bacteria diversity and their functional profiles in cemetery environments. **Science of The Total Environment**, 655(), 831–841. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.11.302
- ADIMALLA, N.; WU, J. (2019). Groundwater quality and associated health risks in a semi-arid region of south India: Implication to sustainable groundwater management. Human and Ecological Risk Assessment: An **International Journal**, 1–26. doi:10.1080/10807039.2018.1546550
- ADIMALLA, Narsimha; TALOOR, Ajay Kumar (2019). Hydrogeochemical investigation of groundwater quality in the hard rock terrain of South India using Geographic Information System (GIS) and groundwater quality index (GWQI) techniques. **Groundwater for Sustainable Development**, (), 100288–. doi:10.1016/j.gsd.2019.100288.
- Agência Nacional de Águas - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: Relatório pleno. Brasília, DF.169p. 2017.
- Agência Nacional de Águas (Brasil). Plano Nacional de Segurança Hídrica / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, 2019
- ALMEIDA, Rosa Alencar Santana De; Oliveira, Iara Brandão De. Índice de qualidade de uso da água subterrânea (E-IQUAS): aplicação para comunicar o estado da água em dois estudos de caso - Camaçari (BA) e Verdelândia (MG). **Águas Subterrâneas** (São Paulo), v. 31, p. 88, 2017.
- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. CONJUNTURA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL, 2022. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/quanti-quali>. Acessado: 16 out 2022.
- ARAUJO, Carlos Renir Soares De. **O uso da água subterrânea no semiárido cearense: reflexões necessárias**. Anais do VII CONAPESC... Campina Grande: Realize Editora, 2022.
- ARAUJO, P. C.; IGLIORI, S. B. C. Um aspecto da incerteza: lógica difusa no ambiente R. In: XII Encontro Nacional de Educação Matemática, 2016, São Paulo. Anais do XII ENEM. São Paulo: SBEM, 2016. v. 1. p. 1-1.
- ASADI, Esmail et al., (2019). Groundwater Quality Assessment for Sustainable Drinking and Irrigation. **Sustainability**, 12(1), 177–. doi:10.3390/su12010177
- AWADH, Salih Muhammad; AL-MIMAR, Heba; YASEEN, Zaher Mundher (2020). Groundwater availability and water demand sustainability over the upper mega aquifers of Arabian Peninsula and west region of Iraq. **Environment, Development and Sustainability**. doi:10.1007/s10668-019-00578-z
- BADEENEZHAD, Ahmad; TABATABAEE, Hamid Reza; NIKBAKHT, Hossein-Ali; RADFARD, Majid; ABBASNIA, Abbas; BAGHAPOUR, Mohammad Ali; ALHAMD,

Mahdi (2020). Estimation of the groundwater quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, 11(0), 100435–. doi:10.1016/j.gsd.2020.100435.

BARILARI, Agustina; QUIROZ, Mauricio Londoño; PARIS, Marta del Carmen; LIMA, Maria Lourdes; MASSONE, Héctor E. (2020). Groundwater contamination from point sources. A hazard index to protect water supply wells in intermediate cities. **Groundwater for Sustainable Development**. doi:10.1016/j.gsd.2020.100363.

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

BARROS, Laécio Carvalho; BASSANEZI, Rodney Carlos; LODWICK, Weldon Alexander. **First Course in Fuzzy Logic, Fuzzy Dynamical Systems, and Biomathematics**. Springer-Verlag Berlin An, 2016.

BRAHIM Bem; BOUGHARIOU, F. E.; BOURI, S. (2021). Multicriteria-analysis of deep groundwater quality using WQI and fuzzy logic tool in GIS: A case study of Kebilli region, SW Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, 180, 104224. doi:10.1016/j.jafrearsci.2021.104224

BASHAR, Toriqul; FUNG, Ivan W.H. Water Pollution in a Densely Populated Megapolis, Dhaka. **Water**. 2020, 12, 2124; doi:10.3390/w12082124

BATISTA, F. S.; GONÇALVES, MANUEL; RAMOS JUNIOR, ANTÔNIO; SANTOS, RODRIGO; CRUZ, MANOEL; PORCIUNCULA, D. C. L.; RODRIGUES, A. C. L. **Aplicação de indicadores químicos e microbiológicos na avaliação da qualidade da água subterrânea no entorno do cemitério quinta dos lázaros, Salvador (BA)**. 2020. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).

BATISTA, Igor Fellipe Vieira; CARTAXO, Fernando Rolim Neto; NASCIMENTO, Marilda Carvalho; MONTEIRO, Anildo Caldas; DA SILVA, Karolyne SANTOS. Qualidade da água em área rural sob influência antrópica na Zona da Mata de Pernambuco. **REVISTA DAE**, v. 68, p. 152-165, 2020.

BERTOLO, R. A.; HIRATA, R.; ALY JUNIOR, O. (2019). Método de Valoração da Água Subterrânea Impactada por Atividades Contaminantes no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, 33(3), 303–313. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29479>.

BERTOLO, Reginaldo; HIRATA, Ricardo; CONICELLI, Bruno; SIMONATO, Mateus; PINHATTI, Antônio; FERNANDES, Amélia. Água subterrânea para abastecimento público na Região Metropolitana de São Paulo: é possível utilizá-la em larga escala? **Revista DAE**, v. 63, p. 6-17, 2015.

BERTACHI, M. H.; SANTOS, M. M.; STIPP, M. E. F. Concentração de nitrato em poços tubulares profundos e corpo hídrico superficial na região central de Londrina - PR. **Ciência geográfica**, v. XXIII, p. 567-581, 2019.

BEZERRA, A. D. A.; ROCHA, J. C.; NOGUEIRA, E. R.; ARAUJO, F. G. D. M.; FARIAS, M. K.; BRANDAO, M. G. A.; PANTOJA, L. D. M. Teor de nitrato em águas subterrâneas da

região metropolitana de Fortaleza, Ceará: um alerta. **SEMINA. Ciências biológicas e da saúde** (ONLINE), v. 38, p. 129-136, 2017.

BIGUELINI, C. P.; GUMY, M. P. Saúde ambiental: índices de nitrato em águas subterrâneas de poços profundos na região Sudoeste do Paraná. **Revista Faz Ciência**, Cascavel, v. 14, n. 20, p. 153-175, 2012.

BOENO, Patricio Luiz T.; FREITAS, Gaiardo G.; SILVÉRIO, J. L Da Silva. Utilização de máquina de vetor de suporte para previsão de níveis de água subterrânea. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 25–34, 2018. DOI: 10.14295/ras.v32i1.28921.

BRASIL (1997). **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF 09/01/1997, P. 470.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 7 de abril de 2008, Seção 1, páginas 64-68.

BRESSANE, A.; MODANEZ, P. S.; FIORE, F. A. ; CARRA, T. A.; EWBANK, H. ; DE-CARLI, B. P.; MOTA, M. T. . Fuzzy-based computational intelligence to support screening decision in environmental impact assessment: A complementary tool for a case-by-case project appraisal. **Environmental impact assessment review**, v. 85, p. 106446, 2020.106446–. doi:10.1016/j.eiar.2020.106446

BROWN, R. M; MCCLELLAND, N. I; DEININGER, R. A.; TOZER, R. G. “A Water Quality Index: Do We Dare?” **Water Sewage Works**, Vol. 117, No. 10, 1970, pp. 339-343.

BURRI, Nicole M.; WEATHERL, Robin; MOECK, Christian; SCHIRMER, Mario (2019). A review of threats to groundwater quality in the anthropocene. **Science of The Total Environment**, 684(), 136–154. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.05.236.

CADILHAC, L.; ALBINET, M. (Coord.). **SEQ - Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines: Rapport de présentation**. Agences de l'Eau. 2003. 75p.

