



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE**

**SUÊNIO ANDERSON FELICIANO DA SILVA**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL NO GERENCIAMENTO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SUMÉ-PB**

**Campina Grande – PB**

**Dezembro de 2016**

**SUÊNIO ANDERSON FELICIANO DA SILVA**

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL NO GERENCIAMENTO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SUMÉ-PB**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadores:

Prof<sup>ª</sup> Iana Alexandra Alves Rufino

Prof. Janiro Costa Rêgo

**Campina Grande – PB**

**Dezembro de 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, Suênio Anderson Feliciano da.  
Análise multicritério espacial no gerenciamento dos recursos hídricos no perímetro irrigado de Sumé-PB / Suênio Anderson Feliciano da Silva. – Campina Grande, 2016.  
149 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2016.

"Orientação: Prof. Dr. Iana Alexandra Alves Rufino, Prof. Dr. Janiro Costa Rêgo".

Referências.

1. Recursos Hídricos Integrados. 2. Análise Multicritério. 3. SIG.  
I. Rufino, Iana Alexandra Alves. II. Rêgo, Janiro Costa. III. Título.

CDU 556.18(043)

SUÊNIO ANDERSON FELICIANO DA SILVA

**ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL NO GERENCIAMENTO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO DE SUMÉ-PB**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

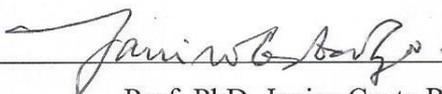
Aprovada em: 07 / 12 / 2016

BANCA EXAMINADORA



Prof<sup>ª</sup> Dra. Iana Alexandra Alves Rufino

(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



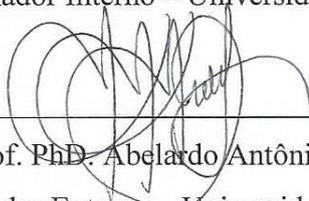
Prof. PhD. Janiro Costa Rêgo

(Orientador – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof<sup>ª</sup> Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima

(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande)



Prof. PhD. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

(Examinador Externo – Universidade Federal Rural de Pernambuco)

*Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus,  
daqueles que são chamados segundo o seu propósito.*

*Romanos 8:28*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de ter chegado até este momento, pois mesmo diante as diversas dificuldades encontradas supriu todas as minhas necessidades mediante seu Amor.

Aos meus pais João José da Silva (*in memoriam*) e a Maria Rosilda Feliciano da Silva, alicerces para ter chegado até este momento, pois sempre incentivaram e acreditaram. A estes meu profundo agradecimento!

Minha irmã Suerda Feliciano da Silva por acreditar neste objetivo e ter sempre me ajudado grandemente. Você faz parte dessa conquista minha irmã!

A minha família constituída por Deus, especialmente, Ana Maria Alves da Silva Feliciano, minha esposa, pela paciência e os momentos de apoio e conselhos fundamentais para que concluísse a dissertação. Ao meu filho João Lucas Feliciano da Silva, pois consiste em um dos motivos para galgar novos caminhos.

A minha orientadora professora Dr. Iana Alexandra Alves Rufino, pelos valiosos ensinamentos, correções, conselhos e paciência. Agradeço a Deus pela sua vida, pessoa fundamental na minha formação.

Ao professor PhD. Janiro Costa Rêgo, sua orientação foi substancial para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aqueles que compõem o projeto BRAMAR pelo suporte à pesquisa, em especial ao técnico em laboratório Ismael Pereira, a engenheira Bárbara Tsuyuguchi e ao coordenador geral do projeto no Brasil, professor Dr. Carlos Galvão.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental pelos ensinamentos e aos amigos de turma.

Aos funcionários e colaboradores dos Laboratórios de Hidráulica I e II.

Aos examinadores prof<sup>a</sup>. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima e o prof. PhD. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro por aceitarem o convite, e assim poderem participar e contribuir com este trabalho.

A todos que contribuíram meus sinceros agradecimentos!

Aos meus pais João José da Silva (*in memoriam*) e a Maria Rosilda Feliciano da Silva,  
DEDICO.

## RESUMO

No semiárido brasileiro, a situação de escassez hídrica compromete o desenvolvimento econômico e social da região. Assim, torna-se necessário desenvolver ferramentas adequadas para apoiar a tomada de decisão quanto ao uso dos recursos hídricos, de maneira a encontrar alternativas de adaptação da agricultura, principalmente, em perímetros irrigados, às alterações climáticas enfrentadas. Particularmente nos perímetros irrigados criados pelo Departamento Nacional de Obras Contra Seca (DNOCS), torna-se um desafio o uso dos recursos hídricos, em decorrência do descompasso da oferta e demanda de água nestes locais, agravado pela falta de planejamento quanto ao uso destes recursos. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo a utilização do (Processo de Análise Hierárquica) AHP em (Sistema de Informações Geográficas) SIG como ferramenta para auxiliar a tomada de decisão quanto ao uso dos recursos hídricos no perímetro irrigado de Sumé-PB. O diagnóstico quali-quantitativo demonstrou que dos recursos hídricos, o que possui melhor qualidade química e microbiológica corresponde à água superficial, e que, para viabilização integral da irrigação no perímetro são necessárias, no mínimo, duas fontes hídricas como água superficial e subterrânea. A modelagem espacial multicritério demonstrou que dentre os critérios utilizados, o mais restritivo corresponde à qualidade da água, isto é comprovado mediante as faixas de adequação e inadequação obtidas nas alternativas concebidas pelo modelo espacial. A água residuária por revelar uma qualidade inferior em comparação às águas subterrânea e superficial apresentou uma maior faixa de inadequação nas alternativas geradas, considerando pesos semelhantes no processo hierárquico para os critérios técnicos, econômicos e ambientais dentro do modelo para os recursos hídricos estudados. Com base nas alternativas geradas pelo modelo para água superficial e subterrânea, gerou-se um cenário para o gerenciamento integrado dos recursos para uma área irrigável de aproximadamente 118 hectares com água superficial, 112 hectares com água subterrânea e 58 hectares ditos inadequados para o uso de tais recursos.

**Palavras-chave:** Análise Multicritério, SIG, Recursos Hídricos Integrados.

## ABSTRACT

Water Scarcity disrupts an economic and social development for the whole Brazilian semi-arid region. In order to minimize this problem, suitable decision-making tools can be used for helping on agriculture and climate change adaptations in irrigated crop areas. In the National Department of Works Against Drought (DNOCS) irrigated areas, it becomes a challenge the water management by the irregular proportionality among offer and demand, compounded by a bad water use planning. In this sense, this dissertation proposes an integrated use of (Analytic Hierarchy Process) AHP and (Geographic Information System) GIS tools for helping an integrated water management in Sumé-PB area. Through a qualitative and quantitative analysis, it shows that the surface water source has a better water quality (microbiological and chemical). It also shows for irrigating the whole area it will be necessary at least two different water sources (as surface water and groundwater as well). The spatial multicriteria modeling comes up the water quality as the most restrictive criteria. It can be proofed by the suitability ranges obtained by the alternatives suggested on the spatial modeling. The waste water revealed a low quality comparing with the groundwater and surface water. Using similar weights for hierarchical analysis of all criterion (technical, economic and environmental), the model shows a wide “no suitability” range for waste water sources (reuse). Based on the generated alternatives for surface and groundwater, a scenario was simulated to an integrated water resources management of the crops areas. Results are approximately 118 hectares recommended by the model to be irrigated by surface water, 112 hectares by groundwater and 58 hectares are not appropriate to use any water resources.

**Keywords:** Multicriteria Evaluation, GIS, Integrated Water Resources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do SDSS (Adaptado de EISSA, 2013).....	33
Figura 2 - Estrutura Hierárquica do Processo de Tomada de Decisão (Adaptado de MALCZEWSKI e RINNER, 2015).....	36
Figura 3 - Localização da Área de Estudo - Perímetro Irrigado no detalhe. ....	46
Figura 4 - Área de estudo e a localização das fontes: reservatório, poços e ETE. ....	49
Figura 5 - Fatos históricos na bacia do Rio Sucuru (MENDONÇA, 2010; GUERRA, 1990; VIEIRA, 2002). ....	52
Figura 6 - Fluxograma geral da pesquisa.....	54
Figura 7 - Estrutura do problema.....	58
Figura 8 - Modelagem espacial, irrigação com água superficial.....	68
Figura 9 - Combinação ponderada dos <i>rasters</i> de critérios (Adaptado de MARINONI, 2004).....	71
Figura 10 - Modelagem espacial, irrigação com água subterrânea. ....	73
Figura 11 - Modelagem espacial, irrigação com água residuária. ....	74
Figura 12 - Evolução do volume do reservatório de Sumé nos últimos anos (AESAs, 2016).....	77
Figuras 13 e 14 - Obstruções do canal principal que levava águas aos lotes (SILVA, 2016).....	77
Figura 15 - Evolução no decorrer do ano (janeiro/dezembro) da demanda e disponibilidade hídrica. ....	78
Figura 16 - Comportamento dos níveis de Coliformes Termotolerantes do reservatório de Sumé (AESAs, 2016). ....	80
Figura 17 - Comportamento da Ce da água do reservatório de Sumé (AESAs, 2016)....	81
Figura 18 - Comportamento da SDT do reservatório de Sumé (AESAs, 2016).....	82
Figura 19 - Volume de água armazenado pelo manancial subterrâneo (VIEIRA e RÊGO, 2016).....	84
Figuras 20, 21, 22 e 23 - Parâmetros químico e microbiológico da água residuária tratada. ....	88
Figura 24 e 25 - Produção agrícola no perímetro irrigado. ....	90
Figura 26 - Declividade do perímetro irrigado de Sumé.....	93
Figura 27 - Proximidade entre as áreas irrigadas do perímetro. ....	94
Figura 28 - Proximidade das áreas irrigadas ao reservatório.....	95
Figura 29 - Mapa de fertilidade do solo do perímetro.....	99
Figura 30 - Condutividade elétrica do solo. ....	102
Figura 31 - Percentagem de sódio trocável do solo no perímetro. ....	103
Figura 32 - Classe de solo do perímetro irrigado. ....	105
Figura 33 - Classe de adequação da qualidade da água superficial para irrigação.....	106
Figura 34 - Alternativa I: modelagem espacial multicritério para água superficial. ....	110
Figuras 35 e 36 - Lotes 19 e 18, respectivamente, com a presença demasiada de algaroba e alguns troncos cortados.....	111
Figuras 37 e 38 - Lotes 31 e 34, respectivamente. ....	112
Figura 39 - Alternativa II: modelagem espacial multicritério para água superficial....	113

Figuras 40 e 41 - Obstruções encontradas no canal principal, parte inferior do perímetro. .....	114
Figura 42 - Cenário I: tomada de decisão quanto ao gerenciamento da água superficial. .....	116
Figura 43 - Cenário II: tomada de decisão quanto ao gerenciamento da água superficial. .....	118
Figura 44 - Classe de adequação da qualidade da água subterrânea para irrigação. ....	120
Figura 45 - Alternativa I: modelagem espacial multicritério para água subterrânea....	121
Figura 46 - Alternativa II: modelagem espacial multicritério para água subterrânea. .	123
Figura 47 - Cenário I: tomada de decisão quanto ao gerenciamento integrado da água superficial e subterrânea. ....	125
Figura 48 - Classe de adequação para irrigação com água residuária nas áreas irrigadas (CA <sub>PAIAA</sub> ). ....	126
Figura 49 - Proximidade das Áreas Irrigadas a ETE (CT <sub>PAIETE</sub> ). ....	128
Figura 50 - Classe de adequação da qualidade da água residuária para irrigação (CA <sub>1.2</sub> ). .....	130
Figura 51 - Alternativa I: modelagem espacial multicritério da água residuária. ....	132
Figura 52 - Alternativa II: modelagem espacial multicritério da água residuária. ....	134

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Escalas de comparações pareadas (SAATY, 1980). .....	39
Tabela 2 - Índices de consistência aleatórios.....	41
Tabela 3 - Classe de adequação dos Critérios Técnicos.....	60
Tabela 4 - Classe de adequação dos Critérios Ambientais.....	61
Tabela 5 - Classe de adequação da Fertilidade do Solo, Critério Econômico.....	62
Tabela 6 - Classe de adequação do pH, Critério Econômico. ....	63
Tabela 7 - Classe de adequação dos Critérios Econômicos. ....	63
Tabela 8 - Classe de adequação Critério Ambiental.....	66
Tabela 9 - Estatística descritiva das análises de qualidade da água dos poços (Fonte: projeto BRAMAR). ....	85
Tabela 10 - Matriz de comparação aos pares do indicador I <sub>1</sub> - Processos do Solo ou Comportamento. ....	96
Tabela 11 - Matriz de comparação aos pares do indicador I <sub>2</sub> - Capacidade de Troca Catiônica.....	97
Tabela 12 - Matriz de comparação aos pares do indicador I <sub>3</sub> . - Necessidades Nutricionais das Plantas. ....	98
Tabela 13 - Matriz de comparação aos pares dos indicadores. ....	99
Tabela 14 - Comparação pareada dos Critérios Técnicos. ....	107
Tabela 15 - Comparação pareada dos Critérios Econômicos.....	108
Tabela 16 - Comparação pareada dos Critérios Ambientais. ....	108
Tabela 17 - Comparação pareada resultante dos CT, CE e CA.....	109
Tabela 18 - Comparação pareada resultante dos CT, CE e CA.....	109
Tabela 19 - Comparação pareada dos atributos que compõe o CT, água subterrânea. ....	119
Tabela 20 - Comparação pareada dos atributos que compõe o CA, água subterrânea. ....	119
Tabela 21 - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa I – Água subterrânea. ....	120
Tabela 22 - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa II – Água subterrânea. ....	122
Tabela 23 - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa I - Água residuária. ....	131
Tabela 24 - Comparação pareada dos atributos do CA referente à água residuária. ....	131
Tabela 25 - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa II - Água residuária. ....	133
Tabela 26 - Resultados das análises físico-químicas e microbiológicas (BRAMAR, 2016).....	149

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba

AHP - Processo de Análise Hierárquica

ANA - Agência Nacional de Águas

BRAMAR - *Brazil-Managed-Aquifer-Recharge*

CAGEPA - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba

CA - Critérios Ambientais

CA<sub>PAIAA</sub> - Critério Ambiental: Proximidade das Áreas Irrigadas ao Aquífero Aluvial

CA<sub>1</sub> - Qualidade da água superficial

CA<sub>2</sub> - Classe do Solo

CA<sub>1.1</sub> - Qualidade da água subterrânea

CA<sub>1.2</sub> - Qualidade da água residuária

CA<sub>2</sub> - Classe do Solo

CE<sub>1</sub> - Salinidade do Solo

CE<sub>2</sub> - Fertilidade do Solo

CE<sub>3</sub> - Sodicidade do Solo

Ce - Condutividade elétrica

CE - Critérios Econômicos

CI – Índice de Consistência

CR - Razão de Consistência

CT - Critérios Técnicos

CT<sub>PAIETE</sub> - Critério Técnico: Proximidade das Áreas Irrigadas a ETE

CT<sub>1</sub> - Proximidade das Áreas Irrigadas ao Reservatório

CT<sub>2</sub> - Proximidade entre as Áreas Irrigadas

CT<sub>3</sub> - Declividade do Terreno

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra Seca

ESRI - *Environmental Systems Research Institute*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

*GIS-MCDA - MultiCriteria Decision Analysis in Geographic Information Systems*

*I<sub>1</sub> - Processos do solo ou de comportamento*

*I<sub>2</sub> - Capacidade do solo de resistir à troca de cátions*

*I<sub>3</sub> - Necessidades nutricionais das plantas*

LPI - Lotes Potencialmente Irrigáveis

MADA - Análise de Decisão Multiatributo

MODA - Análise de Decisão Multiobjetivo

PAI - Proximidade das Áreas Irrigadas

PAIAA - Proximidade das Áreas Irrigadas ao Aquífero Aluvial

PAIETE - Proximidade das Áreas Irrigadas a ETE

PAIR - Proximidade das Áreas Irrigadas ao Reservatório

RI - Índice de Aleatoriedade

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SUDEMA - Superintendência de Administração do Meio Ambiente

$\lambda_{\text{máx}}$  - Máximo Autovalor

## SUMÁRIO

<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.0</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3.0</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
3.1	PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS .....	19
<b>3.1.1</b>	<b>Recursos hídricos em regiões semiáridas</b> .....	<b>19</b>
<i>3.1.1.1</i>	<i>Escassez hídrica no semiárido do Nordeste Brasileiro</i> .....	<i>20</i>
<b>3.1.2</b>	<b>Gestão e Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos no Brasil e Paraíba</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Alternativas para uso racional da água em perímetros irrigados</b> .....	<b>23</b>
<i>3.1.3.1</i>	<i>Utilização de efluentes para fins de irrigação</i> .....	<i>23</i>
<i>3.1.3.2</i>	<i>Águas superficiais no semiárido e o desafio ao atendimento dos usos múltiplos</i> .....	<i>24</i>
<i>3.1.3.3</i>	<i>Gestão das águas subterrâneas</i> .....	<i>26</i>
3.2	METODO DE ANÁLISE MULTICRITERIO .....	27
<b>3.2.1</b>	<b>Apoio à Tomada de Decisão</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Análise Multicritério no Gerenciamento dos Recursos Hídricos</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Método de Análise Multicritério e o Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SDSS)</b> 29	
3.3	MODELAGEM MULTICRITÉRIO E O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP) COMO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO COM BASE EM SIG .....	35
<b>3.3.1</b>	<b>Modelagem Conceitual da MCDA</b> .....	<b>35</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Processo de Análise Hierárquica (AHP) como método de tomada de decisão com base em SIG</b> .....	<b>36</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Modelagem Matemática: AHP e comparação de pares</b> .....	<b>38</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Aplicação do Método AHP com base em SIG</b> .....	<b>42</b>
<b>4.0</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>46</b>
4.1	REGIÃO DE ESTUDO .....	46
4.2	CLIMA .....	46
4.3	VEGETAÇÃO .....	47
4.4	SOLOS .....	47
4.5	HIDROGRAFIA .....	47
4.6	CASO DE ESTUDO .....	48
<b>4.6.1</b>	<b>Agricultura</b> .....	<b>49</b>
<b>4.6.2</b>	<b>Águas Subterrâneas e o Aquífero Aluvial</b> .....	<b>50</b>
<b>4.6.3</b>	<b>Águas superficiais e gestão das águas de pequenos reservatórios na bacia do Rio Sucuru</b> .....	<b>51</b>