CAETANO, Tiago; PAIVA, Anderson; SILVA, Simone; COUTINHO, Artur; CIRILO, Jose; CABRAL, Jaime. Abastecimento rural de água: uso e demanda em comunidades do Semiárido e a disponibilidade hídrica das aluviões. **REGA - Revista de gestão de água da américa latina**, v. 17, p. 8-8, 2020.

CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. C. A.; SIMONATO, M.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas**. In: XX

Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2018, Campinas. Anais do XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: ABAS, 2018. v. 1. p. 1-4.

CASTILLA-RHO, J. C; ROJAS, R; ANDERSEN, M. S., HOLLEY, C.; MARIETHOZ, G. (2019). Sustainable groundwater management: How long and what will it take?. **Global Environmental Change**, 58, 101972. doi:10.1016/j.gloenvcha.2019.1019

CEARÁ. **Relatórios do PRAX e laudos da qualidade da água. Juazeiro do Norte: CAGECE - Companhia de Água e Esgoto do Ceará, 2022.**

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo – 1997.** São Paulo: CETESB, 1998. 106 p. (Série Relatórios).

CHAVES, Luciano Eustáquio; NASCIMENTO, Luiz Fernando C. (2014). Estimating outcomes in newborn infants using fuzzy logic. **Revista Paulista de Pediatria**, 32(2), 164–170. doi:10.1590/0103-058220143228413

CHIDAMBARAM S; PRASANNA M.V.; VENKATRAMANAN S.; NEPOLIAN M.; PRADEEP K., PANDA, Banajarani; THIVYA, C.; THILAGAVATHI, R. Groundwater quality assessment for irrigation by adopting new suitability plot and spatial analysis based on fuzzy logic technique. **Environmental Research**, 204, 111729. doi:10.1016/j.envres.2021.111729

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **PGRS- Plano de Gerenciamento dos recursos hídricos do Jaguaribe**, Vol. 01, tomo III, 1997.

CONCEIÇÃO, Mário Marcos Moreira Da. Plano de gerenciamento de resíduos sólidos em uma instituição de ensino superior. **Brazilian Journal of Development**, v.1, p.1- 33, 2020.

CONDE, E. Abordagem Fuzzy para o monitoramento dos impactos ambientais na dragagem no porto de Paranaguá. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 16, n. 8, 2019. DOI: 10.22292/mas.v16i8.807

CONICELLI, Bruno Pirilo; HIRATA, Ricardo. **Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas.** XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2016.

CORRÊA, Fernanda C; SILVA, L. C. A. E.; ECKERT, Jony Javorski; DEDINI, Franco Giuseppe. Aplicação da Lógica Fuzzy no Gerenciamento de Sistemas de Armazenamento de Energia. **Journal of Applied Instrumentation and Control**, v. 7, p. 17-24, 2019.

COSTA, I.; SALDANHA, E. C.; MONTE, C. N. A sazonalidade de contaminantes em águas subterrâneas e superficiais entorno de um aterro sanitário na região Amazônica. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.6, p.371-382, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0030>

COUTINHO, J. V.; ALMEIDA, C.N.; GADELHA, C.L.M; TARGINO, D.F.; LINHARES, F. M; COELHO, V. H. R. Avaliação Integrada da Qualidade da Água Subterrânea em uma

Bacia Hidrográfica Representativa do Litoral da Região Nordeste do Brasil. **Revista brasileira de recursos hídricos**, v. 18, p. 197-212, 2013.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – SIAGAS**. Disponível em: http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php. Acessado em: 16 out 2022.

DANGAR, S., ASOKA, A.; MISHRA, V. (2021). Causes and implications of groundwater depletion in India: A review. **Journal of Hydrology**. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126103.

DŁUGOZIMA, Anna. How to find a suitable location for a cemetery? Application of multi-criteria evaluation for identifying potential sites for cemeteries in Białystok, Poland. **Moravian geographical Reports**. 2022, 30(1): 34–53. doi: <https://doi.org/10.2478/mgr-2022-0003>.

DONATO, C. J.; et al., **Efeitos da poluição em mananciais e rios nos ambientes urbanos**. In: I sibogu - simpósio brasileiro online de gestão urbana, 2017, TUPÃ-SP. Fórum Ambiental da Alta Paulista. TUPÃ-SP, 2017. v.1. p.1-1.

ECK, Nees Jan van; WALTMAN, Ludo. **VOSviewer Manual. Manual for VOSviewer version 1 .6.18**. Universiteit Leiden, 2022.

EGBIMHANLU, A.E.; SOPHIA, O. D.; KOREDE, A.S.; ADENIKE, O.E.; ADEGBOYEGA, A.O.; OMONIGHO, D.E; EFEOVBOKHAN, E.V. (2020). Contamination Assessment of Underground Water Around a Cemetery: Case study of Ayobo cemetery in Lagos, Nigeria. **International Journal of Engineering Research and Technology**. 13(6) 1283-1288

ELZAIN, H. E; CHUNG, S. Y; Park, K.-H; SENAPATHI, V; SEKAR, S; SABARATHINAM, C; HASSAN, M. (2021). ANFIS-MOA models for the assessment of groundwater contamination vulnerability in a nitrate contaminated area. **Journal of Environmental Management**, 286, 112162. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112162

ENGELBRECHT, B. Z.; GONÇALVES, R. D.; TERAMOTO, Elias H.; CHANG, Hung K. Disponibilidade hídrica e balanço hídrico da bacia do rio cachoeira na região de itabuna / ba. **Geociências** (SÃO PAULO. ONLINE), v. 38, p. 731-740, 2019.

ESCOTTA, A. T.; BECCARO, W. Controle Automático de Volume em Tempo Real Utilizando Inferência Fuzzy em um Sistema Embarcado. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 22, p. 41-60, 2021.

FIGUEIREDO, S. S. M.; PAULA FILHO, F. J.; MENEZES, J. M. C.; OLIVEIRA, Larissa Saraiva; PINTO, L. A. Panorama das indústrias galvânicas de Juazeiro do Norte/CE: com ênfase nos teores de metais traço nos efluentes e resíduos sólidos. **Engenharia sanitária e ambiental** (ONLINE), v. 26, p. 1111-1121, 2020.

FILHO, N.S.S; SANTOS, S.D. (2013). **A Importância do Tratamento de Água na Indústria para um bom Aproveitamento no Processo Industrial**. 6º Encontro Nacional de Tecnologia Química. ABQ - Associação Brasileira de Química. Maceió/AL. ISBN: 978-85-85905-04-0.

FRANCA, R. M.; FRISCHKORN, H.; SANTOS, M. R. P.; MENDONÇA, L. A. R.; BESERRA, M. C.; 2006. Contaminação de poços tubulares em Juazeiro do Norte-CE. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 11, No.º 1, pp. 92-102.

FRANCISCO, A. C.C. **Modelo matemático para avaliação de campus sustentável e inteligente**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Sorocaba, São Paulo, 2019 pag. 2021.

FRANCO, Alexsande De Oliveira; ARCOS, Frank Oliveira; PEREIRA, Jessiane Da Silva. Uso do solo e a qualidade da água subterrânea: estudo de caso do aquífero Rio Branco, Acre, Brasil. **Águas subterrâneas** (SÃO PAULO), v. 32, p. 1-11, 2018.

GAYE, C. B., & TINDIMUGAYA, C. (2018). Review: Challenges and opportunities for sustainable groundwater management in Africa. **Hydrogeology Journal**. doi:10.1007/s10040-018-1892-1.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. 1a edição. Rio Grande do Sul. 2009 120 p.: il.; 17,5x25cm.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6ªed. São Paulo:Editora Atlas SA, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOMES, Maria Da Conceição Rabelo; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea. **Águas Subterrâneas** (São Paulo), v. 31, p. 134-149, 2017.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R; TANSCHWEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. In: VI International Fuzzy Systems Association World Congress, 1995, São Paulo. **Tutorials of IFSA '95**, 1995. v. 1. p. 1-38.