<b>5.0</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>54</b>
5.1	SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO .....	55
5.2	MODELAGEM CONCEITUAL .....	58
5.3	MODELAGEM ESPACIAL.....	66
<b>5.3.1</b>	<b>Modelagem espacial da água superficial para irrigação.....</b>	<b>67</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Interpolação por Krigagem na composição do mapa de Fertilidade do Solo .....</b>	<b>71</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Modelagem espacial da água subterrânea para irrigação.....</b>	<b>72</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Modelagem espacial da água residuária para irrigação .....</b>	<b>73</b>
<b>6.0</b>	<b>DIAGNÓSTICO ATUAL DOS RECURSOS HÍDRICOS E PERÍMETRO IRRIGADO.....</b>	<b>76</b>
6.1	ÁGUAS SUPERFICIAIS.....	76
6.2	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS .....	82
6.3	ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....	86
6.4	PRODUÇÃO AGRÍCOLA .....	89
<b>7.0</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS.....</b>	<b>92</b>
7.1	CRITÉRIOS TÉCNICOS (CT) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL.....	92
<b>7.1.1</b>	<b>Declividade do Terreno (CT<sub>3</sub>) e Proximidade entre as Áreas Irrigadas (PAI) (CT<sub>2</sub>).....</b>	<b>92</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Proximidade das Áreas Irrigadas ao Reservatório (PAIR) (CT<sub>1</sub>) .....</b>	<b>94</b>
7.2	CRITÉRIOS ECONÔMICOS (CE) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL.....	95
<b>7.2.1</b>	<b>Fertilidade do solo (CE<sub>2</sub>).....</b>	<b>95</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Salinidade (CE<sub>1</sub>) e Sodicidade do solo (CE<sub>3</sub>).....</b>	<b>101</b>
7.3	CRITÉRIOS AMBIENTAIS (CA) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL.....	104
<b>7.3.1</b>	<b>Classe do solo (CA<sub>2</sub>) .....</b>	<b>104</b>
<b>7.3.2</b>	<b>Qualidade da água do reservatório (CA<sub>1</sub>) .....</b>	<b>105</b>
7.4	MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITÉRIO – ÁGUA SUPERFICIAL .....	106
<b>7.4.1</b>	<b>Aplicação do AHP .....</b>	<b>106</b>
<b>7.4.2</b>	<b>Cenários – Tomada de decisão: gerenciamento da demanda de água superficial para irrigação .....</b>	<b>114</b>
7.5	MODELAGEM MULTICRITÉRIO ESPACIAL – ÁGUA SUBTERRÂNEA .....	118
<b>7.5.1</b>	<b>Aplicação do AHP .....</b>	<b>118</b>
<b>7.5.2</b>	<b>Cenário – Tomada de decisão: gerenciamento da demanda de água subterrânea para irrigação .....</b>	<b>123</b>
7.6	MODELAGEM MULTICRITÉRIO ESPACIAL – ÁGUA RESIDUÁRIA .....	125
<b>7.6.1</b>	<b>Aplicação da AHP .....</b>	<b>130</b>

<b>8.0</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>136</b>
<b>10.0</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIGRÁFICA.....</b>	<b>138</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>147</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>149</b>

## 1.0 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos maiores desafios da humanidade é lidar com o uso sustentável dos recursos naturais, como a água e o solo. Nesse contexto, a diversidade dos usos múltiplos e a utilização dos recursos naturais de forma descontrolada têm gerado privação de recursos essenciais para o desenvolvimento social, bem estar e qualidade de vida. Em relação aos recursos hídricos, a falta de planejamento quanto ao seu uso tem acarretado em diversas regiões do Brasil a escassez deste bem, dotado de grande valor social e econômico.

O planejamento e gerenciamento representam atividades primordiais para a efetiva implementação dos fundamentos, objetivos e instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), seja numa situação de escassez hídrica ou de abundância de recursos. Neste contexto, para o desenvolvimento da irrigação local/regional no semiárido é fundamental conhecer a disponibilidade de água em quantidade e qualidade e, principalmente, deve-se procurar alternativas de uso dos recursos hídricos adequadas à realidade, ou seja, às condições do solo e das culturas praticadas pelos irrigantes. Assim, o uso da água para irrigação de maneira sustentável configura-se num desafio para gestão dos recursos hídricos (TUNDISI, 2003).

Diante da atual situação das regiões semiáridas, não apenas no Brasil, como em todo o mundo, torna-se necessário desenvolver ferramentas adequadas para apoiar a tomada de decisão de modo a encontrar estratégias de adaptação às alterações climáticas, no setor da agricultura, que demanda uma maior quantidade de água em relação a outros setores (VARELA-ORTEGA *et al.*, 2014; AHRENDTS *et al.*, 2008; MACHIWAL; JHA; MAL, 2011; KHEMIRI *et al.*, 2013). No Brasil, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2015), o consumo na agricultura chega a 72% do total, com uma área irrigável de aproximadamente 29,6 milhões de hectares. No semiárido brasileiro, onde estão localizados os perímetros irrigados criados pelo Departamento Nacional de Obras Contra Seca (DNOCS) observa-se o descompasso entre a oferta e a demanda de água, agravado pela má utilização, ou seja, pela falta de planejamento e gerenciamento.

Uma forma de superar esse descompasso é com a tomada de decisão fundamentada no gerenciamento integrado e sustentável dos recursos hídricos disponíveis para uso, utilizando critérios e alternativas que configurem a realidade dessas áreas irrigadas no Brasil. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) se

apresenta como uma ferramenta que possibilita aos tomadores de decisão escolher a(s) melhor(es) alternativa(s) quanto ao uso da água mediante a análise espacial, levando em consideração critérios ambientais, econômicos e técnicos que configuram o problema de decisão quanto ao uso da água pelos irrigantes (ANANE *et al.*, 2012; MASSEI *et al.*, 2014).

Várias técnicas de análise multicritério têm sido usadas para tomada de decisão como: ELECTRE, PROMETHEE, AHP, TOPSIS e outros (ANANE *et al.*, 2012). No entanto, apenas alguns desses métodos são aplicáveis integrados ao SIG, seja na avaliação de aptidão agrícola (CHEN, YU e KHAN, 2010, 2013; AKINCI, ÖZALP e TURGUT, 2013), na escolha de locais de recarga de aquífero (PEDRERO *et al.*, 2011; AZIZUR *et al.*, 2012), mapeamento e classificação de locais adequados para irrigação com água residuária (ANANE *et al.*, 2012), desenvolvimento de mapas de suscetibilidade a deslizamento de terras (FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014) e no planejamento urbano (MOSADEGHI *et al.*, 2015).

Portanto, a Análise Multicritério Espacial consiste numa ferramenta de tomada de decisão importante devida à ampla gama de metodologias relacionadas que visam resolver problemas de planejamento e gestão baseada em GIS, de maneira que oferecem uma variedade de técnicas e práticas que possibilitam incorporar o conhecimento das diversas áreas envolvidas para integrar as preferências dos tomadores de decisão (CHEN, YU e KHAN, 2010).

Considerando a importância do gerenciamento dos recursos hídricos em perímetros irrigados e o potencial do SIG no auxílio da tomada de decisão, este trabalho utiliza-se da análise multicritério espacial, em específico do Processo de Análise Hierárquica (AHP) (SAATY, 1977, 1980, 1990) como ferramenta de apoio à tomada de decisão em SIG para alocações de uso da água do reservatório de Sumé-PB, do aquífero aluvial presente no perímetro irrigado e de efluentes domésticos da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de Sumé, considerando as condições do solo, as culturas exploradas, a quantidade e a qualidade da água disponível. Neste contexto, busca-se, com base em um conjunto de critérios, encontrar alternativas de uso sustentável da água, com adoção de cenários observando a gestão sistemática e sem dissociar os aspectos quantitativos e qualitativos.

## 2.0 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

- Propor um gerenciamento integrado e qualiquantitativo do uso dos recursos hídricos no perímetro irrigado de Sumé-PB a partir de uma análise multicritério espacial.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar um diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos, solos e culturas presentes no perímetro irrigado mediante as informações disponíveis;
- Estabelecer um conjunto de critérios para tomada de decisão a partir do diagnóstico realizado;
- Realizar uma modelagem espacial multicritério integrada dos critérios escolhidos;
- Identificar alternativas de gestão para o manejo dos recursos hídricos de maneira a proporcionar os usos múltiplos pelos irrigantes;
- Estabelecer cenários para o gerenciamento dos recursos hídricos com base nas alternativas indicadas.

### 3.0 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos deve observar a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei 9.433/97. Esta lei baseia-se no fundamento de que a gestão deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas. Nesse contexto, considerando que em regiões semiáridas a água é um recurso escasso, em situação de escassez hídrica os usos múltiplos são comprometidos e tal situação proporciona conflitos entre os usuários. Assim, uma forma real de evitar conflitos é planejar uso da água pelo fato de ser um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. Sendo assim, é fundamental o planejamento dos recursos hídricos, que resulte na utilização racional e integrada com vistas a assegurar a disponibilidade e padrões de qualidade da água adequada para o desenvolvimento da tríade social, econômico e ambiental.

##### 3.1.1 Recursos hídricos em regiões semiáridas

As regiões semiáridas têm suas particularidades, no que diz respeito à questão dos recursos hídricos, sendo crucial a adaptação às alterações climáticas, no setor da agricultura. As adaptações neste setor requerem uma revisão das estruturas de governança da água, considerando circunstâncias locais e o envolvimento dos principais interessados no desenvolvimento de planos de adaptações regionais. Para tratar dessas questões, torna-se necessário desenvolver quadros, modelos e ferramentas adequadas para apoiar a tomada de decisão de modo a encontrar estratégias de adaptação às alterações climáticas no setor de agricultura que demanda uma maior quantidade de água em relação a outros setores. São exemplos de regiões semiáridas onde estes aspectos se encontram presentes: a bacia do Guadiana no sudoeste da Espanha, bacia do Volta em Atankwidi na zona Guiné Sudão do norte da África Ocidental, bacia do distrito de Udaipur parte sul do estado de Rajasthan na Índia, a bacia do aquífero aluvial de Foussana na parte ocidental do centro da Tunísia e o Nordeste do Brasil (VARELA-ORTEGA *et al.*, 2014; AHRENDTS *et al.*, 2008; MACHIWAL, JHA e MAL, 2011; KHEMIRI *et al.*, 2013).

O semiárido brasileiro abrange a maior parte dos estados do Nordeste, e junto com a área setentrional de Minas Gerais e Norte do Espírito Santo compõe-se de uma superfície total de 969.589,4 km<sup>2</sup>. Em 2014, a população estimada do semiárido atingiu

23.846.982 habitantes, equivalendo, respectivamente, a 42,44 e 11,76% da população do Nordeste e do país. O semiárido brasileiro é considerado como um dos mais chuvosos do planeta, com precipitação média anual de 750 mm, no entanto, em algumas áreas a precipitação média não ultrapassa os 400 mm anuais. Em contrapartida a evapotranspiração potencial média atinge 2500 mm/ano, com isso gerando elevados déficits hídricos e limitando a produção agrícola e o desenvolvimento regional. O semiárido paraibano abrange uma área de aproximadamente 48.800 km<sup>2</sup> com 170 municípios, ou seja, representa 86% dos 56.439 km<sup>2</sup> da superfície do estado e uma população de 2.170.530 habitantes. Na Paraíba, segundo o Instituto Nacional do Semiárido (INSA) são monitorados 109 reservatórios somando uma capacidade de armazenamento de 3.578 hm<sup>3</sup>. Quanto ao abastecimento humano, 162 municípios são abastecidos através da rede de distribuição, no entanto, no que diz respeito ao sistema de coleta de esgoto sanitário no semiárido Paraibano apenas 22 municípios são atendidos, contudo a existência deste serviço de coleta não constitui garantia de atendimento a toda população urbana dessas sedes quanto ao esgotamento e devido tratamento, o que influencia diretamente no agravamento da escassez nessa região (GHEYI *et al.*, 2012; MEDEIROS *et al.*, 2014a; MEDEIROS *et al.*, 2014b; MEDEIROS, LIMA e LIMA, 2015).

### **3.1.1.1 Escassez hídrica no semiárido do Nordeste Brasileiro**

O semiárido nordestino tem sua história alicerçada em eventos severos de secas e cheias. A ação política outrora chamada de combate a seca e, atualmente, denominada de convivência com o clima, advém de pulsos de resposta às secas, nos “anos malditos”, a partir do século XIX (GUERRA, 1981). A variabilidade climática e a escassez hídrica são marcas indelévels do semiárido, assim, conviver no semiárido é adaptar a sociedade a uma forma específica da ocorrência do clima regional. Nesse contexto, emerge uma necessidade de construção de infraestrutura hídrica pautada no gerenciamento dos recursos hídricos. O gerenciamento do risco climático é um dos meios para construção de estratégias robustas de adaptação da população do semiárido aos fenômenos naturais (MEDEIROS *et al.*, 2011; GUERRA, 1981).

Apesar das dificuldades enfrentadas, são muitos os esforços realizados para superar a escassez hídrica e atingir o desenvolvimento social/econômico dessa região. Exemplo disso, a construção de açudes e perímetros irrigados pelo Estado, em especial pelo DNOCS, mediante uma política voltada para o paternalismo-clientelismo durante o

século XX (MENDONÇA, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2011). Segundo Guerra (1990) até 1988, no Nordeste, haviam sido construídos 288 açudes com capacidade média de reservar 53 milhões de m<sup>3</sup>. Atualmente, o Nordeste possui 312 reservatórios construídos e monitorados pelo DNOCS, e possui 35 perímetros irrigados, um deles em Sumé, localizado no semiárido paraibano (DNOCS, 2015).

Nesse âmbito, é bem visto que a escassez devida à alta variabilidade climática tem sido enfrentada, quanto ao regime fluvial, com a construção de infraestruturas físicas de reservatórios para compensar a sazonalidade. No entanto, torna-se fundamental o uso conjunto de águas superficiais e subterrâneas, principalmente, nos aluviões que se estendem ao longo de rios, mesmo quando providos de reservatórios à montante (MEDEIROS *et al.*, 2011).

### **3.1.2 Gestão e Gerenciamento Integrado dos Recursos Hídricos no Brasil e Paraíba**

Em decorrência da escassez de água em diversas regiões do Brasil, em especial no Nordeste, tal recurso tem ocasionado diversas mudanças no cenário econômico brasileiro, bem como em alguns casos tem gerado conflitos em meio aos diversos usuários. Assim, a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) surge como um processo que promove o desenvolvimento e gestão coordenada da água, terra e recursos relacionados, no intuito de maximizar o bem-estar econômico e social de uma forma equitativa sem comprometer a sustentabilidade de ecossistemas vitais (*United Nations Development Programme - UNDP*, 2008). No Brasil, o Gerenciamento dos Recursos Hídricos tem seu marco legal com o estabelecimento do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos (SINGREH) mediante a PNRH, com objetivo de coordenar a gestão integrada das águas, arbitrar administrativamente os conflitos relacionados com os recursos hídricos, planejar, regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos; e implementar a PNRH.

A PNRH além de estabelece como ponto fundamental que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo das águas como supracitado destaca que essa gestão deve ser pautada na descentralização e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades. No entanto, percebe-se que tais princípios fundamentais, na prática, não têm sido observados. Por exemplo, segundo Cantalice (2009) no reservatório de Sumé-PB, a montante do perímetro irrigado, a gestão do

reservatório não está adequada às novas políticas de usos múltiplos das águas e às novas posturas em relação ao meio ambiente, bem como o monitoramento e a fiscalização dos usos da água do reservatório.

Carvalho e Curi (2012) afirmam que a gestão dos recursos hídricos consiste num processo decisório complexo, na qual apresentam variáveis e dados que devem ser estruturadas de forma que possibilite um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, com objetivo de contribuir para uma melhor definição de políticas públicas. Assim, a GIRH vislumbra não apenas os custos e benefícios das decisões de gestão da água quanto aspectos financeiros, mas também os custos/benefícios sociais e ambientais, de maneira que ao ignorar esses dois últimos aspectos, pode haver um grande impacto econômico gerando conflitos pelo uso (UNDP, 2008).

Sendo assim, é importante o gerenciamento da demanda de água, que consiste na adoção de medidas, práticas ou incentivos que produzam um uso eficiente da água pela sociedade, mediante redução do consumo final do usuário. Logo, o gerenciamento dos recursos hídricos deve ser feito de forma participativa e integrada, vislumbrando os aspectos quantitativos e qualitativos da água. Na Paraíba, a gestão dos recursos hídricos ainda funciona no âmbito das fronteiras administrativas e políticas. Tais questões dificultam a gestão participativa e democrática desses recursos, aspecto esse crucial para a gestão dos recursos hídricos, principalmente, mediante a necessidade da incorporação dos princípios da sustentabilidade ambiental para um planejamento adequado da região, levando em consideração suas potencialidades e adversidades (BRAGA e RIBEIRO, 2006; CANTALICE, 2009).