GONÇALVES, J. A. C.; ALMEIDA, M. S. L.; FERREIRA, M. A. M.; PAIVA, B. L. F. Surface water availability and groundwater in River Fish basin - Itabira-MG. **Research, society and development**, v. 8, p. 1-17, 2019.

GONÇALVES, M. V. P.; CRUZ, M. J. M.; SANTOS, R. A.; JUNIOR, A. B. D. S. R.; COUTINHO, C. A. M. Flúor na água do aquífero Bambuí no oeste da Bahia (Brasil). **Brazilian Journal of aquatic Science and technology**, v.22, n.1, p.10-21, 2018a.

GROTT, S. L; FAÇANHA, E. B; FURTADO, R. N; CUNHA, H. F. A; DA CUNHA, A. C. Variação espaço-sazonal de parâmetros da qualidade da água subterrânea usada em consumo humano em Macapá, Amapá, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, p. 645-654, 2018.

GUERRA, S. T. P. **Contaminação por nitrato e sua relação com o crescimento urbano no sistema aquífero Bauru em Presidente Prudente (SP)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recurso Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 149 pag. 2011.

GUIMARÃES, T. M. H. **Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 97 pag. 2018.

HIRATA,R; SUHOGUSOFF,A.V; MARCELLINI, S.S; Villar, P. C; MARCELLINI, L. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil**. 1. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências, 2019. v. 1. 64p.

HIRATA, Ricardo; FERNANDES, Amélia João; BERTOLO, REGINALDO. **As águas subterrâneas: longe dos olhos, longe do coração e das ações para sua proteção**. ACTA PAUL DE ENFERM, v. 29, p. 3-4, 2016.

HU, G.; MIAN, H.R.; ABEDIN, Z.; LI, J.; HEWAGE, K.; SADIQ, R. Integrated probabilistic-fuzzy synthetic evaluation of drinking water quality in rural and remote communities. **J. Environ. Manag.** **2022**, 301, 113937.

HUO, C.; DAR, A. A; NAWAZ, A; HAMEED, J; ALBASHAR, G; PAN, B; WANG, C; (2021). Groundwater contamination with the threat of COVID-19: Insights into CSR theory of Carroll's pyramid. **Journal of King Saud University - Science**. doi:10.1016/j.jksus.2020.101295.

HUSSEIN, Eslam A.; THRON, Christopher; GHAZIASGAR, Mehrdad; BAGULA, Antoine; VACCARI, Mattia. Groundwater Prediction Using Machine-Learning Tools. **Algorithms** 2020, 13, 300; doi:10.3390/a13110300.

IAH (International Association of Hydrogeologists) (2015) World Water Day 2015. embracing groundwater. <https://iah.org/wpcontent/uploads/2015/03/2015WWD.pdf>.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo 2010. Panorama cidade de Juazeiro do Norte – CE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/juazeiro-do-norte/panorama>>. Acessado: 04 dez 2022.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Perfil Municipal de Juazeiro do Norte (2017). Elaboração: VIANA, C.M et al., janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.ipece.ce.gov.br>.

JAAFARI, Abolfazl; ZENNER, Eric K.; PANAHI, Mahdi; SHAHABI, Himan (2019). Hybrid artificial intelligence models based on a neuro-fuzzy system and metaheuristic optimization algorithms for spatial prediction of wildfire probability. **Agricultural and Forest Meteorology**, 266-267(), 198–207. doi:10.1016/j.agrformet.2018.12.015

JAFARI, S. A.; MOSTAFAVI, Investigation of nitrogen contamination of important subterranean water in the plain. **Medbiotech J.** 2019; DOI: 10.22034/mbt.2019.80826.

JAFFAR, A.; THAMRIN, N. M.; ALI, M. S. A; MISNAN, M. F; YASSIN, A. I. M. The Influence of Physico-Chemical Parameters to Determine Water Quality: A Review. **Journal of electrical and electronic systems research**, Vol.17 Dec 2020.

JENSEN, V. B.; DARBY, J. L.; SEIDEL, C; GORMAN, C. (2014). Nitrate in Potable Water Supplies: Alternative Management Strategies. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2203–2286. doi:10.1080/10643389.2013.828272

JESUS, Lucas Scarpanti De; RIYIS, Marcos Tanaka; GIACHETI, Heraldo Luiz. Fontes potenciais de poluição das águas subterrâneas e uma proposta de priorização de áreas de fiscalização em um município industrializado. **Águas subterrâneas**, v. 35, p. 1-12, 2021.

JING, M.; Kumar, R., HEBE, F., THOBER, S., RAKOVEC, O., SAMANIEGO, L., e ATTINGER, S.: Assessing the response of groundwater quantity and travel time distribution to 1.5, 2, and 3 °C global warming in a mesoscale central German basin, **Hydrol. Sistema Terra. Sci.**, 24, 1511-1526, <https://doi.org/10.5194/hess-24-1511-2020>, 2020.

JOHNSON O. Oladipo; AKINOLA S. Akinwumiju; ABOYEJI, O.S.; ADEDEJI, A. Adelodun; (2021). Comparison between fuzzy logic and water quality index methods: A case of water quality assessment in Ikare community, Southwestern Nigeria. **Environmental Challenges**, (), -. doi:10.1016/j.envc.2021.100038

KHAN, Farhan Mohammad; GUPTA, Rajiv. Escherichia coli (E. coli) as an Indicator of Fecal Contamination in Groundwater: A Review. Engineering Sustainable Development of Water and Environment (Proceedings of the ICSDWE2020). Hamburg, **Germany: Environmental Science**, 2021. P. 225 – 235. doi:10.1007/978-3-030-45263-6.

KHEIRANDISH, M.; RAHIMI, H.R.; KAMALIARDAKANI, M.; SALIM, R. (2020). Obtaining the effect of sewage network on groundwater quality using MT3DMS code: Case study on Bojnourd plain. **Groundwater for Sustainable Development**, (), 100439–. doi:10.1016/j.gsd.2020.100439.

L. Zadeh, **Fuzzy logica personal perspective, Fuzzy Sets and Systems**,281(2015)4-20.

LAPWORTH, D.J.; KRISHAN, G.; MACDONALD, A.M.; RAO, M.S. (2017). Groundwater quality in the alluvial aquifer system of northwest India: New evidence of the extent of anthropogenic and geogenic contamination. **Science of The Total Environment**, 599-600, 1433–1444. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.04.223

LAUTZ, L. K; LEDFORD, S. H; BELTRAN, J. Legacy effects of cemeteries on groundwater quality and nitrate loads to a headwater stream. **Environmental Research Letters**, Volume 15, DOI 10.1088/1748-9326/abc914.

LAY-EKUAKILLE, A.; DURICKOVIC, I.; Lanzolla, A.; MORELLO, R.; DE CAPUA, C.; GIRÃO, P.S.; POSTOLACHE, O.; MASSARO, A.; VAN BIESEN, L. (2019). Effluents, surface and subterranean waters monitoring: review and advances. **Measurement**, (), S0263224119300521–. doi:10.1016/j.measurement.2019.01.052

LEITÃO, T. E; LOBO-FERREIRA, J.P; OLIVEIRA, M. M; MOINANTE, M. P (2003). **Poluição das águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação**. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Cabo Verde, novembro. 2003.

LEITE, S. R.; CHAIM, R. M.; MONTEIRO, S. B. S. **Modelo para Avaliação de Risco em Barragens com Aplicação de Teoria de Conjuntos Fuzzy**. In: 2019 XIV Congresso Ibérico de Sistemas e Tecnologias de Informação (CISTI), 2019, Coimbra. 2019.

LEONARD, Leopold Sibomana; Assessment of groundwater quality along cemeteries and associated potential health concerns in Dar es Salaam, Tanzania. **Water Practice and Technology**. May 2022; 1218–1229. doi: <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.041>

LEWIS, W. J; FOSTER, S.; DRASAR, B. S. **O risco de poluição do Lençol freático por sistemas de disposição local de esgotos**. Brasília, Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, 1986. 94p.

LI, C.; CHEN, Q.; WANG, R; WU, M; JIANG, Z. (2020). Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: Theoretical insights and practical data interpretations. **Cement and Concrete Composites**, doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103652.

LI, Peiyue; HE, Song; YANG, Ningning; XIANG, Gang (2018). Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes in Yan'an City, northwest China: implications to sustainable groundwater quality management on the Loess Plateau. **Environmental Earth Sciences**, 77(23), 775–. doi:10.1007/s12665-018-7968-3.

LIMA, A. G. P. S. **Impacto do turismo e renda no acesso ao abastecimento de água: caso Juazeiro do Norte - CE**. 2020. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Campina Grande, Sumé, 109 pag. 2020.

LIMA, B. M. R.; LIMA, I. L. P.; SILVA, M. L. G.; ALENCAR, G. S. S. **Percepção ambiental da população de Juazeiro do norte - CE para a preservação do parque ecológico das timbaúbas**. In: Reunião Regional da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC) no Cariri, 2017, Crato-Ceará. Anais Reunião Regional da SBPC no Cariri, 2017.

LIMA, J. C. **Avaliação da concentração de nitrato nas águas subterrâneas no bairro do Farol, em Maceió, Alagoas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió – Alagoas, 110 pag. 2008.

LIN, Guoping; LIANG, Jiye; QIAN, Yuhua; LI, Jinjin (2016). A fuzzy multigranulation decision-theoretic approach to multi-source fuzzy information systems. **Knowledge-Based Systems**, 102–113. doi:10.1016/j.knosys.2015.09.022.

LINS, Eduardo Antonio Maia; LINS, A. S. B. M.; LINS, C. M. M. S. Negative environmental impacts generated by cemetery: Case study. **International Journal of Advanced Science and Research**, v. 4, p. 16-19, 2019.

LISBOA, E. G. **Contribuições ao processo de análise de riscos de contaminação das águas subterrâneas: proposta fuzzyprobabilística**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto – Portugal, 304 pag. 2019.

LISBOA, E. G.; MENDES, R. L. R ; BARP, A. R. B. . Mapeamento da Vulnerabilidade de Aquíferos Freáticos Baseado em Lógica Fuzzy. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2010, São Luis/MA. Águas Subterrâneas: Patrimônio Histórico da Humanidade. Ceará: **Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS**, 2010. v. 24. p. 1-10.

- LISBOA, E. G; MENEZES, J. P. L.; ALVES, I. C. C.; BELLO, L. A. L.; MENDES, R.L.R. Modelagem fuzzy na avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas na ilha Algodal/Maiandeu/PA. **Águas Subterrâneas**, v. 36, p. 1/e-30027-21, 2022.
- LO, M.-H.; FAMIGLIETTI, JS A irrigação no Vale Central da Califórnia fortalece o ciclo da água no sudoeste dos Estados Unidos. **Geophys. Res. Lett.** 40 , 301-306(2013).
- MACHIWAL, D.; CLOUTIER, V; GÜLER, C; KAZAKIS, N (2018). A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. **Environmental Earth Sciences**, doi:10.1007/s12665-018-7872-x.
- MACKIE, A; GOURCY, S; RIGBY, N; MOFFAT, J; CAPRON, I; BAJKA, B. (2019). The fate of cellulose nanocrystal stabilised emulsions after simulated gastrointestinal digestion and exposure to intestinal mucosa. **Nanoscale**, doi:10.1039/C8NR05860A
- MAHAGAMAGE M.G.Y.L.; MANAGE P.S.; MANAGE P.M. 2019. Water quality and microbial contamination status of groundwater in Jaffna Peninsula, Sri Lanka. **Journal of Water and Land Development**. No. 40 (I-III) p. 3–12. DOI: 10.2478/jwld-2019-0001.
- MAHLANGU, Sarah; LORENTZ, Simon; DIAMOND, Roger; DIPPENAAR, Matthys (2020). Surface water-groundwater interaction using tritium and stable water isotopes: A case study of Middelburg, South Africa. **Journal of African Earth Sciences**, (), 103886–. doi:10.1016/j.jafrearsci.2020.103886.
- MAIOLO, M; PANTUSA, D. Multivariate Analysis of Water Quality Data for Drinking Water Supply Systems. **Water** 2021, 13, 1766. <https://doi.org/10.3390/w13131766>.
- MALLIK, Santanu; MISHRA, Umesh; PAUL, Niladri (2021). Groundwater suitability analysis for drinking using GIS based fuzzy logic. **Ecological Indicators**, 121, 107179– doi:10.1016/j.ecolind.2020.107179
- MAMDANI, E.H.; S. ASSILIAN (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. 7(1), 1–13. doi:10.1016/s0020-7373(75)80002-2.
- MAMDANI, Ebrahim H.; ASSILIAN, Sedrak. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International journal of man-machine studies**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.
- MARIANNO, L. C. O.; et al., Impacts of urban sprawl in the Administrative Region of Ribeirão Preto (Brazil) and measures to restore improved landscapes. **Land use policy**, v. 124, p. 106439, 2023.
- MENEZES, J; BERTOSSI, A.; SANTOS, A.; NEVES, M. Qualidade da Água Subterrânea para Consumo Humano e Uso Agrícola no Sul no Estado do Espírito Santo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**,v. 17, n. 17, p. 3318-3326, 2013.
- MENDES, Anderson; GALVÃO, Paulo; DE SOUSA, Janice; DA SILVA, Iverson; CARNEIRO, Raimundo Nonato (2017). Relations of the groundwater quality and disorderly occupation in an Amazon low-income neighborhood developed over a former dump area,

Santarém/PA, Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, (), –.
doi:10.1007/s10668-017-0040-8

MERCHÁN-SANMARTÍN, B.; et al., Sanitary Sewerage Master Plan for the Sustainable Use of Wastewater on a University Campus. *Water* 2022, 14, 2425.
<https://doi.org/10.3390/w14152425>

MOHAMED, Adam Khalifa; LIU, Dan; SONG, Kai; MOHAMED, Mohamed A. A., ALDAW, Elsiddig; ELUBID, Basheer A. Hydrochemical Analysis and Fuzzy Logic Method for Evaluation of Groundwater Quality in the North Chengdu Plain, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 302; doi:10.3390/ijerph16030302

MOHAMED, A.K.; LIU, D.; SONG, K.; MOHAMED, M.A.A.; ALDAW, E.; ELUBID, B.A. Hydrochemical Analysis and Fuzzy Logic Method for Evaluation of Groundwater Quality in the North Chengdu Plain, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2019, 16, 302. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030302>

MOHAMMED, Hssaisoune; LHOUSSAINE, Bouchaou; ABDELFAHATTAH, Ilham; SIFEDDINE, Bouimetarhan; ABDELGHANI Chehbouni. Moroccan Groundwater Resources and Evolution with Global Climate Changes. *Geosciences* 2020, 10, 81; doi:10.3390/geosciences1002008.

MOURÃO, Francianne Vieira; PEREIRA, José Almir Rodrigues. Urban expansion impacts the surface water source of the water supply system in Belém and Ananindeua, Brazil. *Research, society and development*, v. 9, p. 303974098-303974114, 2020.