Portanto, há uma necessidade de uma abordagem comum e integrada para apoiar os caminhos que levam a decisões sobre o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Especificamente, em um conceito amplo de SIG, a atenção deve ser centrada na definição dos modelos de decisão capazes de integrar as ferramentas de modelagem disponibilizadas pela hidrologia, hidráulica, química e outras. Em particular, as principais pressões sobre a qualidade da água devem ser representadas de forma aplicável aos modelos, para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Estas pressões podem ser os efeitos das práticas agrícolas, superexploração de aquíferos, intrusão de água salgada nos aquíferos costeiros, além de fontes pontuais e difusas de poluição (COLACECI *et al.*, 2008).

### **3.1.3 Alternativas para uso racional da água em perímetros irrigados**

A escassez está associada a uma situação em que a disponibilidade hídrica é insuficiente para atender às demandas e manter as condições ambientais mínimas necessárias para o desenvolvimento sustentável. Assim, a caracterização do risco de ocorrência da escassez hídrica requer um conhecimento concreto, tanto da disponibilidade como das demandas. Além disso, a poluição é um fator que potencializa a escassez: o lançamento de águas residuárias não tratadas em corpos d'água compromete a gestão dos recursos hídricos, em especial quando a carga poluidora lançada é acima da tolerável. Em alguns casos as águas residuárias são lançadas em rios intermitentes, e no caso de regiões semiáridas a céu aberto no solo, contaminando as águas subterrâneas (MEDEIROS *et al.*, 2011).

Por estes motivos, torna-se importante considerar a gestão integrada dos recursos hídricos com vista para alternativas de uso racional e planejada em perímetros irrigados, envolvendo não apenas a água superficial, mas também o conjunto das águas subterrâneas disponíveis e as águas residuárias tratadas para produção agrícola e outras atividades como: pecuária e caprinovinocultura.

#### ***3.1.3.1 Utilização de efluentes para fins de irrigação***

A agricultura irrigada depende inteiramente da disponibilidade ou alocação específica de recursos hídricos, de modo que sem água para este fim a atividade deixa de existir. A realidade é que as vazões demandadas pela agricultura irrigada já apresentam conflitos com o abastecimento humano. A água anualmente consumida por um hectare seria suficiente para abastecer mais de 100 pessoas consumindo 250 L/dia, dependendo da região e produção das culturas irrigadas (FERNANDES *et al.*, 2008).

Nesse contexto, segundo Brahim-Neji, Ruiz-Villaverde e González-Gómez (2014) a reciclagem de águas residuárias é considerada como uma estratégia viável diante das varias opções disponíveis para uma melhor utilização dos recursos hídricos. A reutilização de águas residuárias tratada em perímetro irrigado tem sido utilizada no Perímetro Irrigado Cebala, na Tunísia (ANANE *et al.*, 2012). A utilização em perímetro irrigado de práticas de reutilização de águas residuárias pode levar a grandes benefícios do ponto de vista econômico, agrícola e ambiental, particularmente em zonas áridas e

semiáridas, uma vez que ajuda a reduzir os custos ambientais da descarga não tratada ou parcialmente tratadas de Estações de Tratamento de Esgotos (ETE).

Segundo Anane *et al.* (2012) uma crescente atenção nos últimos 30 anos tem sido dada para uso das águas residuárias tratadas, que de fato tem sido considerado como uma parte valiosa do equilíbrio global dos recursos hídricos da Tunísia. Na Tunísia a terra irrigada com águas residuárias tratada é comumente selecionada e se considera a acessibilidade à ETE. Isso envolve também problemas de drenagem e rede de irrigação, além de vários outros critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais adotados, os quais garantem a escolha local. O Vale Tula, na Tunísia, é atualmente a maior área irrigada do mundo usando água reciclada (BRAHIM-NEJI e TURKI, 2015; JIMÉNEZ, 2005).

Segundo Pedrero *et al.* (2011), o reuso de água já é uma prática em Portugal para irrigação agrícola. Apesar das águas residuárias tratadas para fins agrícolas estarem crescendo em muitos países como em Israel, que possui o maior percentual de recursos hídricos reciclados disponíveis, e na Galiza (Espanha). Existem problemas de rejeição e custo de tratamento (BRAHIM-NEJI *et al.*, 2014). Segundo Bakopoulou, Polyzos e Kungolos (2010) na região de Tessália, na Grécia, os agricultores estavam dispostos a pagar pela água residuárias tratada somente quando os recursos hídricos convencionais não estivessem disponíveis.

### ***3.1.3.2 Águas superficiais no semiárido e o desafio ao atendimento dos usos múltiplos***

No Nordeste brasileiro, o desenvolvimento regional torna-se um desafio no semiárido, onde a água é o recurso natural mais escasso e há uma elevada demanda de usos múltiplos como abastecimento público, irrigação, dessedentação animal e agroindústria. Nesse contexto a açudagem representa um meio de desenvolvimento social e econômico.

A disponibilidade de água no Nordeste corresponde a uns 40% da capacidade nominal de armazenamento dos açudes e barragens existentes. As áreas onde a seca é mais frequente apresentam características que propiciam impactos diferenciados às pessoas afetadas e às atividades econômicas desenvolvidas. Os impactos sendo mais graves para populações mais pobres e pequenos produtores rurais (BRASIL, 2012).

Os maiores impactos sobre os recursos hídricos no Nordeste estão relacionados à redução das fontes de abastecimento nos anos de seca, especificamente em águas armazenadas em açudes de menor porte. Observa-se que em anos normais e em especial nos anos de seca, as instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos não acompanham corretamente o consumo de água nos reservatórios, bem como o reabastecimento realizado durante os períodos chuvosos. Além disso, os açudes de médio e grande porte podem não ser reabastecidos completamente durante o período chuvoso em anos de chuvas normais, assim, podem ficar em condições desfavoráveis de recarga. Nesse contexto, fica prejudicado o atendimento das demandas múltiplas por eles supridas (BRASIL, 2012).

Tais problemas vêm tendo seus efeitos minimizados mediante a política de construção de adutoras destinadas ao transporte de água dos açudes de grande porte para cidades, como é o caso de Sumé que recebe também água da adutora do Congo-PB para fins de abastecimento humano. Portanto, o déficit hídrico é um condicionante fundamental das estratégias agrícolas no Nordeste semiárido.

A agricultura nordestina pode ser discutida segundo duas visões, a agricultura de sequeiro e a irrigada. A agricultura de sequeiro fundamentada no uso da água naturalmente presente no solo, por exemplo, após a infiltração das precipitações, a chamada “água verde”; e a agricultura irrigada, que consiste em captar recursos hídricos para disponibilizar no solo a água necessária ao crescimento das plantas por bombeamento a partir de um açude, a “água azul”. Estas duas formas de agricultura são afetadas pelo déficit hídrico no Nordeste, no entanto, de forma diferenciada, conforme informação abaixo (BRASIL, 2012):

- I. *A agricultura de sequeiro*: possui uma susceptibilidade ao risco climático de curto prazo. Ou seja, ao risco de que as precipitações não sejam adequadamente distribuídas ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta, e na quantidade certa para satisfazer as necessidades hídricas das culturas. Esta prática necessita de estratégias adaptativas (devido às precipitações), investimentos limitados (pelo fato do risco ser elevado) e uma pluriatividade cujo objetivo é a minimização do risco. Os pequenos açudes como na bacia do Rio Sucuru com capacidade de regularização sazonal, poucos (*agricultura de salvação*) ou não usados para a irrigação, têm um papel primordial como

fonte para dessedentação animal e para usos múltiplos (JÚNIOR *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2009).

- II. *A agricultura irrigada*: tem sua demanda de água provida por reservatórios interanuais, os quais conseguem armazenar água de um ano para o outro, reduzindo assim sua vulnerabilidade à sazonalidade do clima. Os pequenos açudes, úteis no suprimento sazonal de água para as pequenas comunidades rurais, dificultam o enchimento dos grandes reservatórios com capacidade de regularização plurianual, como é o caso do reservatório de Sumé, que sofre um impacto direto dos pequenos reservatórios construídos a montante (JÚNIOR *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2009; VIEIRA, 2002; MENDONÇA, 2010). Veem-se então dois modelos de desenvolvimento do meio rural e das atividades agrícolas: de um lado, uma agricultura de sequeiro em todo o meio rural, adaptativa, produtora de bens para o consumo local; e, do outro, uma agricultura de exportação, irrigada a partir de grandes perímetros como na Paraíba o de Sumé, e São Gonçalo, no vale do rio Piranhas com cerca de 2.267 hectares para produção agrícola, que demandam altos investimentos em infraestrutura com manutenção de barragens e canais (DNOCS, 2015).

### 3.1.3.3 *Gestão das águas subterrâneas*

As águas subterrâneas estão sofrendo intensas pressões antrópicas e constante ameaça de poluição. As atividades como a agricultura, a urbanização e a industrialização têm causado a degradação irreversível na qualidade e quantidade das águas subterrâneas, por isso, a gestão de tais recursos, pautada em estratégias sustentáveis, é fundamental em regiões áridas e semiáridas, a exemplo de regiões do Mediterrâneo onde a maioria das demandas de água é atendida por aquíferos porosos por causa de sua quantidade de água armazenada e o baixo custo de exploração BRAHIM-NEJI *et al.*, 2014; BAKOPOULOU, POLYZOS e KUNGOLOS, 2010).

O risco de contaminação das águas subterrâneas depende de três elementos fundamentais: (i) o perigo representado por uma atividade potencialmente poluidora; (ii) a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas para contaminação; (iii) as consequências potenciais de um evento de contaminação sobre as águas subterrâneas. (KAZAKIS e VOUDOURIS, 2015; PATRIKAKI, KAZAKIS e VOUDOURIS, 2012; WANG, HE e CHEN, 2012).

Em estudos na região da Beira Interior em Portugal, o aumento da demanda de água na região, em particular nas zonas áridas e semiáridas, revela o significado dos mananciais de água subterrânea, formados por aquíferos como fontes de abastecimento de água. Muitos aquíferos dessa região são superexplorados devido ao aumento da demanda de água para irrigação agrícola, paisagem e atividades turísticas (PEDRERO *et al.*, 2011).

Os sistemas aquíferos aluviais predominantes em regiões áridas e semiáridas são formações advindas de depósitos de origem quaternária. São depósitos recentes relacionados com o desenvolvimento dos rios e riachos. Os aquíferos aluviais são formados por cascalho, areia siltosa e argilas. Um sistema aluvial pode ser constituído de várias frações granulométricas, com predomínio na maioria das vezes da fração arenosa. Uma das características presente no aquífero aluvial é sua grande variação de dimensão (largura e espessura) ao longo do curso do rio. De modo que é comum encontrar zonas de extrema largura e de estrangulamento alternadas. Esse fator dificulta a avaliação da reserva hídrica acumulada e, por conseguinte, a exploração do mesmo, sendo crucial utilizar ferramentas de gestão de águas subterrâneas pelo fato que em regiões semiáridas como no Nordeste brasileiro os aquíferos aluviais são fontes empregadas na agricultura de pequena escala, principalmente, em período de estiagem (VIEIRA, 2002; ALBUQUERQUE *et al.*, 2015).

## 3.2 METODO DE ANÁLISE MULTICRITERIO

### 3.2.1 Apoio à Tomada de Decisão

Os Sistemas de Apoio à Decisão (DSS) (do inglês: *Decision Support Systems*) representam subclasses de sistemas de gestão da informação que dão suporte aos analistas, planejadores e gestores no processo de tomada de decisão. O DSS é especificamente útil para problemas semiestruturados e não estruturados, onde a resolução é dada por um diálogo interativo entre o sistema e o usuário. Assim, o recurso computacional é o principal aliado do tomador de decisão possibilitando a exploração do problema e aumentando o nível de compreensão sobre o ambiente de decisão através do acesso aos dados e modelos apropriados para a decisão (SHARIFI, 2002).

Nesse contexto, percebe-se que a tomada de decisão está intimamente ligada ao planejamento. Segundo Simon (1960) o processo de decisão envolve as seguintes fases principais:

- I. *Inteligência*: examinar o ambiente para identificar situação-problema ou oportunidades;
- II. *Projeto*: iniciar, desenvolver e analisar os possíveis caminhos de ação, que envolvem aplicação de modelos de decisão para gerar soluções, testar a viabilidade e analisar diferentes alternativas;
- III. *Escolha*: avaliar as opções das alternativas e selecionar o caminho específico da ação.

### **3.2.2 Análise Multicritério no Gerenciamento dos Recursos Hídricos**

Na década de 1960 surgiram as primeiras técnicas de análise multicritério para responder às dificuldades de acomodar as diversas opiniões e a manipulação de grandes quantidades de informações complexas no processo de tomada de decisão (MASADEGHI *et al.*, 2015).

Tal ferramenta vem sendo utilizado na resolução de problemas que envolvem o gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, como Matzenauer (2003) ao utilizar uma metodologia multicritério construtivista de avaliação de alternativas para o planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, e Ramos (2005), que desenvolveu um modelo para outorga de uso da água utilizando a metodologia multicritério de apoio à decisão na bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Sul, em Santa Catarina, incorporando os valores dos atores locais envolvidos no seu processo de gestão. Na Paraíba, Monte (2013) utilizou o método multicriterial e multidecisor para realizar uma análise comparativa do desempenho dos pequenos açudes à montante do açude de Sumé, neste caso utilizou-se o método baseado em relações não hierárquicas, PROMETHEE II.

### 3.2.3 Método de Análise Multicritério e o Sistema de Apoio à Decisão Espacial (SDSS)

Problemas de decisão, cuja componente espacial tem um papel de destaque, normalmente envolvem um grande conjunto de alternativas múltiplas, viáveis e conflitantes; e critérios de difícil avaliação. As alternativas são muitas vezes avaliadas por um número de indivíduos, os chamados tomadores de decisão (gestores, especialistas ou grupos de interesse). Os indivíduos são tipicamente caracterizados pela preferência em relação à importância relativa dos critérios com base em que as alternativas são avaliadas. Assim, o critério constitui-se no padrão de julgamento ou regra com base na qual, decisões e alternativas podem ser avaliadas e ordenadas de acordo com sua conveniência. Nesse contexto, tais problemas de decisão espaciais dão origem à Análise de Decisão Multicritério baseados em Sistemas de Informação Geográfica, *GIS-MCDA* (terminologia decorrente de *MultiCriteria Decision Analysis in Geographic Information Systems*). De antemão, deve-se destacar que o SIG por si só representa um sistema de apoio à decisão, pois envolve a integração de dados referenciados espacialmente em um ambiente de resolução de problemas. Por outro lado, o *MCDA* fornece um rico conjunto de técnicas e procedimentos de estruturação de decisão, bem como avaliação priorizando decisões alternativas (MALCZEWSKI, 2006; COWEN, 1988; MALCZEWSKI e RINNER, 2015).

Desta forma Malczewski (2006) tendo em vista os elementos genéricos de *GIS-MCDA* diferencia três dicotomias:

- I. *Análise de Decisão Multiobjetivo (MODA) e Análise de Decisão Multiatributo (MADA)*: o critério é um termo genérico que remete tanto ao conceito de atributo quanto de objetivo, bem como, o *MCDA* é usado como termo genérico que engloba tanto a tomada de decisão multiobjetivo como a multiatributo. Nos problemas de decisão multiatributo, assume-se um pré-determinado número limitado de alternativas. Já o problema multiobjetivo é contínuo no sentido de que a melhor solução pode ser encontrada em qualquer lugar dentro da região de soluções viáveis, portanto, problemas multiatributo e multiobjetivo são muitas das vezes dados como problemas de decisão discreta e contínua, respectivamente (RIKALOVIC, COSIC e LAZAREVIC, 2014).
- II. *Individual e grupo de tomada de decisão*: havendo apenas uma única estrutura de preferência, o problema referido torna-se um único problema

decisor independentemente do número de pessoas envolvidas no contexto. De outro modo, caso os indivíduos (grupos de interesse) sejam caracterizados por diferentes estruturas de preferências, então o problema é analisado pelo grupo de tomada de decisão. A categoria de grupo de tomada de decisão representa abordagem na decisão participativa.

*III. Decisões com base em certezas e incertezas:* esses dois aspectos dependem diretamente da quantidade de informação sobre o contexto decisório disponível para o tomador de decisão, sendo assim, se o tomador de decisão tem perfeito conhecimento do ambiente decisório, então a decisão é tomada com base em condições de certeza (tomada de decisão fundamentada no modelo determinístico). Em geral, as decisões do mundo real compreendem alguns aspectos que são incognoscíveis, de maneira que essa tomada de decisão é dada com condições de incertezas. Existem dois tipos básicos de incertezas presentes em uma situação de decisão: (i) incerteza associada com informações limitadas sobre a situação de decisão; (ii) incerteza ligada à imprecisão relativa à descrição do significado dos eventos e fenômenos. Além disso, os problemas multiatributo e multiobjetivo sob incertezas podem ser subdivididos em probabilístico (estocástica) e problema de tomada de decisão *fuzzy* dependendo do tipo de incertezas (FEIZIZADEH, JANKOWSKI, BLASCHKE, 2014).

A tomada de decisão por múltiplos critérios apresenta conceitos, abordagens, modelos e métodos que auxiliam a avaliação (expressos pelos pesos, valores ou intensidades de preferência), de acordo com vários critérios, ou seja, os métodos de MCDA são utilizados para auxiliar os tomadores de decisão na resolução de problemas envolvendo múltiplos e conflitantes objetivos. A utilização do SIG permite armazenamento eficiente de informações, o gerenciamento e análise de dados espaciais e não espaciais (HOSSAINA, *et al.*, 2009; LEE *et al.*, 2000). Nesta perspectiva, o *GIS-MCDA* é um ferramental imprescindível na análise espacial, pois permite uma sobreposição de informações de diferentes fontes e formatos em planos de informação espacializados.