NAJAFZADEH, Homaei, F.; MOHAMADI, S. Reliability evaluation of groundwater quality index using data-driven models. *Environ Sci Pollut Res* 29, 8174–8190 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-16158-6>

NECKEL, A., KORCELSKI, C., SILVA, LFO et al. Metais no solo de cemitérios urbanos de Carazinho (RS) frente ao aumento de mortes por COVID-19: projetos de cemitérios para mitigar impactos ambientais. *Environ Dev Sustain* 24, 10728–10751 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s10668-021-01879-y>

NEVES, Eder Pereira; DUARTE, Marco Aparecido Queiroz; ALVARADO, Francisco Villarreal. Sistema baseado em regras fuzzy para avaliação da qualidade da água. *Revista eletrônica paulista de matemática*, v. 14, p. 95-109, 2019.

NGUYEN, Anh-Tu; TANIGUCHI, Tadanari; ECIOLAZA, Luka; CAMPOS, Victor; PALHARES, Reinaldo; Sugeno, Michio (2019). Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(1), 56–68.
doi:10.1109/MCI.2018.2881644

OLIVEIRA, A. F. de; BAZANTE, Renata; SILVA, M. E. C.; MARTINS, J. P. F. Avaliação da Contaminação de nitrato e Escherichia coli em água subterrânea no município de Carapicuíba (SP). *Revista do instituto de ciencias da saude (UNIP)*, v. 38, p. 107-116, 2020.

OLIVERIA, G. *Perdas de água 2018 (SNIS 2016): desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico*. Instituto Trata Brasil e G.O

Associados

OLIVEIRA, J. L. **Avaliação de indicadores de poluição de solos e águas e suas implicações no sistema de abastecimento público de Juazeiro do Norte-CE.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 112 pag. 2012.

OLIVEIRA, M. F. **Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em Administração.** Catalão: Universidade Federal de Goiás, 2011. 72 p.

ONU. Organização das Nações Unidas. Recursos de água doce disponíveis por pessoa baixam mais de 20% em duas décadas. ONU News, 2020. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2020/11/1734182>>. Acesso em: 28 nov 2022.

Organização Mundial da Saúde (2021, 3 maio). OMS e Unicef querem sistema global para monitorar acesso universal à água. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2021/05/1749452>.

PASSINO, Kevin M. and Yurkovick, Stephen. Fuzzy Control. Department of Electrical Engineering. The Ohio State University. **Columbus**, Ohio. July.1997.

PAUL OBADE, Vincent; MOORE, Richard (2018). Synthesizing water quality indicators from standardized geospatial information to remedy water security challenges: A review. **Environment International**, 119(), 220–231. doi:10.1016/j.envint.2018.06.026

PEDRYCZ, Witold; GOMIDE, Fernando. **Fuzzy systems engineering: toward human-centric computing.** John Wiley & Sons, 2007.

PEIXOTO, F. S. **Efeitos do uso e ocupação do solo sobre as águas subterrâneas: contaminação da água subterrânea por nitrato em sub-bacia urbana na cidade de Fortaleza/Brasil.** 1. ed. Baue Bassin: Omni Scription Publishing Group, 2017. v. 1. 125p.

PEIXOTO, F. Da S.; Cavalcante, I. N. (2019). Vulnerabilidade aquífera e risco de contaminação da água subterrânea em meio urbano. **Geologia USP. Série Científica**, 19(2), 29-40. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v19-142384>.

PEREIRA, Bruno Luiz. **Aplicação de Sistemas Neuro-Fuzzy no Controle de Aeronaves em Operações Críticas de Voo.** 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. 180 pag. 2021.

PEREIRA, C. E.; CARDOSO, P. H. G. Contribuição das Instituições de Ensino Superior no processo de crescimento e desenvolvimento da Região Metropolitana do Cariri Ceará Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e142932531-e142932531, 2020.

PEREIRA, C. M. C. **Análise socioambiental da cidade de Juazeiro do Norte: subsídios para a construção da agenda 21 local.** 2013. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, 158 pag. 2013.

PEREIRA BORGES, Paulo Henrique; et al., Interface gráfica sob a utilização da lógica fuzzy: a qualidade de água em reservatórios. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales**, v. 13, p. 567, 2020.

PESSOA, M. A. R.; SOUZA, F. J.; DOMINGOS, P.; AZEVEDO, J. P. S. Índice fuzzy de qualidade de água para ambiente lótico — IQAFA. **Eng Sanit Ambient** | v.25 n.1 | jan/fev 2020 | 21-30.

PETER, C. L.; MANTAI, R. D.; ALESSI, O.; PANSERA, V.; WARMBIER, E.; SILVA, J. A. G. **Inteligência artificial via lógica fuzzy na simulação da produtividade industrial de grãos de aveia pelo uso do nitrogênio e não linearidade das condições meteorológicas**. In: XXV Jornada de Pesquisa, 2020, Ijuí. Salão do Conhecimento UNIJUÍ, 2020. v. 6.

PIASECKI, Adam (2019). Water and Sewage Management Issues in Rural Poland. **Water**, 11(3), 625–. doi:10.3390/w11030625

PINNTO, M.R.; FAÇANHA ALMEIDA, J. R. F. **A Lei das Águas e o Enquadramento dos Corpos Hídricos em Classes: implicações e dificuldades**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. O Desafio da Prática da Sustentabilidade na Gestão dos Recursos Hídricos: Natureza, Gente e Desenvolvimento. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

PINTO, L. S.; DIAS, T. C.; BRITO, J. N. **Controle Fuzzy para Navegação Autônoma em Ambiente Desconhecido Sujeito a Mudanças**. In: IX COEN UFSJ, 2019, São João del-Rei. IX COEN UFSJ, 2019.

PIVOVAROVA, I; TEREKHIN, R. D; SARKISOV, S. V; SOROKIN, A. A; MUSATOV, V. I. Software implementation of fuzzy logic algorithms for environmental risk assessment. **Journal of Physics: Conference Series**, Volume 1515, Issue 2, article. id. 022091 (2020).

POURJAVAD, E.; SHAHIN, A. The application of Mamdani fuzzy inference system in evaluating green supply chain management performance. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 20, n. 3, p. 901–912, 2018.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

PUC-RIO. Maxweel: Lógica Fuzzy. Disponível em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32823/32823_3.PDF>. Acesso em: 08 set 2022.

QIAN, Hui; CHEN, Jie; HOWARD, Ken W.F. (2020). Assessing groundwater pollution and potential remediation processes in a multi-layer aquifer system. **Environmental Pollution**, 263, 114669–. doi:10.1016/j.envpol.2020.114669.

RIBEIRO, Luiz Gustavo Gonçalves; ROLIM, N. D. Planeta água de quem e para quem: uma análise da água doce enquanto direito fundamental e sua valoração mercadológica. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 7, p. 7-33, 2017.

RIBEIRO, Rayssa Balieiro Ribeiro; FALCO PRUSKI, Fernando; ALVES RAMOS, Maria Camila. Disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazão. **SUSTENTARE**, v. 2, p. 210-217, 2018.

RINAUDO, J.-D., HOLLEY, C., BARNETT, S., & MONTGINOUL, M. (2020). Sustainable Groundwater Management. **Global Issues in Water Policy**. doi:10.1007/978-3-030-32766-8

ROCHA, W.J. **Estudo da salinização das águas subterrâneas na região de Maceió a partir da integração de dados hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e geelétricos**. 2005. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília. Brasília. 2005.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy logic with engineering applications**. John Wiley & Sons, 2016.

SABA, Elias D.; SABA, Jordana M; MENDES, Thiago A.; CAVALCANTE, André L. B; OLIVEIRA Anselmo E. de. Groundwater Vulnerability and Cemetery Urbanization Areas. **Research Article**, DOI: 10.21203/rs.3.rs-1514526/v1, 2021.

SAMPAIO, L. M. D.; OLIVEIRA, M. J. F; IGNACIO, A. A. V. **Lógica nebulosa: aplicações e tendências**. In: X Simpósio de pesquisa operacional e logística da marinha, 2007, Rio de Janeiro/RJ. X Simpósio de pesquisa operacional e logística da marinha, 2007.

SAMPAIO FILHO, Antonio Carlos DE S; VELLASCO, Marley M.B.R.; Tanscheit, Ricardo. A unified solution in fuzzy capital budgeting. **Expert systems with applications**, v. 98, p. 27-42, 2018.

SANTI, A. D.; CETRULO, Tiago Balieiro; MALHEIROS, Tadeu Fabricio. Indicadores de Perdas de Água em Sistemas de Saneamento: Disponibilidade e Confiabilidade de dados em nível de Bacia Hidrográfica. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 386-410, 2018.

SANTOS, Alexsander José dos; MANCINI, Sandro Donnini; FRUTUOSO Roveda, José Arnaldo; EWBank, Henrique; ROVEDA, Sandra Regina Monteiro Masalskiene (2020). A fuzzy assessment method to airport waste management: A case study of Congonhas Airport, Brazil. **Journal of Air Transport Management**, 87(), 101838–. doi:10.1016/j.jairtraman.2020.101838

SANTOS, Daniel D. C. **Um estudo sobre identificação de anomalias em bases de regras fuzzy aplicado a estimação do risco de endometriose**. 2018. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP. 87 pag. 2018

SANTOS, E. Juazeiro do Norte é polo de desenvolvimento no Cariri. Diário do Nordeste, Ceará. Jornal Diário do Nordeste. Caderno Região. 21 de julho de 2012. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/editorias/regiao/juazeiro-do-norte-epolo-de-desenvolvimento-no-cariri-1.548980>.

SANTOS, M. A. P.; SANTOS, V. S.; FRANCA, R. M; CHAVES, M. S. Águas subterrâneas: Um estudo acerca da superexploração sobre a microbacia III do Rio Salgado. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 10, p. 11-15, 2015.

SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. W. **Métodos de pesquisa das relações sociais**. São Paulo: Herder, 1965.

SERVIDONE, G.; ROSSI, M. M.; TERNES, S. **Explorando o uso da Teoria Fuzzy no software R: estudo de caso para avaliar a força de infecção da Anemia Infecciosa Equina (AIE)**. In: Mostra de Estagiários e Bolsistas da Embrapa Informática Agropecuária, 2015, Campinas. Resumos Expandidos..., 2015. v. 1.

SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas). Banco de dados dos Poços de Juazeiro do Norte. Disponível em:
http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/visualizar_mapa.php

SILVA, Gabriela Mateus de Fontes; ZANCHI, Fabrício Berton; SILVA, João Batista Lopes da; BERNARDES, Marcos Eduardo Cordeiro. Disponibilidade Hídrica de uma Bacia Hidrográfica no Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, p. 1597, 2021.

SILVA, L. P.; BARBOSA, J. P.; SILVA, G. A. Análise exploratória de dados da qualidade da água de poços amazonas na cidade de Macapá, Amapá, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 43-51, 2018. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i1.28941>.

SILVA, Lindamar Bezerra da. **Qualidade da água subterrânea que abastece Juazeiro do Norte – CE: Relação com cobertura de esgoto e densidade populacional**. 2020. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Campina Grande, Sumé - Paraíba, 178 pag. 2020.

SILVA, M. L. G. S. **Diagnóstico da sustentabilidade socioambiental dos municípios do CRAJUBAR (Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – Paraíba, 147 pag. 2022.

SILVA, I. S.; MENDONÇA, M. C. S.; GARCIA, C. A. B.; GARCIA, H. L.; COSTA, S. S. L. **Lógica fuzzy aplicada a predição da qualidade da água do reservatório da Macela-SE. Olhar dos recursos e do meio ambiente do Estado de Sergipe**. 1ed. Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2020, v., p. 93-100.

SILVA, R. S. B.; SOUSA, A. M. L.; SODRE, S. S. V.; VITORINO, M. I. Avaliação sazonal da qualidade das águas superficiais e subterrâneas na área de influência do Lixão de Salinópolis, PA. **Revista Ambiente e Água**, v. 13, p. 1-18, 2018.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; FREIRE, A. T. G.; MENDES, J. J. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico - AHP na avaliação da qualidade ambiental de nascentes. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, p. 292-303, 2015.

SILVERT, William (2000). Fuzzy indices of environmental conditions. **Ecological Modelling**, 130(1-3), 0–119. doi:10.1016/s0304-3800(00)00204-0

SINGH, Ajit Pratap; KHAKOLIA, Aditya; TAVANSHETTI, Sanjyot; YADAV, Jaidev. Groundwater quality assessment using gis and fuzzy logic- a case study of jhunjhunu district. **Pollution Research Paper**. Vol 38, Issue 3, 2019; Page No. (655-662).

SINGH, Ajit Pratap; CHAKRABARTI, Sumanta; KUMAR, Sumit; SINGH, Anjaney (2017). Assessment of air quality in Haora River basin using fuzzy multiple-attribute decision making techniques. **Environmental Monitoring and Assessment**, 189(8), 373–. doi:10.1007/s10661-017-6075-3

SINGHA, S., PASUPULETI, S., SINGHA, S. S., SINGH, R., & KUMAR, S. (2021). Prediction of groundwater quality using efficient machine learning technique. **Chemosphere**, 276, 130265. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.1.

SNIS – Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Série Histórica (2010 a 2019). Sistema de Abastecimento de Água de Juazeiro do Norte. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos>. Acesso em: 04 dez 2022

SOLDERA, B. C.; OLIVEIRA, E. de. Água sustentável (as): Um novo método para a Governança da água. **Águas Subterrâneas** (2017) 31(2): 30-43.

SOUZA, K. I. S. de CHAFFE, P. L. B., PINTO, C. R. S. de C., & NOGUEIRA, T. M. P. (2019). Proteção ambiental de nascentes e afloramentos de água subterrânea no Brasil: histórico e lacunas técnicas atuais. **Águas Subterrâneas**, 33(1), 76–86. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i1.29254>.

SPERLING, Marcos Von. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte -MG: UFMG, 2014.

STEVANOVIĆ, Zoran; MARINOVIĆ, Veljko. A methodology for assessing the pressures on transboundary groundwater quantity and quality – experiences from the Dinaric karst. *Journal of the Croatian Geological Survey and the Croatian Geological Society*. 2020. P 107-118.

SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 1222 p.

SZKLAREK, S., GÓRECKA, A., & WOJTAL-FRANKIEWICZ, A. (2022). The effects of road salt on freshwater ecosystems and solutions for mitigating chloride pollution - A review. **Science of The Total Environment**, 805, 150289. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150289.

TELES, Rudá Peixoto; SILVA, Maria Lucineide Gomes Da; ALVES, Antonio Junior Ribeiro. Avaliação geoespacial da expansão do aglomerado urbano Crajubar utilizando inteligência geográfica. **Revista brasileira de geografia física**, v. 13, p. 423-433, 2020.

TEIXEIRA, L. M; ALENCAR, G. S. S.; HERMÓGENES, F. H. D. A; NASCIMENTO, P. S. Arajara Park, BARBALHA, CE: UM estudo da percepção dos moradores. **Revista ciência e sustentabilidade**, v. 5, p. 68-99, 2020.

THOMAS, B. F. (2018). Sustainability indices to evaluate groundwater adaptive management: a case study in California (USA) for the Sustainable Groundwater Management Act. **Hydrogeology Journal**. doi:10.1007/s10040-018-1863-6.

TRATA BRASIL. **Ranking do saneamento instituto trata brasil 2022** (SNIS 2020). São Paulo, 2022

TRATA BRASIL (Org.). **Pesquisa Saneamento Básico em Áreas Irregulares – Relatório Brasil**. São Paulo, 2016. 118 p.