Tal ferramenta de tomada de decisão possui sua importância na análise local, bem como, na adequação e desenvolvimento de atividades. As ferramentas geoespaciais podem ser utilizadas para identificar locais com reais potenciais de desenvolvimento de

atividades de agricultura biológica, avaliação e adequação de terras, alocação de recursos hídricos, priorização de barragem, vulnerabilidade de aquíferos e entre outras aplicações. Torna-se então perceptível que as possibilidades de análise e avaliação multicritério integradas em ambiente SIG representam um aperfeiçoamento dos processos de tomada de decisão na solução de problemas de planejamento e gestão de recursos hídricos e, uso do solo (FEIZIZADEH e BLASCHKE, 2011; WALKE *et al.*, 2012; HOENKE, KUMAR e BATT, 2014; MISHRA, DEEP e CHOUDHARY, 2015).

Segundo Chen, Yu e Khan (2010) a avaliação multicritério possibilita a combinação de informações a partir de diversas dados. Sendo assim, o SIG corresponde a ferramenta mais adequada para lidar com uma gama de critérios que envolvem questões espaciais, temporais e escalares, vindos de diferentes fontes. Neste contexto, engloba um conjunto de unidades básicas geograficamente definidas em formato vetorial ou matricial, e assim, com base numa estrutura de classificação caracterizada pela sobreposição dos mapas de critérios e estabelecimentos de um conjunto de pesos de acordo com as preferências do tomador de decisão, são então encontradas alternativas que possibilitam o gerenciamento dos recursos de maneira sustentável.

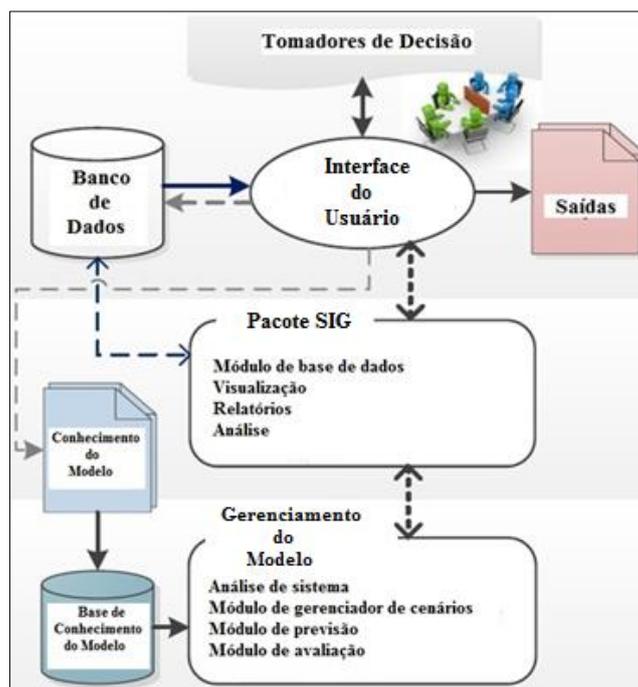
A compreensão da distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço constitui-se atualmente em um grande desafio para elucidação de questões centrais em diversas áreas do conhecimento, seja em saúde, meio ambiente, engenharia, agronomia, geologia, recursos hídricos e tantas outras. Tais estudos vêm se tornando cada dia mais claros e aplicados devido à disponibilidade do SIG, um conjunto de ferramentas baseadas no computador para armazenamento, processamento, combinação, manipulação, análise e exibição de dados geográficos. O SIG, portanto, é um caso especial de gestão e análise de dados geográfico e espacial de variáveis como: população de indivíduos, índice de qualidade de vida, uso dos recursos naturais e outras variáveis. Assim, considerando a natureza espacial dos processos de tomada de decisão, o SDSS foi introduzido no final do século XX com objetivo de aperfeiçoar este processo, de modo a inserir qualidade e melhorar o uso dos recursos disponíveis (LEE *et al.*, 2000; CÂMARA *et al.*, 2004; EISSA, 2013).

Com isso, o SDSS (do inglês: *Spatial Decision Support System*) representa uma combinação das funcionalidades do SIG, técnicas de sensoriamento remoto, modelos matemáticos e funcionalidades do apoio à decisão. Essa combinação proporciona aos decisores uma ferramenta poderosa de modelar, analisar os dados e visualizar

especialmente a saída com base numa árvore de decisão. Segundo Eissa (2013), conceitualmente, o SDSS é um pacote ligado de módulos de *software* que provê um sistema integrado de um conjunto de capacidades, no qual os componentes básicos são: banco de dados, modelo e interface do usuário; além do SIG e um sistema de modelagem integrado em conjunto, caracterizando-se dessa forma como uma tecnologia multifacetada, de maneira que diante da complexidade das questões (critérios e atributos envolvidos), na maioria das vezes é necessário o conhecimento especializado. Para tanto, diante da complexidade das decisões espaciais e incerteza inerente a informação utilizada para o processo de tomada de decisão espacial, faz-se necessário a inclusão de uma gama de técnicas no SDSS (SUGUMARAN e DEGROOTE, 2010).

Conforme Eissa (2013) os componentes fundamentais do SDSS são apresentados abaixo:

- I. *Interface do Usuário*: representa a principal ligação entre os tomadores de decisão e o sistema de decisão espacial. Permite acesso às funcionalidades do sistema, ao banco de dados e possibilita que os tomadores de decisão gerem as saídas necessárias.
- II. *Pacote SIG*: são pacotes de *software*, e corresponde ao SIG em específico que vai ser utilizado como base para o sistema de apoio a decisão espacial, de maneira a auxiliar as funcionalidades referentes a produção, gestão, organização e visualização de dados espaciais.
- III. *Gerenciamento do Modelo*: configura-se como núcleo do modelo analítico, inclui novas características/funcionalidades requeridas para a geração necessária de saídas pelo sistema de apoio a decisão espacial.



**Figura 1** - Componentes do SDSS (Adaptado de EISSA, 2013).

A análise espacial permite mensurar e relacionar propriedades, levando em consideração a localização espacial do fenômeno em estudo de forma explícita. Do ponto de vista do caso de estudo, a utilização do SDSS possibilita identificar estratégias para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos em tempo real, bem como permite a formalização de problemas de otimização dos recursos hídricos (definindo variáveis de decisão, objetivos e restrições) que podem ser resolvidos mediante diferentes técnicas relacionadas com a complexidade do problema de decisão. No intuito de utilizar da melhor forma os recursos existentes, os tomadores de decisão devem estar plenamente conscientes da atual situação, os efeitos e benefícios de suas decisões mediante a visualização de diferentes alternativas e cenários (CÂMARA *et al.*, 2004; COLACECI *et al.*, 2008; EISSA, 2013).

Colaceci *et al.* (2008) citam especificamente dois tipos de problemas de decisão encontrados na gestão integrada da água:

- I. *Problemas de planejamento*: utilização de novas tecnologias visando estratégias em longo prazo e o desenvolvimento de modelos capazes de ser confrontados com futuros acontecimentos imprevistos; e
- II. *Problemas de controle*: estratégias de curto/médio prazo para melhorar os sistemas existentes através da aplicação de todos os conhecimentos disponíveis para a valorização e conservação dos recursos hídricos e solo.

Os problemas de planejamento consideram decisões relevantes quanto à escolha de tecnologias, infraestruturas e definição de usos específicos da terra. Para tanto, as decisões devem ser consideradas dentro de uma estrutura de planejamento (em tempo real) que podem ser: onde instalar uma bomba, local a explorar, que tipo de bomba e sua capacidade, quanto dinheiro alocar para realizar atividades específicas, onde instalar uma estação de tratamento de esgoto, com qual dimensão e o tipo de tratamento (COLACECI *et al.*, 2008).

Já os problemas de controle consideram as categorias de decisões que devem ser tomadas usando também informações em tempo real. São exemplos de decisões de controle para o caso de estudo: definição de padrão de bombeamento, definição de cronograma de irrigação, rotação de culturas, contenção da pluma de aquíferos poluídos. Bem como, identificar as variáveis de decisão, e diferenciar as variáveis de controle e estado. As variáveis de controle são aquelas na qual o valor é controlado pelo tomador de decisão e representam a forma pela qual o sistema global é conduzido externamente. As variáveis de estado são utilizadas para representar o comportamento de um sistema no decorrer do tempo (COLACECI *et al.*, 2008).

Portanto, os objetivos referentes ao problema de decisão representam as intenções desenvolvidas pelas estratégias de planejamento e controle, em consonância com as exigências especificadas pelos tomadores de decisão. Além disso, merecem destaque as restrições, fundamentais para representar limites a serem respeitados ou exigências a serem cumpridas, levando em conta as questões do problema, sejam ambientais, econômicas, sociais, técnicas e outras (COLACECI *et al.*, 2008).

Deste modo, Medeiros e Câmara (2004) apontam pelo menos quatro grandes dimensões dos problemas ligados aos estudos ambientais, com grande o impacto do uso da tecnologia do SIG: *Mapeamento Temático*: destinado a caracterizar e entender a organização do espaço, fundamentado no estabelecimento de ações e estudos futuros. São exemplos de levantamentos temáticos: geologia, geomorfologia, solos e cobertura vegetal. *Diagnóstico Ambiental*: estabelecimento de estudos específicos sobre regiões de interesse, com vistas em projetos de ocupação ou preservação dos recursos naturais. *Avaliação de Impacto Ambiental*: envolve análise dos resultados da intervenção humana sobre os recursos naturais. *Ordenamento Territorial*: objetiva normatizar a ocupação do espaço buscando racionalizar a gestão do território com vistas no processo de

desenvolvimento sustentado. *Prognósticos Ambientais*: antecipar a situação ambiental futura com a implantação de ações necessárias à mitigação dos impactos decorrentes de atividades antrópicas.

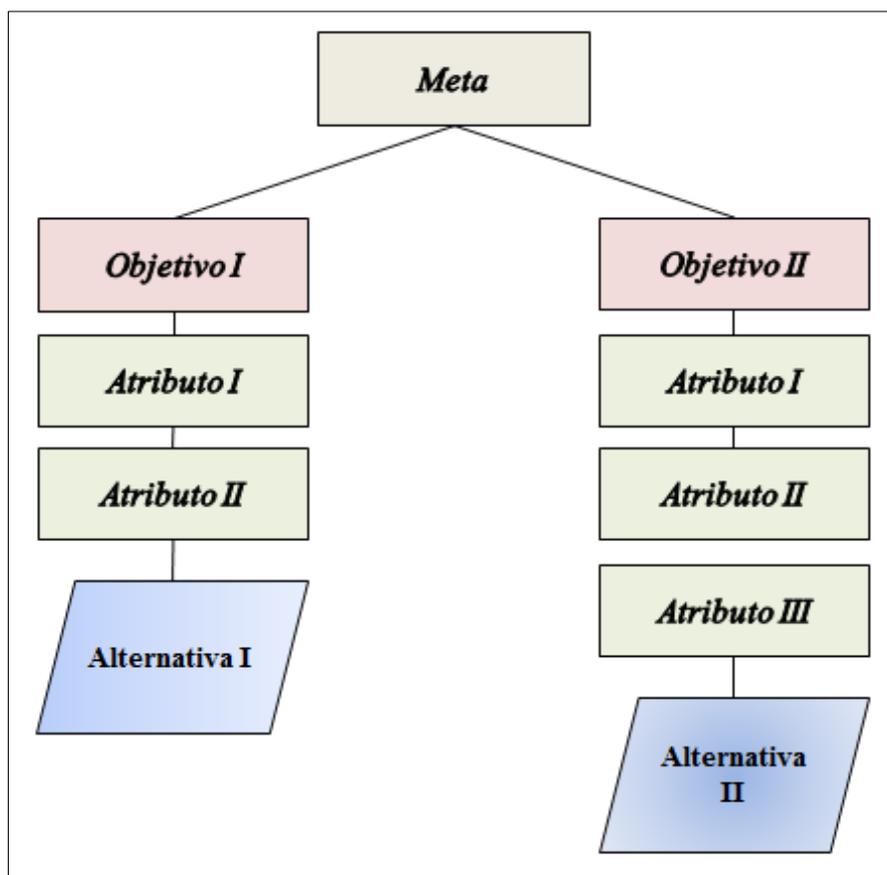
### 3.3 MODELAGEM MULTICRITÉRIO E O PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP) COMO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO COM BASE EM SIG

#### 3.3.1 Modelagem Conceitual da MCDA

Para Mosadeghi *et al.* (2015) a Análise Multicritério de Apoio a Decisão envolve um processo com as seguintes fases: definição de objetivos, escolha dos critérios para medir os objetivos, especificação de alternativas, atribuição de pesos para os critérios e a classificação das alternativas.

Diante da afirmação supracitada observa-se que existe uma relação entre *objetivos* e *critérios/atributos* que configuram uma estrutura hierárquica, de maneira que os objetivos mais gerais estão no nível mais alto. Estes objetivos mais gerais podem ser definidos em níveis mais específicos, inferiores, que são os atributos, indicadores quantificáveis. Assim, observa-se uma abordagem com base em critérios de avaliação, fundamentais para análise de decisão quanto a um conjunto de alternativas (MALCZEWSKI e RINNER, 2015).

Geralmente, segundo Malczewski e Rinner (2015) uma estrutura hierárquica apresenta quatro níveis: meta, objetivos, atributos e alternativas, conforme apresenta a Figura 2:



**Figura 2** - Estrutura Hierárquica do Processo de Tomada de Decisão (Adaptado de MALCZEWSKI e RINNER, 2015).

Um objetivo revela o estado desejado de uma causa, fundamentada nas condições pré-estabelecidas de um ou mais atributos, ou seja, o conceito de um objetivo é operacionalizado com base na atribuição a cada objetivo de ao menos um atributo que direta ou indiretamente mensura o nível de realização. Consequente, chega-se a uma alternativa viável quando são preenchidas todas as restrições contidas nos atributos e, pelo contrário, quando as restrições não são atendidas, obtém-se uma alternativa inviável ou inaceitável (MALCZEWSKI e RINNER, 2015).

### **3.3.2 Processo de Análise Hierárquica (AHP) como método de tomada de decisão com base em SIG**

Atualmente, um dos métodos de tomada de decisão mais utilizados para resolver uma gama de problemas que envolvem critérios complexos em diferentes níveis e onde a interação entre os critérios são comuns é o AHP. Considerando nesse sentido que, em qualquer MCDA os critérios são um reflexo da importância relativa de cada peso, tais critérios precisam ser cuidadosamente selecionados. Assim, este método pode ser

aplicado para ajudar os decisores a fazer comparações de pares entre os critérios de modo a reduzir a carga cognitiva de avaliar a importância relativa dos vários critérios de uma só vez. Diante desse contexto, a aplicação de tal método de tomada de decisão em ambiente de SIG representa uma ferramenta essencial voltada para avaliação e gestão ambiental, quanto ao gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que, configura num desafio multidimensional envolvendo vários aspectos diferentes a serem levados em conta ao mesmo tempo (FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014; SAATY, 1977; MASSEI *et al.*, 2014).

Do ponto de vista agrícola, o método de análise multicritério espacial representa uma ferramenta valiosa para aprimorar as práticas agrícolas. Seja quanto a critérios econômicos ou ambientais, a aplicação correta do *GIS-MCDA* tem o potencial de ajudar a reduzir o custo dos insumos agrícolas, maximizar a gestão dos recursos naturais e aumentar a produtividade. Portanto, a análise integrada da informação espacial para o processo de tomada de decisão tem o potencial de ajudar os agricultores (neste caso de estudo, os irrigantes do perímetro) a utilizarem os recursos hídricos mais adequados com base na alternativa mais indicada para o tipo de cultura praticada (MBÛGWA, PRAGER e KRALL, 2015).

O procedimento do AHP envolve três etapas principais (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008):

- I. Desenvolvimento da hierarquia do AHP;
- II. Comparação de pares de elementos da estrutura hierárquica, e;
- III. Construção de uma classificação por prioridade.

A integração SIG e AHP possibilita resolver problemas de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, pelo fato das alternativas serem representadas em bases de dados de SIG. Cada camada contém os valores de atributos designados para as alternativas, e cada alternativa (seja *pixel* ou polígono) está relacionada com elementos de nível elevado como atributos (BOROUSHAKI E MALCZEWSKI, 2008).

Os métodos de *GIS-MCDA*, como o AHP, fornecem um quadro que pode lidar com opiniões diferentes sobre a identificação dos elementos de um problema de decisão complexo, bem como organizar os elementos em uma estrutura hierárquica e estudar as relações entre os componentes do problema. Portanto, envolve um conjunto de atividades como: definição do problema e estruturação; seleção dos critérios de

avaliação; ponderação de critérios, procedimento caracterizado por introduzir as preferências sobre a importância dos critérios de cada tomador de decisão individual; determinação das preferências individuais; combinação dos julgamentos individuais em uma única preferência coletiva; análise de sensibilidade em relação ao conjunto de critérios de avaliação e alternativas; além da ordenação final de alternativas para que uma alternativa de compromisso seja selecionada (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008, 2010).

### 3.3.3 Modelagem Matemática: AHP e comparação de pares

A determinação do peso dos critérios na análise multicritério é algo fundamental no processo de tomada de decisão. O método matemático AHP possui a finalidade de analisar problemas de decisão complexos. Neste método, os pesos derivam-se a partir de comparações pareadas com base na importância relativa entre cada dois critérios. Ou seja, mediante uma matriz de comparação dois a dois, é calculado o valor do peso ( $w_i$ ) para cada um dos critérios, isso tomando por base o estabelecimento das escalas de importância. Este peso é representado pelo cálculo do autovetor que corresponde à média geométrica das linhas da matriz. Em seguida, há uma normalização, onde a soma dos componentes corresponde a unidade (Equação 1) (CHEN, YU e KHAN, 2010, 2013; THIRUMALAIIVASAN, KARMEGAM e VENUGOPAL, 2003; ISHIZAKA e LABID, 2011; FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014; MISHRA, DEEP e CHOUDHARY, 2015):

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad \text{Equação 1}$$

Assim, Saaty (1990) propõe uma escala de importância para tais comparações (Tabela 1), ou seja, os julgamentos são dados sob a forma de comparações pareadas. Para avaliar os critérios incluídos em um nível comparado com outros critérios incluídos no próximo nível de hierarquia, a pontuação é feita com a utilização da escala de preferências, conseqüentemente, uma matriz de comparação aos pares é criada (SAATY, 1980).

**Tabela 1** - Escalas de comparações pareadas (SAATY, 1980).

Intensidade de importância numa escala absoluta	Definição	Explicação
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem levemente uma atividade em detrimento de outro
5	Forte importância ou essencial	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em detrimento de outro
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida e seu domínio demonstrado na prática
9	Extremamente importante	A evidência favorecendo uma atividade em detrimento de outro é da mais alta ordem possível de afirmação
2, 4, 6, 8	Os valores intermediários entre os dois julgamentos adjacentes	Quando compromisso é necessário
<b>Recíprocos</b>	Se a atividade $i$ tem um dos números acima que lhe são atribuídas, quando comparado com a atividade de $j$ , $j$ em seguida, tem o valor recíproco, quando comparado com $i$	
<b>Racionais</b>	Razão decorrente da escala	Se a consistência estiver sendo forçada pela obtenção de $n$ valores numéricos para abranger a matriz

A utilização de uma hierarquia permite focar um julgamento separadamente em cada uma das várias propriedades essenciais para fazer uma boa decisão. A maneira mais eficaz para se concentrar julgamento é levar um par de elementos e compará-los em uma única propriedade, sem preocupação com outras propriedades ou outros elementos. Portanto, as comparações emparelhadas em combinação com a estrutura hierárquica são tão úteis. As comparações são estabelecidas através da experiência ou treinamento do tomador de decisão (SAATY, 1977, 1980; BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008).

A entrada básica é uma matriz  $A$ , de comparação aos pares, de  $n$  critérios construídos com base em razões da escala de intensidade de importância de Saaty's, da ordem  $n \times n$ , conforme definida na Equação (2):

$$A = [a_{ij}], \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Equação 2}$$

Onde  $A$  é uma matriz com elementos  $a_{ij}$ , e tem geralmente a propriedade de reciprocidade, representada pela Equação 3:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \text{Equação 3}$$

Após ter sido gerada, ela é normalizada como uma matriz  $B$ :

$$B = [b_{ij}], i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Equação 4}$$

$B$  é a matriz normalizada de  $A$ , com elementos  $b_{ij}$ , conforme Equação 5:

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Equação 5}$$

Cada valor do peso  $w_i$  é computado como:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij}}, i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Equação 6}$$

As equações (7), (8) e (9), a seguir, representam as relações entre o máximo autovalor ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) e o autovetor correspondente ( $W$ ) para a matriz  $B$  (XU, 2002; CHEN, YU e KHAN, 2010; FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014):

$$BW = \lambda_{\text{máx}} W \quad \text{Equação 7}$$

Com:

$$W = (w_1, w_2 \dots w_n)^T \quad \text{Equação 8}$$

Temos então:

$$\lambda_{\text{máx}} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nw_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{Equação 9}$$

De modo que  $(BW)_i$  corresponde ao *enésimo* valor para o vetor  $BW$ .

Além disso, torna-se fundamental verificar a consistência da matriz  $B$  após a obtenção dos valores dos pesos. Na aplicação do AHP é preciso que os pesos derivados da matriz de comparação aos pares sejam consistentes. Este é um dos pontos fortes do AHP, o fato de permitir a relação de inconsistência, ao passo que proporciona uma razão de consistência (CR), como um indicador do grau de consistência e inconsistência. A razão de consistência é usada para indicar a probabilidade das decisões/julgamentos inerente da matriz geradas aleatoriamente (SAATY, 1997; CHEN, YU e KHAN, 2010; ISHIZAKA e LABIB, 2011; FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Equação 10}$$

O índice de aleatoriedade  $RI$  é uma constante representada pela média do índice de consistência resultante, obtido para matrizes recíprocas geradas aleatoriamente. Este índice depende da ordem da matriz conforme mostra a Tabela 2, estabelecida pelo *Oak Ridge National Laboratory* para matrizes que vão de uma até quinze linhas (SAATY, 1977, 1980; BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008; ANANE *et al.*, 2012):

**Tabela 2 - Índices de consistência aleatórios.**

n° de critério	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b><i>RI</i></b>	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

O índice de consistência ( $CI$ ) é expresso na Equação 11 (SAATY, 1977; CHEN, YU e KHAN, 2010). Torna-se útil uma medida da inconsistência ligada à matriz de comparação pareada, pois mesmo que vindos de especialistas, os julgamentos humanos em certa medida são imperfeitos ou inconsistentes (BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008).

$$CI = \frac{(\lambda_{m\acute{a}x} - n)}{n - 1} \quad \text{Equação 11}$$

Onde  $n$  representa a ordem da matriz.

A determinação de  $CR$  no AHP é essencial. Tal índice possui o valor limite padrão de 0,10, ou seja, de 10%. Nesse sentido, com  $CR < 0,10$  considera-se que a matriz de comparação de pares tem consistência aceitável e os valores de peso calculado são válidos e podem ser utilizados. Caso contrário,  $CR \geq 0,10$ , isso significa que as comparações de pares são inconsistentes, há necessidade de ajustes dos valores dos critérios, ou seja, uma revisão dos julgamentos (SAATY, 1990; ISHIZAKA e LABID, 2011; CHEN, YU e KHAN, 2010, 2013; BOROUSHAKI e MALCZEWSKI, 2008; AKINCI, ÖZALP e TURGUT, 2013).

O AHP é usado com dois tipos de medições: relativas e absolutas. Em ambos, comparações emparelhadas são realizadas para derivar as prioridades dos critérios no que diz respeito ao objetivo. Na medição relativa, as comparações em pares são realizadas em toda a hierarquia, incluindo as alternativas do nível mais baixo da

hierarquia. Por outro lado, a medida absoluta, corresponde a comparações pareadas também realizadas através da hierarquia, no entanto, com as exceções das próprias alternativas, como no caso de estudo. Assim, o nível acima das alternativas representa qualidades que são refinamentos dos critérios/atributos que regem as alternativas (SAATY, 1990; ISHIZAKA e LABIB, 2011).

Uma comparação par a par das próprias escalas em cada critério, responde a perguntas como: Quanto melhor é um solo com salinidade altamente adequada do que um com salinidade moderadamente adequada? As alternativas não são emparelhadas em comparação, mas simplesmente classificadas como a categoria em que se enquadram no âmbito de cada objetivo. Nesse contexto, um dos pontos fortes do AHP é a possibilidade de avaliar os critérios e alternativas na mesma escala de preferência sejam de forma quantitativa, como qualitativa (SAATY, 1990, ISHIZAKA e LABIB, 2011).

Portanto, a comparação de pares de critérios representa um modo básico de medição utilizado no procedimento de AHP, o processo reduz significativamente a complexidade conceitual do problema com ajuda de uma matriz de preferência, uma vez que apenas dois componentes são levados em conta em qualquer dado momento, assim envolve três fases principais: desenvolvimento de uma matriz de comparação em cada nível de hierarquia, começando de cima para baixo; cálculo dos pesos para cada elemento da hierarquia e a estimativa do índice de consistência (BOROUSHAKI E MALCZEWSKI, 2008; FEIZIZADEH *et al.*, 2014).

Em linhas gerais, a organização das metas, objetivos, atributos e alternativas, partes que compõem uma hierarquia, servem para dois propósitos segundo Saaty (1990):

- Fornecer uma visão geral das relações complexas inerentes à situação; e
- Ajudar ao decisor na avaliação das questões em cada nível quanto a ordem de grandeza, para que possa comparar esses elementos homogêneos com precisão.

### **3.3.4 Aplicação do Método AHP com base em SIG**

O método do AHP tem sido amplamente aplicado para resolver uma gama de problemas que envolvem múltiplos critérios de tomada de decisão. No processo MCDA,

o método AHP deriva os pesos dos critérios, com uma ajuda de uma matriz de preferência onde todos os critérios relevantes identificados são comparados uns contra outros com uma escala de importância relativa. Mediante a matriz de comparação aos pares, é calculado o valor de peso para cada critério. Essa técnica é uma forma de decompor o problema dentro de uma hierarquia de subproblemas que podem ser mais facilmente compreendidos, bem como avaliados subjetivamente, as avaliações subjetivas são convertidas em valores numéricos classificados em uma escala (CHEN, YU e KHAN, 2013; SENER *et al.*, 2010).

Segundo Boroushaki e Malczewski (2008) o método de AHP pode ser empregado dentro do ambiente SIG de duas maneiras. Primeiramente, para obter os pesos de importância associadas com as camadas “mapa critério” (do inglês: “map criteria”). Consequente, os pesos podem ser agregados com as camadas mapa critério de uma forma semelhante aos métodos de combinação ponderada. Esta abordagem citada acima é de particular importância quanto a problemas de decisão espaciais com um elevado número de alternativas que tornam impossível contemplar comparativos emparelhados entre as alternativas. Na segunda forma, o método AHP pode ser usado para combinar a prioridade de todos os níveis da estrutura hierárquica, incluindo o nível representando alternativas. Neste caso, um número relativamente pequeno de alternativas pode ser avaliado.

Nesse contexto, pode-se mencionar alguns estudos onde foram aplicadas tais ferramentas de maneira integrada, considerando *GIS-MCDA*:

- Avaliação de aptidão agrícola baseada em SIG com vista no potencial de agricultura irrigada na bacia de Macintyre Brook em Queensland, Austrália. Uma abordagem multicritério voltada para classes de aptidão adaptada a partir do sistema da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), considerando critérios como condutividade hidráulica do solo, declividade e textura do solo, profundidade do lençol freático e condutividade elétrica ( $C_e$ ) da água subterrânea (CHEN, YU e KHAN, 2010).
- Escolha de bacias de infiltração de águas residuárias tratadas no solo como alternativa para recarga de aquífero na região da Beira Interior em Portugal, mediante análise multicritério baseada em SIG, considerando critérios econômicos (custos de adução e bombeamento), ambientais (áreas protegidas

e vulnerabilidade dos recursos hídricos) e técnicos (características do solo e das águas subterrâneas, profundidade do aquífero, uso do solo, tipo de solo, velocidade de infiltração e outros) (PEDRERO *et al.*, 2011).

- Mapeamento e classificação de locais adequados para irrigação com águas residuárias tratadas no aquífero da bacia hidrográfica Nabeul-Hammamet no Nordeste da Tunísia. O estudo buscou selecionar os locais mais adequados para irrigação com o volume de água disponível da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Foram considerados critérios de aptidão agrícola do terreno como: textura, profundidade e salinidade do solo; critérios de conflito pelo recurso: uso da terra e disponibilidade de água doce; transferência de água tratada e proximidade com a estrada; critérios sociais: distância das áreas residenciais e proximidade dos distritos já irrigados com a ETE; e critérios ambientais: vulnerabilidade intrínseca do aquífero e a qualidade atual do aquífero (ANANE *et al.*, 2012).
- Seleção de locais adequados para gerenciamento de recarga de aquífero na região do Algarve, no sul de Portugal. Tomando como base a gestão e planejamento dos recursos hídricos diante da necessidade de atenuar os problemas relacionados à escassez de água em regiões áridas e semiáridas, com a prática de recuperação dos níveis de águas subterrâneas. Nesse caso, foram considerados critérios de uso do solo, declividade, taxa de infiltração, distância de fontes de poluição em relação às águas subterrâneas, espessura do aquífero e outros (AZIZUR *et al.*, 2012).
- Determinação de terras para uso agrícola no distrito de Yusufeli da cidade de Artvin na Turquia. As atuais terras agrícolas localizadas no centro do distrito serão inundadas, além de três aldeias completamente inundadas e vinte e duas parcialmente inundadas em decorrência de três grandes barragens a serem construídas. Neste caso fez-se necessário estudo para a designação de novas áreas de assentamento em virtude da possível inundação, considerando critérios como: uso da terra, profundidade e propriedades do solo, declividade, grau de erosão, altitude e outros (AKINCI, ÖZALP e TURGUT, 2013).
- Desenvolvimento de um mapa de áreas com suscetibilidade a deslizamento de terra, utilizando nove critérios de avaliação, entre eles: distância a estradas, elevação, declividade, uso da terra, precipitação e litologia, critérios esses que contribuiram para análise da vulnerabilidade de deslizamento de

terra na bacia hidrográfica do Tabriz no noroeste do Irã (FEIZIZADEH, JANKOWSKI e BLASCHKE, 2014).

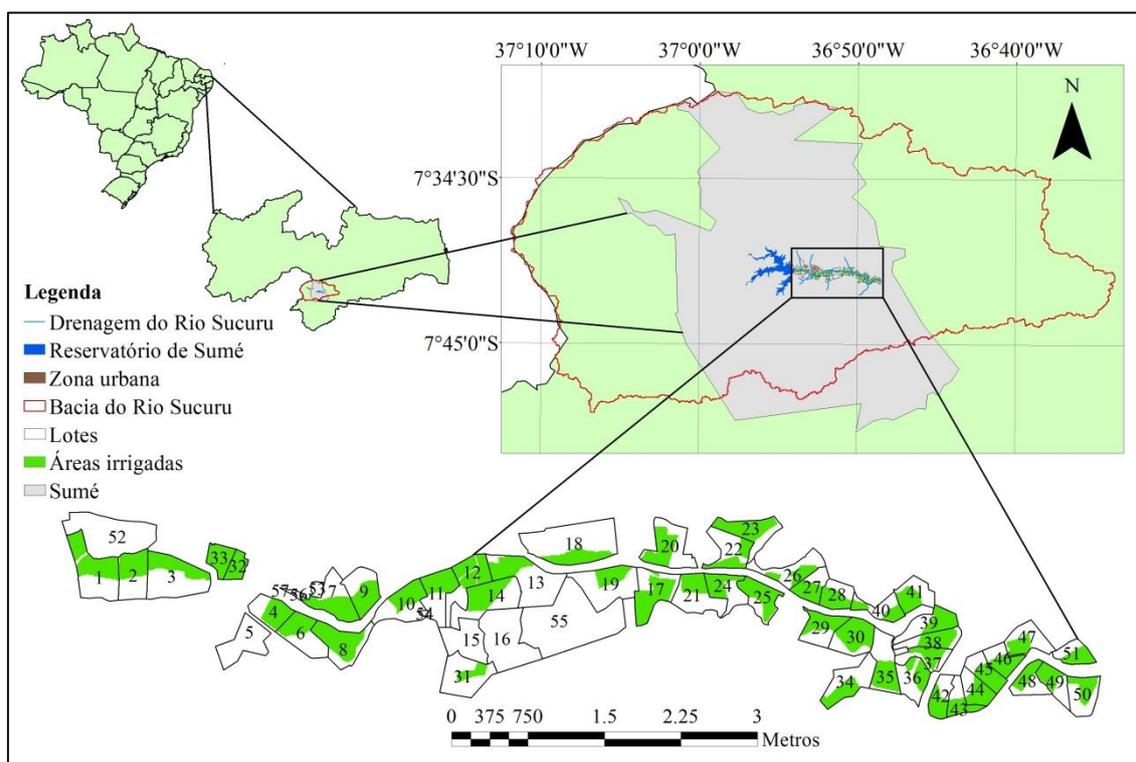
- Aplicação localizada de águas residuárias na província de Perugia, na Itália, provenientes de indústrias de produção de azeite, com vista à gestão do uso do solo mediante sua classe de adequação. Os critérios utilizados foram ligados à vulnerabilidade do solo, altitude, declividade, além das características intrínsecas do solo como: condutividade hidráulica, índice de formação de crostas, pH, matéria orgânica, da distância da empresa produtora de azeite em relação a fontes hídricas e outros critérios (MASSEI *et al.*, 2014).
- Definição da extensão das zonas de uso da terra no cenário de planejamento urbano em larga escala nas duas maiores cidades (Gold Coast e Brisbane) do sudoeste do estado de Queensland, na Austrália. O estudo diz respeito a um conjunto de critérios de aptidão agrícola identificados em dois níveis: critérios principais como existência de infraestrutura, compatibilidade com o uso do solo e proximidade de áreas-chave de recursos; e subcritérios como acesso a estrada, a abastecimento de água, proximidade a indústrias e confiabilidade dos recursos hídricos (MOSADEGHI *et al.*, 2015).

## 4.0 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 REGIÃO DE ESTUDO

O caso de estudo localiza-se na região do semiárido nordestino, no município de Sumé-PB, região essa marcada pela escassez hídrica. O município dista 265 km da capital da Paraíba, com acesso pela BR-412 e situa-se entre as latitudes  $7^{\circ}38'7.19''$  e  $7^{\circ}42'10.25''$ ; e longitudes  $36^{\circ}57'30.90''$  e  $36^{\circ}47'49.72''$ , respectivamente. E possui uma população de 16.784 habitantes e uma área de 838,071 ha. O Perímetro Irrigado de Sumé, distando apenas 2 km da sede do município de mesmo nome, está localizado na zona fisiográfica do estado da Paraíba denominada de microrregião do Cariri Ocidental.

O projeto possui uma área de mais de 830 hectares, sendo que, atualmente, a superfície irrigável corresponde a cerca de 287 ha, com área de sequeiro de aproximadamente 546 ha, totalizando 57 lotes. O perímetro está contido na bacia do Rio Sucuru, que recebe contribuições de dois riachos principais, riacho Pedra Cumprida e riacho Pilões (BRASIL, 2007; MENDONÇA, 2010; DNOCS, 2015).



**Figura 3** - Localização da Área de Estudo - Perímetro Irrigado no detalhe.

### 4.2 CLIMA

O Perímetro Irrigado de Sumé está situado em uma zona onde predomina de maneira quase absoluta o clima semiárido BSh, segundo a classificação de Köppen,

caracterizado pela precipitação anual abaixo de 500 mm, temperaturas elevadas, forte evaporação e pela alternância de duas estações nitidamente determinadas: a das chuvas, também chamada de inverno e a da seca, ou verão. No que diz respeito às precipitações pluviais, elas ocorrem entre janeiro e julho, com maior intensidade nos meses de março e abril. A temperatura média anual é de 24°C, com máxima entre novembro/dezembro e mínima julho/agosto, a umidade relativa média anual é de 57%. A evaporação anual é de 2800 mm em tanque classe A (DNOCS, 2015; CADIER, 1994; ALBUQUERQUE, 2002).

#### 4.3 VEGETAÇÃO

A vegetação nativa do local é a caatinga hiperxerófila densa com trechos de floresta caducifólia e arbustos espinhosos, plantas herbáceas e cactos, bem como apresenta poucas árvores e arbustos esparsos, não apresentando uma cobertura vegetal contínua (BARROS, 2010; ALBUQUERQUE, 2002).

#### 4.4 SOLOS

Os solos fazem parte de um vale encravado geologicamente no complexo cristalino brasileiro, os tipos de solo predominantes são Luvissole Crômico Órtico e Neossolo Flúvico Eutrófico, formado por rochas do tipo granito, gnaiss e gnaiss com veios de quartzo. Os solos da área do perímetro irrigado são em grande parte de origem Aluvial Eutrófico, depositados pelo Rio Sucuru e seus afluentes, não apresentando uniformidade em sua distribuição (EMBRAPA, 2006). Esses solos são considerados aptos para a prática da irrigação em virtude da alta fertilidade natural. Os solos Aluviais Eutróficos são encontrados em áreas de várzeas às margens dos cursos de água, sendo mais evidente às margens do Rio Sucuru. A área do perímetro apresenta uma topografia plana, com ligeiros desníveis, o mesmo acontece no município (JÚNIOR *et al.*, 2009; SILVA, 2006; DNOCS, 2015).

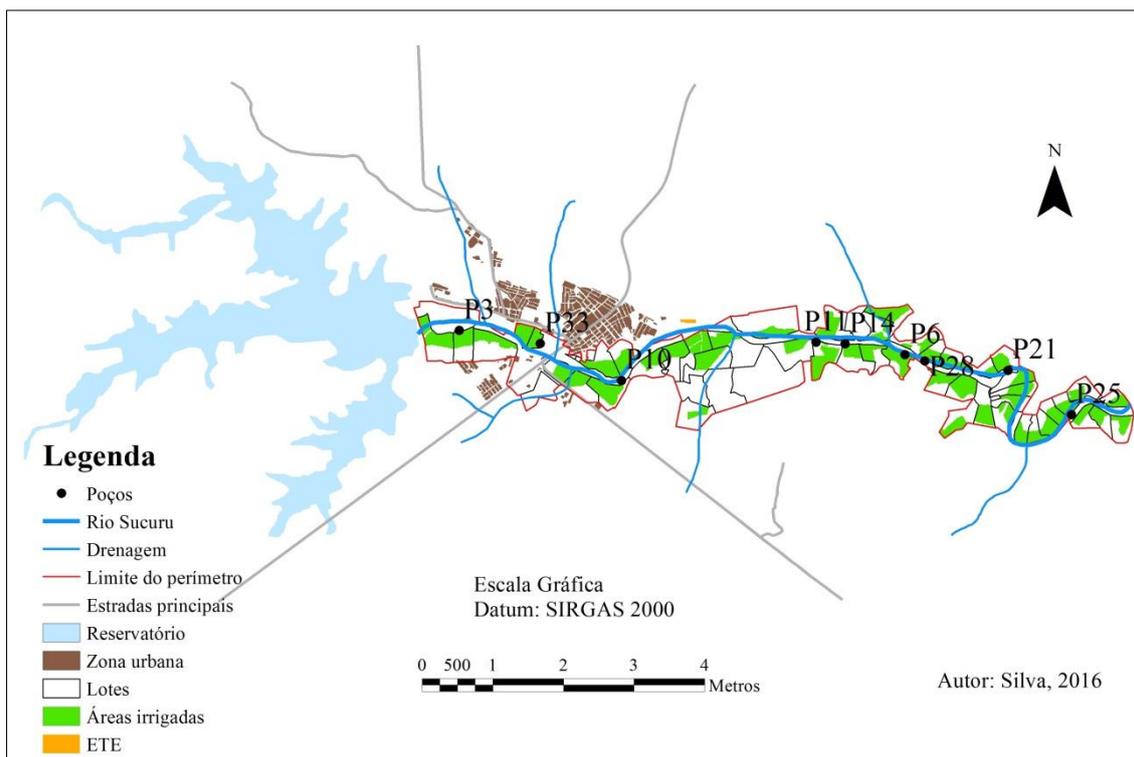
#### 4.5 HIDROGRAFIA

A rede hidrográfica do caso de estudo está contida na bacia do Rio Paraíba, em específico, na Região do Alto Curso do Rio Paraíba e seus afluentes que apresentam características de serem rios intermitentes, como é o caso do Rio Sucuru afluente do Rio Paraíba. Esta região citada, em termos de área, apresenta 6.717,39 km<sup>2</sup>, com uma

densidade demográfica de 12,45 habitantes/km<sup>2</sup>. A Região do Alto Curso do Rio Paraíba localizada na parte sudoeste do planalto da Borborema, faz fronteira ao norte com a bacia do Taperoá, ao sul e a oeste com o estado de Pernambuco; bem como, com a Região do Médio Curso do Rio Paraíba ao leste, e encontram-se fora dos limites do Estado. Nesta região hidrográfica estão inseridos os municípios: Amparo, Barra de São Miguel, Boqueirão, Cabaceiras, Camalaú, Caraúbas, Congo, Coxixola, Monteiro, Ouro Velho, Prata, São Domingos do Cariri, São João do Cariri, São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro, Serra Branca, Sumé e Zabelê. Nesta região, também denominada de 5ª Região Geo-Administrativa onde se localiza totalmente a Região do Alto Curso do Rio Paraíba, estão contidos reservatórios como: Eptácio Pessoa, Sumé, São Paulo, Camalaú, Cordeiros, Campos, São José e Serrote. Na região predomina o Sistema Cristalino, com potencial nulo, permitindo apenas exploração de reservas. Além disso, na região possui áreas aluviais nos leitos dos rios com limitação quantitativa devido às suas dimensões, como a dos Rios Paraíba, Taperoá e, em especial, o Rio Sucuru (PARAÍBA, 2006).

#### 4.6 CASO DE ESTUDO

O perímetro começou a ser implantado no ano de 1970 e somente atingiu sua plena capacidade em 1976. O suprimento hídrico do perímetro no início do projeto era realizado integralmente pelo reservatório de Sumé, que possui capacidade de armazenamento de 44.864.100 m<sup>3</sup> (ver Figura 4).



**Figura 4 -** Área de estudo e a localização das fontes: reservatório, poços e ETE.

No perímetro são produzidos: forragem, feijão, milho, hortaliças (tomate comercial e industrial), frutíferas (melancia, melão e banana) e atividades de pecuária e caprinocultura. O sistema de adução é formado por dois canais principais, o primeiro, mais longo, parte do medidor à jusante da galeria da tomada de água do açude medindo 11,1 km de extensão com vazão projetada de 0,5 m<sup>3</sup>/s. O outro canal encontra-se a margem esquerda do Rio Sucuru e mede 2,9 km com vazão de 0,11 m<sup>3</sup>/s. Os canais secundários foram dimensionados para vazão específica contínua de 1,66 L/s/ha e não possuem revestimento. A rede de drenagem do perímetro é composta por drenos a céu aberto, onde na maioria dos casos correspondem a limite entre os lotes agrícolas. A rede de coletores com extensão de 12,24 km conduz a água de volta ao leito do Rio Sucuru. A rede viária possui estradas principais com extensão 20,5 km e estradas secundárias com 11,5 km (BRASIL, 2007; MENDONÇA, 2010; DNOCS, 2015).

#### 4.6.1 Agricultura

O cultivo de destaque no perímetro foi dado pela produção de tomate industrial e comercial em parceria com a indústria de polpa. Merece destaque a produção de feijão, milho, forragem, pimentão, mandioca e coco em maiores quantidades. Os produtos

cultivados no perímetro irrigado na década de 70 e 80 eram: coco, banana, manga e outras frutas; legumes e hortaliças eram produzidos, no entanto, em menor escala, uma parte para o consumo próprio e o outro para abastecimento do mercado local. Sendo tomate o produto principal, seguido do milho os mais incentivados pelo DNOCS. A área de sequeiro é explorada pela pecuária semiextensiva e criação de ovinos e caprinos, com a criação dos animais soltos nas áreas de pastagem nativa e utilização de restos culturais e forragem em instalações rústicas. Em visita técnica aos lotes do perímetro, constatou-se nas áreas irrigadas o cultivo de hortaliças como tomate comercial, feijão, milho, forragem e frutíferas a exemplo da melancia, melão, goiaba, banana, maracujá e acerola. No entanto, existem lotes nos quais não se pratica nenhum cultivo desde a crise hídrica enfrentada na década de 80, quando foi interrompida a emissão de água pelos canais. Portanto, o que se tem observado são cultivos em menores ou maiores escalas a depender de poços disponíveis e das condições climáticas. O Quadro 1 (ver apêndice deste documento), apresenta quais áreas apresentavam cultivo ou não no momento da visita a campo, informações esta fundamental no processo de tomada de decisão quanto a qual fonte hídrica utilizar (BRASIL, 2007; MENDONÇA, 2010).

Quanto à água dos reservatórios da bacia do Rio Sucuru, a montante do reservatório de Sumé, é utilizada para o plantio de vazante em mais de 50% dos pequenos reservatórios. O plantio é realizado nas margens à medida que estes vão secando. Os principais cultivos do plantio de vazante são as culturas de forrageiras e as de alimentos para subsistência (feijão e milho). A pecuária na bacia do Rio Sucuru consiste numa atividade que apresenta um grande significado quanto ao fator econômico para as famílias desta região, por ser uma atividade praticada com grande intensidade no semiárido paraibano. Um pouco mais de 80% dos pequenos reservatórios são destinados para a dessedentação de animais. O uso dos pequenos reservatórios para piscicultura é o mais expressivo, ocorrendo em 85% dos mesmos, sendo a piscicultura extensiva a mais praticada e ocorre em 60% dos açudes (BARROS, 2010).

#### **4.6.2 Águas Subterrâneas e o Aquífero Aluvial**

As águas subterrâneas geralmente apresentam excelente qualidade devido à sua forma de armazenamento, sendo apta para o consumo humano, muitas vezes empregando somente desinfecção. Essas águas desempenham um papel fundamental no abastecimento público e privado em todo o mundo, sendo uma alternativa de baixo

custo, fácil obtenção e boa qualidade natural, dotada de grande valor econômico (CONCEIÇÃO *et al.*, 2014).

Os sistemas aquíferos aluviais representam uma alternativa de grande valia no semiárido brasileiro seja para uso doméstico, dessedentação animal ou irrigação, uma vez que, em períodos de estiagem a oferta de água superficial torna-se restrita. Segundo Montenegro *et al.* (2003) as águas armazenadas em aquíferos aluviais vêm constituindo a principal fonte de suprimento para o desenvolvimento da agricultura de pequena escala, bem como, da agricultura familiar representando um grande potencial de contribuição para o equilíbrio socioeconômico regional, tais afirmações supracitadas não se distanciam da realidade do perímetro irrigado de Sumé.

A jusante do reservatório de Sumé localiza-se, ao longo do curso do Rio Sucuru, o aquífero aluvial. As larguras dos depósitos aluviais que ocorrem no trecho do perímetro variam entre 100 m e 350 m e as espessuras do pacote aluvial variam entre um mínimo de 0,45 m e máximo de 9,30 m, com uma espessura média de 4,25 m (VIEIRA, 2002). Segundo estudo realizado por Vieira (2002) no Perímetro Irrigado, em seu mapeamento foram levantados 49 pontos de água, na sua grande maioria, cacimbas (escavações rudimentares sem revestimentos de até 3,0 metros de profundidade), desta forma indicando a presença subjacente do aquífero aluvial.

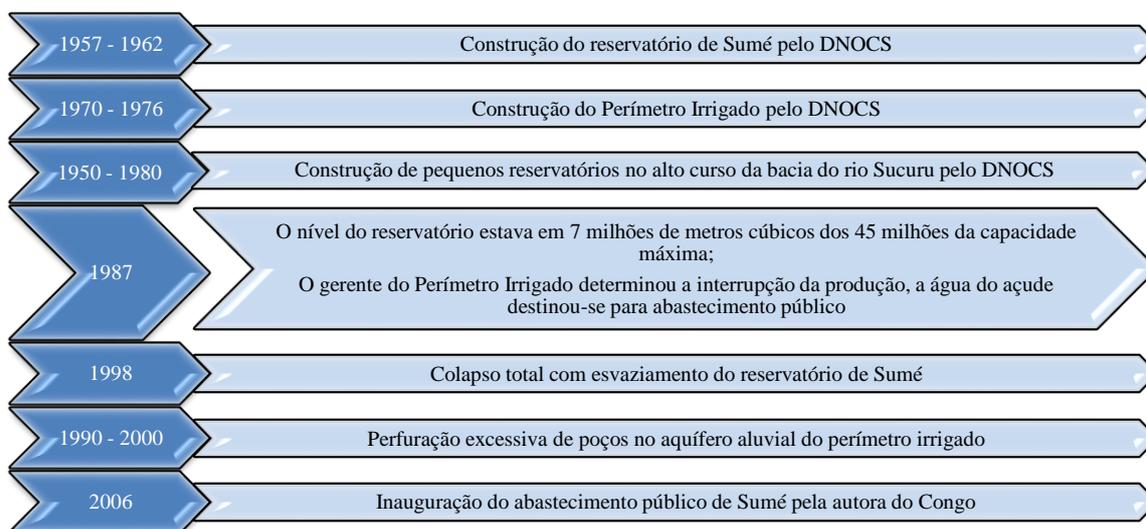
#### **4.6.3 Águas superficiais e gestão das águas de pequenos reservatórios na bacia do Rio Sucuru**

A bacia do Rio Sucuru ocupa aproximadamente 768 km<sup>2</sup>, uma parcela significativa da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. Há quatro municípios que têm suas áreas na bacia, total ou parcialmente: Sumé, Ouro Velho, Prata e Amparo (JÚNIOR *et al.*, 2009). O reservatório de Sumé foi estudado, projetado e construído visando o seu aproveitamento para fins múltiplos de irrigação, abastecimento de água, agricultura de áreas de vazantes e piscicultura, além de parcial controle de cheias (DNOCS, 2015).

Na Paraíba, foram localizados, mediante análise de satélite, aproximadamente 8.000 açudes na região semiárida, sendo que 7.600 açudes dos contabilizados são de pequeno porte. Neles, estima-se que após o período de chuvas são armazenados 2 bilhões e 267 milhões de metros cúbicos, o que corresponde a 60% da quantidade de água armazenada nos médios e grandes açudes (COSTA, 2012; MONTE, 2013).

O município de Sumé tradicionalmente explora a agricultura irrigada. Mas, em virtude das longas estiagens e da falta de planejamento e gestão adequada, o sistema hídrico entrou em colapso, inclusive para consumo humano, o que acabou por trazer grandes problemas econômicos, sociais e ambientais ao município. Em decorrência dos fatores citados acima, os irrigantes situados no perímetro irrigado (a jusante do reservatório de Sumé) passaram a utilizar água subterrânea existente nessa área através da perfuração de poços.

Abaixo a Figura 5 aponta a conjuntura dos recursos hídricos na bacia, com alguns fatos históricos que influenciaram diretamente para atual situação dos recursos hídricos na bacia do Sucuru e perímetro irrigado.



**Figura 5** - Fatos históricos na bacia do Rio Sucuru (MENDONÇA, 2010; GUERRA, 1990; VIEIRA, 2002).

A figura acima apresenta duas informações que influenciaram diretamente no desenvolvimento social e econômico da região, em especial na cidade de Sumé: (i) a construção do reservatório de Sumé e (ii) do perímetro irrigado entre as décadas de 50 a 70, construções essas oriundas do investimento do Governo Federal por meio do DNOCS no Nordeste.

Nesse mesmo curso de investimentos pelo DNOCS, com uma política de assistência aos proprietários de terras a montante do reservatório de Sumé, foram construídos pequenos reservatório em meados das décadas de 50 e 80. O DNOCS, em períodos de seca, mobilizava frentes de emergência para construir barragens e pequenos reservatórios em propriedades. Por exemplo, o Projeto Sertanejo de 1976 financiou a

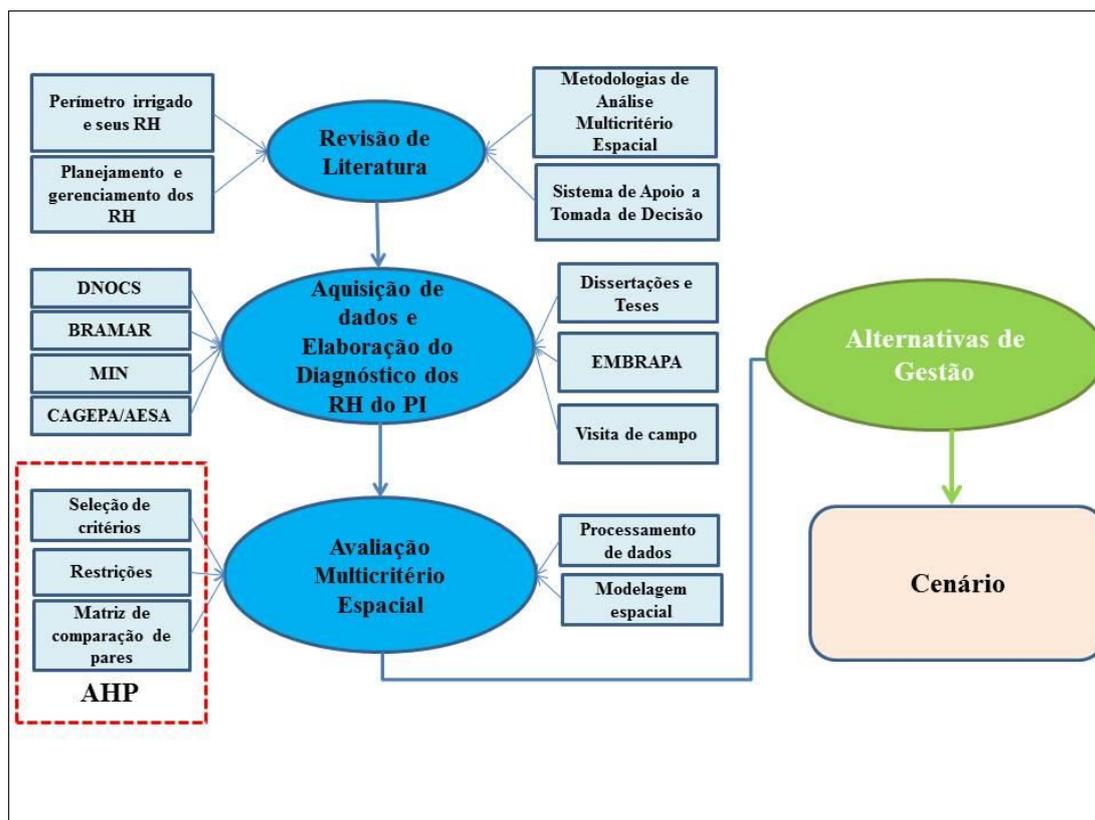
construção de reservatórios com empréstimos rurais que destinava parte do orçamento para esta finalidade. Desta forma, toda a política de construção de reservatórios resultou na obstrução dos fluxos dos afluentes que desaguavam no reservatório de Sumé e em um processo gradativo, patrocinado pelo governo, impedindo cada vez mais que a mesma quantidade de água para que fora projetado se acumulasse ao final dos períodos chuvosos (SILVA *et al.*, 2009; MENDONÇA, 2010).

Nos estudos de Silva *et al.* (2009) os mesmos constataram que a maioria da população usuária dos reservatórios a montante do de Sumé não tinha conhecimento da capacidade de armazenamento dos reservatórios pesquisados, embora quase 100% dos mesmos tenham suas águas aproveitadas. As pessoas consultadas sabiam informar o ano de construção, verificando-se dessa forma que metade haviam sido construídos há mais de 25 anos. Observaram também que a intensa atividade pecuária da região necessita de uma demanda da água dos reservatórios, verificando-se que a dessedentação de animais caracteriza-se como uso principal dos reservatórios investigados, com um percentual de utilização em pouco mais de 80%, vindo grande parte dos rebanhos beberem diretamente no açude.

Na bacia hidrográfica foram construídos no período de 1984 a 1990, 75 reservatórios de pequeno porte, o reservatório público de médio porte Cinco Vacas e o particular de grande porte São Paulo, os quais, somam-se, assim, correspondendo à construção de 77 novos reservatórios num período de seis anos. Em levantamento realizado através de imagens de satélite foram encontrados nesta mesma região 631 espelhos de água distribuídos em 768 km<sup>2</sup>, indicando uma densidade de reservatório em torno de 1 reservatório/km<sup>2</sup>. Tais aspectos influenciaram grandemente no colapso hídrico da década de 90 quando ocorreu o esvaziamento do reservatório de Sumé (SILVA *et al.*, 2009).

## 5.0 METODOLOGIA

A metodologia geral desta pesquisa é representada resumidamente na Figura 6. Abaixo são apresentadas três etapas principais: (i) revisão de literatura, (ii) aquisição de dados e elaboração do diagnóstico dos recursos hídricos (RH) do perímetro irrigado (PI) e (iii) avaliação multicritério espacial, com obtenção de cenários a partir de alternativas gestão de recursos hídricos dentro do perímetro irrigado. O presente trabalho utilizou a Análise Multicritério aliada ao SIG como ferramenta de apoio a tomada de decisão.



**Figura 6** - Fluxograma geral da pesquisa.

Esta sistematização apresentada na Figura 6 possibilitou o melhor desenvolvimento do trabalho nas etapas de aquisição de dados, elaboração do diagnóstico e avaliação multicritério espacial.

Por se tratar de uma análise multicritério, uma das maiores dificuldades para realização do diagnóstico foi adquirir as informações dos diversos critérios utilizados, com os órgãos responsáveis pela gestão e manutenção da água do reservatório e perímetro irrigado, quais sejam: a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), o DNOCS órgão responsável pelo perímetro e reservatório, e a Superintendência de Administração do Meio Ambiente (SUDEMA), pelos dados de qualidade e quantidade da água do reservatório. Além de informações da qualidade da

água residuária proveniente da ETE de Sumé com a Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA).

Outras informações valiosas para o diagnóstico foram coletadas por pesquisadores do projeto BRAMAR (*Brazil-Managed-Aquifer-Recharge*) no perímetro irrigado, a exemplo da qualidade físico-química e microbiológica da água dos poços monitorados, bem como, quantidade da água disponível mediante verificação de níveis estáticos e dinâmicos dos poços contidos no perímetro, em especial no aquífero aluvial. Além de informações de sondagem à percussão (SPT) realizadas no âmbito do projeto, fundamentais para classificação do solo do perímetro.

Avaliação multicritério espacial representa a parte que diz respeito ao método utilizado no trabalho, ou seja, como se chegou aos resultados. Nesse sentido, esta etapa demandou maior tempo para construção do trabalho, pois diante a gama de dados encontrados houve a necessidade de um tratamento estatístico inicial das informações referente aos recursos hídricos disponíveis para o uso, solo e culturas praticadas.

Sendo assim, foram trabalhadas as informações no *software* ArcGIS desenvolvido e comercializado pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Logo após obtenção dos planos de informações em formato vetorial (pontos, linhas e polígonos) e *raster* (matriz de *pixels*), os mapas foram trabalhados com a aplicação do método de análise multicritério espacial AHP. Nesta aplicação, devido aos critérios envolvidos no caso de estudo, fez-se necessário consulta a especialistas para auxiliar na tomada de decisão quanto à adoção dos pesos da escala de intensidade de importância de Saaty (1977).

## 5.1 SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

A tomada de decisão é representada por um processo sistematizado em três fases conforme descrita no item 3.3.1 que possibilita a modelagem e implementação do sistema decisório. Para tanto, com base nos fundamentos de Simon (1960) pode-se realizar uma sistematização e nortear o problema:

*Inteligência:* nesta fase entendemos que a identificação do problema deve ser sistematizada de maneira a permitir uma melhor abordagem pelo sistema de apoio a decisão. Após examinar o caso de estudo (item 4.5) surgiu a seguinte oportunidade:

***Promover no perímetro irrigado de Sumé o gerenciamento integrado da água superficial, subterrânea, água residuárias aliada ao uso do solo e culturas praticadas.***

*Projeto:* os possíveis caminhos apresentado nessa fase são oriundos de consultas a especialistas para melhor sistematizar e encontrar soluções viáveis para o gerenciamento dos recursos hídricos no perímetro irrigado, bem como analisar as diferentes alternativas encontradas. Nesse contexto, partindo dos fundamentos e objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos de que a água é um recurso natural limitado, que a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar o uso múltiplo, da importância de assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, a utilização racional e integrada da água, chegam-se às seguintes alternativas:

**Alternativa I:** estabelecimento de áreas dentro do perímetro possíveis de serem irrigadas considerando a água fornecida pelo reservatório de Sumé.

**Alternativa II:** estabelecimento de áreas dentro do perímetro possíveis de serem irrigadas considerando a água fornecida pelo aquífero aluvial situado no perímetro.

**Alternativa III:** estabelecimento de áreas dentro do perímetro possíveis de serem irrigadas considerando água fornecida pela Estação de Tratamento de Esgoto de Sumé.

*Escolha:* esta fase corresponde à avaliação da viabilidade das alternativas, de modo a entender qual a melhor (ou as melhores). Neste contexto, se estabelece preferências e consideram-se os julgamentos do analista/especialista; para tanto, nesta etapa das escolhas das alternativas, ainda que de forma conceitual pode-se selecioná-las partindo de alguns princípios fundamentais:

- No artigo 1º, inciso III da Política Nacional dos Recursos Hídricos é estabelecido que “em situação de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais”. Sendo assim, a irrigação passa a ser segundo plano, em situações de escassez. Com isso, surge a necessidade de encontrar alternativas para o desenvolvimento da irrigação do perímetro irrigado.
- Em locais semiáridos como na Tunísia, as áreas irrigadas da bacia hidrográfica Nabeul-Hammamet são irrigadas por águas residuárias tratadas advindas de duas estações de tratamento de esgoto, mesmo diante da disponibilidade de água no reservatório superficial e aquífero (ANANE *et*

*al.*, 2012). Observa-se a importância de assegurar o aumento da disponibilidade de água e a redução do impacto ambiental sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Assim, uma das alternativas para este caso de estudo consiste na utilização das águas residuárias como prioridade de uso.

- As águas superficiais em geral correspondem à fonte principal de abastecimento da maioria dos perímetros irrigados do Nordeste criado pelo DNOCS, como é o caso dos perímetros na Paraíba: Engenheiro Arcoverde, São Gonçalo, e em especial, o de Sumé. Para tanto, diante dessa alternativa de uso, merece destaque avaliar até que ponto torna-se possível seu uso como prioritário, uma vez que, a disponibilidade da água representa um aspecto considerável para o gerenciamento da demanda.
- As águas subterrâneas são valiosas em regiões semiáridas. Sua alternativa de uso deve ser fundamentada no ponto de vista que representam reservas estratégicas ou emergenciais. E seu uso está também diretamente ligado à disponibilidade hídrica tanto em qualidade quanto em quantidade das demandas. O excesso de águas superficiais no período de chuvas ajuda a recarregar o aquífero após o período em que foi demandado (na estiagem), quando então o rio estava sem água e a água subterrânea supria as necessidades. A adoção desta alternativa necessita também do conhecimento da qualidade da água.

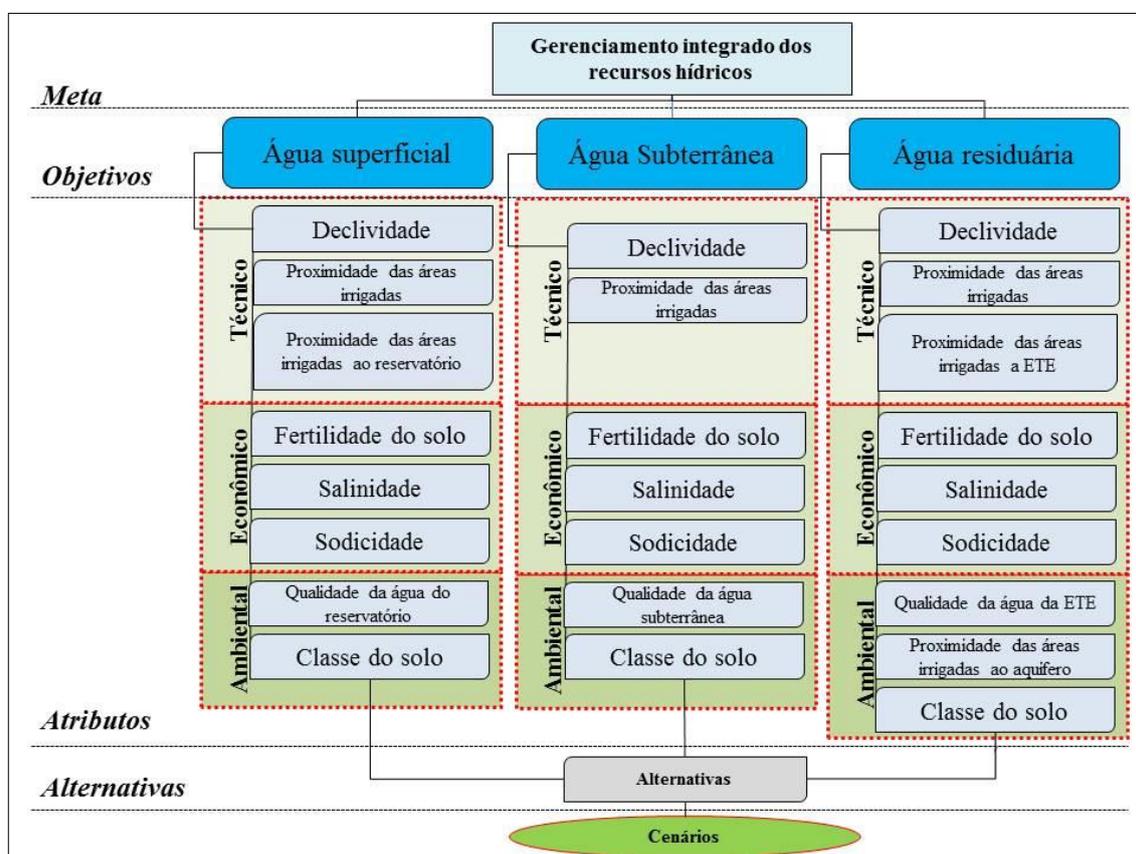
O gerenciamento integrado dos recursos hídricos representa a melhor maneira para resolução dos problemas de escassez dos recursos hídricos no perímetro irrigado. Essencialmente, pelo fato de caminhar em contrapartida com a superexploração de um determinado recurso em detrimento de outro. No entanto, ao considerar o conceito de gerenciamento integrado, torna-se fundamental conhecer a aptidão do solo, pelo fato do caso de estudo ser representado por um perímetro irrigado. A qualidade do solo influencia diretamente na escolha da água destinada para irrigação, bem como no tipo de cultura.

## 5.2 MODELAGEM CONCEITUAL

A obtenção de um modelo espacial de avaliação multicritério depende diretamente da modelagem conceitual das partes que integram o processo de tomada de decisão. Considera-se que as alternativas de decisão são avaliadas com base num conjunto de critérios que envolvem atributos e objetivos. Os critérios devem ser abrangentes e mensuráveis, baseados em propriedades que permitam representar adequadamente a natureza do multicritério da situação de decisão.

Tomou-se por base a metodologia descrita no item 3.3.1, a qual adota uma estrutura hierárquica em quatro níveis para sistematizar e representar o problema de decisão: *meta*, *objetivos*, *atributos* e *alternativas*, de maneira que após obtenção das alternativas, para este caso de estudo, criaram-se os possíveis *cenários*. Em SIG, toda informação é gerada a partir da modelagem conceitual, assim é fundamental descrever o problema com base numa hierarquia que possibilite avaliar os critérios selecionados, partindo do princípio de que um critério representa um termo genérico que inclui os conceitos de objetivos e atributos (RUFINO, 2004; MALCZEWSKI e RINNER, 2015).

Conceitualmente, o problema é estruturado da seguinte forma (Figura 7):



**Figura 7** - Estrutura do problema.

➤ **Meta**

Promover o gerenciamento integrado dos recursos hídricos no perímetro irrigado considerando água superficial, água subterrânea e água residuária tratada.

➤ **Objetivos**

**Objetivo I – Água Superficial:** uso da água proveniente do reservatório de Sumé para abastecimento do perímetro irrigado.

**Objetivo II – Água Subterrânea:** uso da água proveniente do aquífero aluvial de Sumé para abastecimento do perímetro irrigado.

**Objetivo III – Água Residuária:** uso da água residuária proveniente da estação de tratamento de esgoto.

➤ **Atributos (Critérios)**

**A. Irrigação no perímetro por água superficial (Objetivo I):**

*A.1 - Área possível de ser irrigada pela água do reservatório:* identificação da disponibilidade hídrica e qualidade da água para o gerenciamento da demanda.

*Restrições:* Abastecimento do perímetro com adoção de 80% de nível de confiança do reservatório de Sumé para diferentes condições de operação de irrigação, abastecimento de água e vazão ecológica. A adoção da demanda para abastecimento humano é dada com base na outorga concedida à CAGEPA pela Agência Nacional de Águas (ANA), resolução nº 29 de 17 de novembro de 2004 (BRASIL, 2007).

*A.2 - Declividade do Terreno:* A inclinação do terreno influencia o escoamento superficial e erosão do solo, de modo que, se o terreno tem alta inclinação a infiltração será menor. Declividades > 8% são consideradas como inadequadas para produção agrícola, portanto, no que diz respeito à declividade consideraram-se as restrições apresentadas na Tabela 3, abaixo, segundo Chen, Yu e Khan (2010; 2013):

**Tabela 3** - Classe de adequação dos Critérios Técnicos.

<b>Critérios Técnicos</b>	<b>Unidade</b>	<b>Altamente adequada (S1)</b>	<b>Moderadamente adequada (S2)</b>	<b>Marginalmente adequada (S3)</b>	<b>Inadequada (N)</b>
<b>Declividade</b>	%	0 – 2	2 – 4	4 – 8	> 8
<b>PAIR</b>	m	0 – 3000	3000 – 6000	6000 – 7000	> 7000
<b>PAI</b>	m	0 – 150	150 – 250	250 – 350	> 350

**A.3 - Proximidade das Áreas Irrigadas ao Reservatório (PAIR):** A viabilização de irrigação no perímetro por água do reservatório depende de quanto mais próximo forem às áreas irrigadas ao reservatório, considerando os aspectos da necessidade de manutenção da infraestrutura do canal. O sistema de adução atual é formado por dois canais principais, o primeiro, mais longo, que parte do medidor à jusante da galeria da tomada de água do reservatório medindo 11,1 km. Entende-se que para esta restrição as áreas possíveis de irrigação, ou seja, com prioridades de irrigação devem ser  $\leq 7000$  m de distância do reservatório. Neste caso, consideraram-se as seguintes classes de adequação da Tabela 3, com base na necessidade de manutenção ou reparos, mediante análise espacial e visita a campo constatando a distribuição dos canais nos lotes.

Outro fator preponderante para esta análise quanto ao gerenciamento da água nos lotes é a **A.4 - Proximidade entre as Áreas Irrigadas (PAI)**, de forma que quanto mais próximas um das outras, torna-se melhor a tomada e distribuição da água para as culturas. Para tanto, adotou-se com base na análise da configuração do canal, que as áreas altamente adequadas são aquelas  $\leq 150$  m.

**A.5 - Qualidade da água do reservatório:** identificação da qualidade da água do reservatório é de suma importância para definição de usos com base no tipo de cultura e na qualidade do solo.

**Restrições:** Em observação à Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n° 357/2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para enquadramento em classe para níveis de concentração de substâncias químicas e microbiológica: Níveis elevados de condutividade elétrica  $> 3,00$  dS/m inviabiliza o uso para irrigação, além da necessidade de serem observadas as concentrações de Sólido Dissolvido Total (SDT); Em relação a microbiologia da água,

níveis de Coliformes Termotolerantes  $\leq 10^3$  Unidades Formadora de Colônia (UFC) por 100 mL são indicados para cultivo de culturas consumidas cruas, conforme Tabela 4:

**Tabela 4** - Classe de adequação dos Critérios Ambientais.

Critérios Ambientais	Unidade	Altamente adequada (S1)	Moderada (S2) a Marginalmente adequada (S3)	Inadequada (N)
Salinidade da água*	<i>dS/m</i>	< 0,7	0,7 – 3,0	> 3,0
Sólido Dissolvido Total*	<i>mg/L</i>	<450	450 – 2000	>2000
Nitrato**	<i>mg/L</i>	<5	5,0 – 30	> 30
pH*		6,5 – 8,4 (Amplitude normal)		
Coliformes Termotolerantes	<i>Colf./100 mL</i>	$\leq 10^3$ ***	–	–

\* Adaptado de Ayers e Westcot (1985).

\*\* Adaptado de Ayers e Westcot (1985), parâmetro específico para águas subterrâneas.

\*\*\* Culturas consumidas cruas como hortaliças das quais as partes colhidas não estão em contato com solo e frutíferas que desenvolvem rente ao solo e que sejam consumidas com remoção da película (resolução CONAMA 357/2005). Irrigação irrestrita de culturas como raízes, produto lavado (WHO, 2006); em águas residuárias estes valores são aceitos devido ao potencial de rebrotamento dos coliformes.

Os Coliformes Termotolerantes representam um grupo de bactérias, cuja presença no ambiente geralmente indica contaminação fecal, anteriormente chamado de Coliformes Fecais. Outro parâmetro microbiológico utilizado no monitoramento da qualidade de efluentes destinados a agricultura corresponde aos Ovos de Helminhos que segundo a WHO (2006) deve ser  $\leq 1$  ovo por litro para irrigação irrestrita, no entanto, por não haver esta informação no relatório encaminhado pela CAGEPA, não se constituiu este parâmetro objetivo da análise.

**A.6 - Fertilidade do solo:** localização de áreas com melhor aptidão agrícola, mediante análise do solo.

*Restrições:* Observação dos parâmetros químicos que compõem a fertilidade do solo, como *acidez ativa do solo (pH)*, pois as culturas variam muito na sua capacidade de tolerância a tal parâmetro; o pH fornece indícios das condições químicas gerais do solo. Outros parâmetros são valiosos para indicar a classe de adequação do solo, como: nível de *matéria orgânica*  $\leq 0,70$  dag/kg, *cálcio trocável*  $\leq 0,40$  cmol/dm<sup>3</sup>, *magnésio*

*trocável*  $\leq 0,15 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , *acidez trocável*  $\leq 0,20 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , *soma de bases*  $\leq 0,60 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , *acidez potencial*  $\leq 1,00 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , *capacidade de troca catiônica efetiva*  $\leq 0,80 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ , *capacidade de troca catiônica (pH 7,0)*  $\leq 1,60 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ ; estes níveis dos parâmetros correspondem a um solo de baixa qualidade para produção agrícola, ou seja, inadequado. Bem como, merecem destaque os limites de *potássio disponível*  $> 120,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$ , de *fósforo disponível* e *fósforo remanescente*, respectivamente,  $> 30,0 \text{ mg}/\text{dm}^3$  são excelentes, ou seja, altamente adequados para produção agrícola. Além desses citados, outro parâmetro de grande importância quanto à qualidade do solo é a *percentagem de saturação por bases*, valores  $> 80,0\%$  representam um solo com condição muito boa, ou seja, altamente adequado (RIBEIRO, GUIMARÃES e ALVAREZ V., 1999).

**Tabela 5** - Classe de adequação da Fertilidade do Solo, Critério Econômico.

Parâmetros	Unidades	Altamente adequada (S1)	Moderadamente adequada (S2) <sup>2</sup>	Marginalmente adequada (S3)	Inadequada (N)
<b>P</b>	<i>mg/dm<sup>3</sup></i>	$> 30,0$	$30,0 - 20,0$	$20,0 - 10,0$	$\leq 10,0$
<b>K</b>		$> 70,0$	$70,0 - 40,0$	$40,0 - 15,0$	$\leq 15,0$
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		$> 2,40$	$2,40 - 1,20$	$1,20 - 0,40$	$\leq 0,40$
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		$> 0,90$	$0,90 - 0,45$	$0,45 - 0,15$	$\leq 0,15$
<b>H + Al</b>		$> 5,00^1$	$5,00 - 2,50$	$2,50 - 1,00$	$\leq 1,00$
<b>SB</b>	<i>cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup></i>	$> 3,60$	$3,60 - 1,80$	$1,80 - 0,60$	$\leq 0,60$
<b>CTC (t)</b>		$> 4,60$	$4,60 - 2,30$	$2,30 - 0,80$	$\leq 0,80$
<b>CTC (T)</b>		$> 8,60$	$8,60 - 4,30$	$4,30 - 1,60$	$\leq 1,60$
<b>V</b>	<i>%</i>	$> 60,0$	$60,0 - 40,0$	$40,0 - 20,0$	$\leq 20,0$
<b>MO</b>	<i>dag/kg</i>	$> 4,00$	$4,00 - 2,00$	$2,00 - 0,70$	$\leq 0,70$
<b>P-rem</b>	<i>mg/L</i>	$> 30,0$	$30,0 - 21,9$	$21,9 - 15,0$	$\leq 15,0$

Adaptado de Ribeiro, Guimarães e Alvarez V. (1999).

<sup>1</sup>Neste caso, a interpretação destas características nessa classe devem ser consideradas como inadequadas.

<sup>2</sup>Limite superior desta classe indica o nível crítico.

P - Fósforo disponível; Ca - Cálcio trocável; Mg - Magnésio trocável, H + Al - Acidez potencial; SB - Soma de bases trocáveis; CTC (t) - Capacidade de troca catiônica efetiva ( $t = SB + Al^{3+}$ ); CTC (T) - Capacidade de troca catiônica a pH 7,0 ( $T = SB + (H + Al)$ ); V - Índice de saturação de bases; MO - Matéria orgânica e P-rem - fósforo remanescente.

As restrições adotadas neste atributo (Tabela 5) foram adaptadas de Ribeiro, Guimarães e Alvarez V. (1999), em especial quanto à classe *Inadequada (N)* que corresponde à classificação de qualidade muito baixa para os autores no que diz respeito à interpretação da fertilidade do solo em termos de matéria orgânica e complexo de

troca catiônica (fósforo e potássio disponível, cálcio, magnésio, acidez potencial, soma de bases trocáveis, capacidade de troca catiônica efetiva, capacidade de troca catiônica a pH 7,0, índice de saturação de bases e fósforo remanescente). Para o pH considerou-se a classificação química, faixas ideais de pH encontra-se entre 5,5 e 6,5 (GUIMARÃES E ALVAREZ V., 1999; RONQUIM, 2010):

**Tabela 6** - Classe de adequação do pH, Critério Econômico.

Acidez muito elevada	Acidez elevada	Acidez média	Acidez fraca	Neutra	Alcalinidade Fraca	Alcalinidade elevada
< 4,5	4,5 – 5,0	5,1 – 6,0	6,1 – 6,9	7,0	7,1 – 7,8	7,8

**A.7 - Salinidade do Solo:** observação da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo para manutenção de condições adequada para desenvolvimento da cultura.

**Restrições:** Identificação do nível de *Salinidade do Solo* torna-se fundamental para definir qual tipo de água é mais adequado para irrigação local. Níveis de sais anormais na água pode agravar a salinidade do solo. Para tanto, solos salinos são considerados quando a condutividade elétrica do extrato de saturação for  $\geq 4,00$  dS/m, assim valores superiores interferem no rendimento de diversas culturas que não são tolerantes. Nos solos fortemente salinos ( $> 8,00$  dS/m) somente culturas tolerantes produzem satisfatoriamente. Outra restrição determinante ao tratar de irrigação é a *sodicidade* em função do percentual de sódio trocável, onde valores  $> 20\%$  são considerados solos fortemente sódicos (RICHARDS, 1954; AMORIM *et al.*, 2010; CEBALLOS-SILVA e LÓPEZ-BLANCO, 2003; HOUSHYAR *et al.*, 2014). A Tabela 7 descreve a classe de adequação quanto à salinidade e sodicidade do solo:

**Tabela 7** - Classe de adequação dos Critérios Econômicos.

Critérios Econômicos	Unidades	Altamente adequada (S1)	Moderadamente adequada (S2)	Marginalmente adequada (S3)	Inadequada (N)
Salinidade <sup>1</sup>	dS/m	0 – 2,0	2,0 – 4,0	4,0 – 8,0	> 8,0
Sodicidade <sup>2</sup>	%	< 7,0	7,0 – 10,0	10,0 – 20,0	> 20,0

<sup>1</sup>Adaptado de Richards (1954). <sup>2</sup>Adaptado de Massoud (1971).

**A.8 - Textura do Solo:** identificação da textura do solo presente no perímetro irrigado.

*Restrição:* A determinação do tamanho das partículas do solo influencia diretamente o armazenamento, a infiltração e a capacidade de retenção de água. Nesse sentido, solos com textura grossa e com alto teor de argila tornam-se inadequados para produção agrícola com base na irrigação, devido influenciarem negativamente na infiltração de água da superfície para a zona da raiz. Já os solos arenosos, este não conserva água na zona radicular da planta; portanto o ideal são solos de características intermediárias (ANANE *et al.*, 2012).

## **B. Irrigação no perímetro por água subterrânea (Objetivo II)**

**B.1 - Área possível de ser irrigada pela água do aquífero aluvial:** identificação da disponibilidade e qualidade da água do manancial subterrâneo para gerenciamento da demanda.

*Restrição:* Partindo do pressuposto de que a reativação total do referido perímetro com água exclusivamente advinda do aquífero aluvial, é praticamente impossível, torna-se essencial estimar a disponibilidade hídrica do manancial subterrâneo. Para tanto, diante da necessidade de estimar a área possível de irrigar com águas subterrâneas, considerou-se informações de Vieira e Rêgo (2016) que informa o volume de armazenamento mensal do aquífero aluvial de Sumé, com os parâmetros hidráulicos como: condutividade hidráulica (m/s), porosidade (%) e transmissibilidade ( $m^2/s$ ), respectivamente,  $7,87 \times 10^{-4}$ , 10 e  $4,76 \times 10^{-3}$  para efeito da modelagem subterrânea (VIEIRA, 2002). Além de informações de evapotranspiração potencial (BRASIL, 2007).

**B.2 - Qualidade da água do aquífero aluvial:** observação da qualidade da água presente em poços do aquífero aluvial para definição de usos com base no tipo de cultura e solo.

*Restrição:* Quanto às águas subterrâneas, observou-se a resolução CONAMA n° 396/2008 que dispõe sobre classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. No entanto, pelo fato do aquífero aluvial não possuir uma definição quanto à classe de enquadramento, pelo órgão competente, adotaram-se as

informações presente na Tabela 4. De maneira que a condutividade elétrica da água representa um aspecto crucial para esse atributo, pelo fato de níveis elevados de condutividade elétrica inviabilizar o uso da água para tal finalidade; além da observação de níveis de Coliformes Termotolerantes, SDT e pH conforme supracitado também na Tabela 4 (WHO, 2006; AYERS e WESTCOT, 1985).

No tocante aos demais critérios apresentados na Figura 7 para água subterrânea, foram adotadas as mesmas restrições previamente consideradas para água superficial, a saber: declividade, proximidade entre as áreas irrigadas, salinidade, sodicidade, fertilidade e pedologia. Em específico, para o atributo qualidade da água subterrânea, de antemão não se considerou a proximidade das áreas irrigadas aos poços dos quais foram realizadas análises química e microbiológica para efeito da modelagem.

### **C. Irrigação por água residuária tratada (Objetivo III):**

*C.1 - Área possível de ser irrigada por águas residuárias da ETE:* identificação da qualidade da água residuária tratada para gerenciamento da demanda com base nas culturas praticadas e a qualidade do solo.

*C.2 - Proximidade das Áreas Irrigadas à ETE (PAIETE)* configura-se como aspecto pertinente para análise, à distância dos lotes à ETE influencia em questões técnico-operacionais, sendo as principais ligadas ao transporte a partir da ETE e os desafios técnicos ao sistema de bombeamento quando consideradas as áreas irrigada a montante da ETE. De modo que uma área > 3.500 m de distância da ETE é considerada como inadequada para o transporte de água recuperada. Anane *et al.* (2012) também destacam que existe um custo de transferência que incluem adução e bombeamento da estação de tratamento para as áreas irrigadas, observando a diferença de elevação entre os objetos; a distância da ETE reflete no comprimento de tubo e custos referentes de transmitir águas residuárias da origem para o destino.

*C.3 - Qualidade da Água Residuária:* observação da qualidade da água advinda da ETE para viabilização de irrigação no perímetro com base no tipo de cultura e a qualidade do solo.

*Restrição:* As águas residuárias se constituem numa alternativa para irrigação, no entanto, deve-se observar alguns aspectos quanto ao seu uso devido à sua natureza, a exemplo da salinidade, de maneira que valores < 3,00 dS/m são aceitos para irrigação a

dependem do tipo de cultura e qualidade do solo, pelo fato de muitas culturas não serem tolerantes. Outro aspecto relevante é a qualidade microbiológica da água, quanto aos Coliformes Termotolerantes, valores  $\leq 10^3$  por 100 mL são adotados para irrigação irrestrita de culturas consumidas cruas, das quais as partes colhidas não estão em contato com solo; estes valores são aceitos devido ao potencial de rebrotamento dos coliformes em águas residuárias. Em relação ao pH, a amplitude normal deve compreender entre 6,5 e 8,4 para irrigação conforme observado na Tabela 4 (WHO, 2006; AYERS e WESTCOT, 1985).

Para esta alternativa, fez-se necessário considerar a presença do aquífero aluvial presente no perímetro. Devido às águas residuárias possuírem um teor mais elevado de sais e microrganismos em relação às águas superficial e subterrânea, podem aquelas comprometer a qualidade da água do manancial subterrâneo, principalmente, nas áreas irrigadas situadas em cima do aquífero.

*C.4 - Proximidade das Áreas Irrigadas ao Aquífero Aluvial (PAIAA)* representa um critério conveniente, de modo que, quanto mais distantes do aquífero aluvial tornam-se adequadas. Portanto, com base em visita a campo e consulta a especialista em recursos hídricos, foram definidas as seguintes classes de adequação:

**Tabela 8** - Classe de adequação Critério Ambiental.

Critério Ambiental	Unidade	Altamente adequada (S1)	Moderadamente adequada (S2)	Marginalmente adequada (S3)	Inadequada (N)
PAIAA	m	> 250	250 – 150	150 – 50	< 50

### 5.3 MODELAGEM ESPACIAL

Os critérios modelados foram trabalhados de acordo com a disponibilidade de dados da área em estudo e conforme informações levantadas pelo projeto BRAMAR.

A partir da modelagem conceitual, foram definidos quais dados iriam compor o modelo espacial. Para tanto, antes de dar início ao processo de modelagem espacial propriamente dito, foram realizados alguns procedimentos que correspondem à etapa de pré-processamento dos dados. No pré-processamento, os dados encontrados em relatórios do DNOCS, AESA, SUDEMA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), CAGEPA e relatório do BRAMAR foram digitalizados e transformados

em planos de informações espacializadas. O pré-processamento das informações a serem modeladas no SIG é fundamental devido à diversidade de tipologias e