TROPEA, Erica; et al., (2021). Environmental adaptation of E. coli within private groundwater sources in southeastern Ontario: Implications for groundwater quality monitoring and human health. **Environmental Pollution**. doi:10.1016/j.envpol.2021.117263

TUCCI, C. E. M. Regulamentação da Drenagem Urbana no Brasil. **Revista da Gestão de água da América Latina**, v.13, n.1, p.29-42, 2016.<http://doi.org/10.21168/rega.v13n1.p29-42>

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. **Qualidade da água subterrânea**. Brasília: Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2003. 53 p.

VARNIER, C.; ROCHA, G. A.; CAMPOS, J. E.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SIMONATO, M.; HIRATA, R. **Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual**. 1. ed. São Paulo: SIMA/IG, 2019. v. 1. 99p.

VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. **Revista Águas Subterrânea**, São Paulo, v. 16, n. 16, p. 97-104, 2002.

VILLAR, Pilar Carolina. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo v. XIX, n. 1. p. 83-102 n jan.-mar. 2016.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia **Sanitária e Ambiental**, 1996a. v.1.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG/ Departamento de Engenharia Sanitária, 2005. v.1, 452p.

VRBA, Jaroslav; LIPPONEN, Annukka. **Groundwater Resources Sustainability Indicators**. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, Place de Fontenoy, 75352 Paris. UNESCO 2007.

WANG, Changzhong; QI, Yali; SHAO, Mingwen; HU, Qinghua; CHEN, Degang; QIAN, Yuhua; LIN, Yaojin. **A Fitting Model for Feature Selection with Fuzzy Rough Sets. n IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, vol. 25, no. 4, pp. 741-753, Aug. 2017, doi: 10.1109/TFUZZ.2016.2574918.

WU, Jianhua; ZHANG, Yuxin; ZHOU, Hui (2020). Groundwater chemistry and groundwater quality index incorporating health risk weighting in Dingbian County, Ordos basin of northwest China. **Geochemistry**, doi:10.1016/j.chemer.2020.125607.

Wwwdr (2018) **Relatorio Mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos**. Un Water. 12 pag. 2018.

UNESCO. WWDR (2003) **Water for People–Water for Life**. UNESCO Publishing and Berghahn Books, New York, USA.

YASEEN, Zaher Mundher; RAMAL, Majeed Mattar; DIOP, Lamine; JAafar, Othman; DEMIR, Vahdettin; KISI, Ozgur (2018). Hybrid Adaptive Neuro-Fuzzy Models for Water Quality Index Estimation. **Water Resources Management**. doi:10.1007/s11269-018-1915-7

ZACARIA, Nafisatu; ANORNU, Geophrey; ADOMAKO, Dickson, OWUSU-NIMO, Frederick; ABASS, Gibrilla. Evolution of groundwater hydrogeochemistry and assessment of groundwater quality in the Anayari catchment. **Groundwater for Sustainable Development** (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100489>.

APÊNDICE A - Consulta aos especialistas sobre os intervalos dos indicadores que compõem o Índice de Qualidade de Água Subterrânea

Sou Lidiane Marinho Teixeira, engenheira Ambiental pelo Instituto Federal do Ceará (2019), mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande. Cujo orientadoras são professoras Dr^a Andrea Carla Lima Rodrigues – UFCG e Dr^a Sandra Regina Monteiro Masalskiene Roveda – UNESP.

Esta pesquisa pretende-se analisar os parâmetros de Água Bruta: Cloreto; Coliformes totais; E. Coli; Nitrato; Nitrito; pH; Sólidos dissolvidos totais; e Turbidez. Cada grupo está classificado como: Inadequado, Médio e Adequado.

O trabalho será composto por três grupos: físico, químico e, a partir da interação entre esses grupos, obteremos o índice de Qualidade de Água Subterrânea.

A pesquisa faz parte de um projeto apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Tem-se como metodologia o Sistema de Inferência Fuzzy do tipo Mamdani.

A primeira etapa para o desenvolvimento do sistema consiste em definir conjuntos Fuzzy para cada variável. Gostaríamos de contar com a sua participação para sugerir valores para os parâmetros analisados. Para cada parâmetro vamos fornecer o intervalo no qual o parâmetro será avaliado (Portaria CONAMA n° 396/08).

Com base nos valores máximos permitidos pela referida portaria, solicitamos que sejam distribuídos em três conjuntos de acordo com o que considera ser Inadequado, Médio e Adequado. No caso de os valores sugeridos serem maiores ou menores do que estabelecidos na Portaria, por favor indique a referência para que possamos justificar no trabalho.

O anexo “Consulta aos Especialista” contém um documento em formato Excel que apresenta um quadro para o especialista atribuir valores, conforme exemplo ilustrado na Tabela 1:

Figura 01: Definição dos valores dos parâmetros

Definição dos Conjuntos Fuzzy		
	Termos Linguisticos	Domínios
pH	Inadequado Baixo	0 - 6
	Média	5,5 - 9
	Inadequado Elevado	> 8

Anexo

Nome:	
Formação:	
Empresa:	
E-mail:	

Definição dos Conjuntos Fuzzy		
	Termos Linguísticos	Domínios
pH	Inadequado Baixo	
	Média	
	Inadequado Elevado	
Nitrito	Adequado	
	Média	
	Inadequado	
Nitrate	Adequado	
	Média	
	Inadequado	
Cloreto	Adequado	
	Média	
	Inadequado	

Definição dos Conjuntos Fuzzy		
	Termos Linguísticos	Domínios
E.coli	Adequado	
	Inadequado	
Coliformes Totais	Adequado	

Inadequado	
	Termos Linguísticos Domínios
Sólidos dissolvidos totais	Inadequado Baixo
	Média
	Inadequado Elevado
	Termos Linguísticos Domínios
Turbidez	Adequado
	Média
	Inadequado

APÊNDICE B – Base de regras dos grupos: Químicos, Bacteriológicos e Intermediário

Quadro A 1: Base de Regras do Grupo Químico

Regra	SE	E	E	E	Então
	pH	Nitrito	Nitrato	Cloreto	Definição
1	Inadequado Baixo	Inadequado	Inadequado	Adequado	Baixo
2	Inadequado Baixo	Inadequado	Inadequado	Médio	Inadequado
3	Inadequado Baixo	Inadequado	Inadequado	Inadequado	Inadequado
4	Inadequado Baixo	Inadequado	Médio	Adequado	Aceitável
5	Inadequado Baixo	Inadequado	Médio	Médio	Baixo
6	Inadequado Baixo	Inadequado	Médio	Inadequado	Inadequado
7	Inadequado Baixo	Inadequado	Adequado	Adequado	Adequado
8	Inadequado Baixo	Inadequado	Adequado	Médio	Aceitável
9	Inadequado Baixo	Inadequado	Adequado	Inadequado	Baixo
10	Inadequado Baixo	Médio	Inadequado	Adequado	Aceitável
11	Inadequado Baixo	Médio	Inadequado	Médio	Baixo
12	Inadequado Baixo	Médio	Inadequado	Inadequado	Inadequado
13	Inadequado Baixo	Médio	Médio	Adequado	Adequado
14	Inadequado Baixo	Médio	Médio	Médio	Aceitável
15	Inadequado Baixo	Médio	Médio	Inadequado	Baixo
16	Inadequado Baixo	Médio	Adequado	Adequado	Ótimo
17	Inadequado Baixo	Médio	Adequado	Médio	Adequado
18	Inadequado Baixo	Médio	Adequado	Inadequado	Aceitável
19	Inadequado Baixo	Adequado	Inadequado	Adequado	Adequado
20	Inadequado Baixo	Adequado	Inadequado	Médio	Aceitável
21	Inadequado Baixo	Adequado	Inadequado	Inadequado	Baixo
22	Inadequado Baixo	Adequado	Médio	Adequado	Ótimo
23	Inadequado Baixo	Adequado	Médio	Médio	Adequado
24	Inadequado Baixo	Adequado	Médio	Inadequado	Aceitável
25	Inadequado Baixo	Adequado	Adequado	Adequado	Ótimo
26	Inadequado Baixo	Adequado	Adequado	Médio	Ótimo

27	Inadequado Baixo	Adequado	Adequado	Inadequado	Adequado
28	Médio	Inadequado	Inadequado	Adequado	Aceitável
29	Médio	Inadequado	Inadequado	Médio	Baixo
30	Médio	Inadequado	Inadequado	Inadequado	Inadequado
31	Médio	Inadequado	Médio	Adequado	Adequado
32	Médio	Inadequado	Médio	Médio	Aceitável
33	Médio	Inadequado	Médio	Inadequado	Baixo
34	Médio	Inadequado	Adequado	Adequado	Ótimo
35	Médio	Inadequado	Adequado	Médio	Adequado
36	Médio	Inadequado	Adequado	Inadequado	Aceitável
37	Médio	Médio	Inadequado	Adequado	Adequado
38	Médio	Médio	Inadequado	Médio	Aceitável
39	Médio	Médio	Inadequado	Inadequado	Baixo
40	Médio	Médio	Médio	Adequado	Ótimo
41	Médio	Médio	Médio	Médio	Adequado
42	Médio	Médio	Médio	Inadequado	Aceitável
43	Médio	Médio	Adequado	Adequado	Ótimo
44	Médio	Médio	Adequado	Médio	Ótimo
45	Médio	Médio	Adequado	Inadequado	Adequado
46	Médio	Adequado	Inadequado	Adequado	Ótimo
47	Médio	Adequado	Inadequado	Médio	Adequado
48	Médio	Adequado	Inadequado	Inadequado	Aceitável
49	Médio	Adequado	Médio	Adequado	Ótimo
50	Médio	Adequado	Médio	Médio	Ótimo
51	Médio	Adequado	Médio	Inadequado	Adequado
52	Médio	Adequado	Adequado	Adequado	Ótimo
53	Médio	Adequado	Adequado	Médio	Ótimo
54	Médio	Adequado	Adequado	Inadequado	Ótimo
55	Inadequado Alto	Inadequado	Inadequado	Adequado	Baixo
56	Inadequado Alto	Inadequado	Inadequado	Médio	Inadequado
57	Inadequado Alto	Inadequado	Inadequado	Inadequado	Inadequado
58	Inadequado Alto	Inadequado	Médio	Adequado	Aceitável
59	Inadequado Alto	Inadequado	Médio	Médio	Baixo
60	Inadequado Alto	Inadequado	Médio	Inadequado	Inadequado
61	Inadequado Alto	Inadequado	Adequado	Adequado	Adequado
62	Inadequado Alto	Inadequado	Adequado	Médio	Aceitável
63	Inadequado Alto	Inadequado	Adequado	Inadequado	Baixo
64	Inadequado Alto	Médio	Inadequado	Adequado	Aceitável
65	Inadequado Alto	Médio	Inadequado	Médio	Baixo
66	Inadequado Alto	Médio	Inadequado	Inadequado	Inadequado
67	Inadequado Alto	Médio	Médio	Adequado	Adequado
68	Inadequado Alto	Médio	Médio	Médio	Aceitável
69	Inadequado Alto	Médio	Médio	Inadequado	Baixo

70	Inadequado Alto	Médio	Adequado	Adequando	Ótimo
71	Inadequado Alto	Médio	Adequado	Médio	Adequado
72	Inadequado Alto	Médio	Adequado	Inadequado	Aceitável
73	Inadequado Alto	Adequado	Inadequado	Adequando	Adequado
74	Inadequado Alto	Adequado	Inadequado	Médio	Aceitável
75	Inadequado Alto	Adequado	Inadequado	Inadequado	Baixo
76	Inadequado Alto	Adequado	Médio	Adequando	Ótimo
77	Inadequado Alto	Adequado	Médio	Médio	Adequado
78	Inadequado Alto	Adequado	Médio	Inadequado	Aceitável
79	Inadequado Alto	Adequado	Adequado	Adequando	Ótimo
80	Inadequado Alto	Adequado	Adequado	Médio	Ótimo
81	Inadequado Alto	Adequado	Adequado	Inadequado	Adequado

Quadro A 2: Base de Regras do Grupo Bacteriológico

Base de Regra Grupo Bacteriológico			
Regra	Se	E	Então
	E.coli	Coliformes Totais	Definição
1	Presença	Ausência	Inadequado
2	Ausência	Ausência	Ótima
3	Presença	Presença	Inadequado
4	Ausência	Presença	Inadequado
5	Presença	Ausência	Inadequado
6	Ausência	Ausência	Ótima

Quadro A 3: Base de Regras do Grupo Intermediário

Regra	SE	E	E	Então
	Físico	Químico	Bacteriológico	Definição
1	Inadequado	Inadequado	Inadequado	Inadequado
2	Baixo	Inadequado	Ótimo	Baixo
3	Médio	Inadequado	Inadequado	Baixo
4	Adequado	Inadequado	Ótimo	Médio Aceitável
5	Ótimo	Inadequado	Inadequado	Inadequado
6	Inadequado	Inadequado	Ótimo	Baixo
7	Baixo	Inadequado	Inadequado	Inadequado
8	Médio	Inadequado	Ótimo	Baixo
9	Adequado	Inadequado	Inadequado	Baixo
10	Ótimo	Inadequado	Ótimo	Médio Aceitável
11	Inadequado	Baixo	Inadequado	Inadequado
12	Baixo	Baixo	Ótimo	Baixo
13	Médio	Baixo	Inadequado	Baixo
14	Adequado	Baixo	Ótimo	Médio Aceitável
15	Ótimo	Baixo	Inadequado	Inadequado
16	Inadequado	Baixo	Ótimo	Baixo

17	Baixo	Baixo	Inadequado	Baixo
18	Médio	Baixo	Ótimo	Médio Aceitável
19	Adequado	Baixo	Inadequado	Inadequado
20	Ótimo	Baixo	Ótimo	Adequado
21	Inadequado	Médio	Inadequado	Baixo
22	Baixo	Médio	Ótimo	Médio Aceitável
23	Médio	Médio	Inadequado	Baixo
24	Adequado	Médio	Ótimo	Adequado
25	Ótimo	Médio	Inadequado	Baixo
26	Inadequado	Médio	Ótimo	Baixo
27	Baixo	Médio	Inadequado	Baixo
28	Médio	Médio	Ótimo	Médio Aceitável
29	Adequado	Médio	Inadequado	Baixo
30	Ótimo	Médio	Ótimo	Adequado
31	Inadequado	Adequado	Inadequado	Baixo
32	Baixo	Adequado	Ótimo	Médio Aceitável
33	Médio	Adequado	Inadequado	Baixo
34	Adequado	Adequado	Ótimo	Adequado
35	Ótimo	Adequado	Inadequado	Baixo
36	Inadequado	Adequado	Ótimo	Médio Aceitável
37	Baixo	Adequado	Inadequado	Baixo
38	Médio	Adequado	Ótimo	Adequado
39	Adequado	Adequado	Inadequado	Baixo
40	Ótimo	Adequado	Ótimo	Ótimo
41	Inadequado	Ótimo	Inadequado	Baixo
42	Baixo	Ótimo	Ótimo	Adequado
43	Médio	Ótimo	Inadequado	Baixo
44	Adequado	Ótimo	Ótimo	Ótimo
45	Ótimo	Ótimo	Inadequado	Baixo
46	Inadequado	Ótimo	Ótimo	Médio Aceitável
47	Baixo	Ótimo	Inadequado	Baixo
48	Médio	Ótimo	Ótimo	Adequado
49	Adequado	Ótimo	Inadequado	Baixo
50	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo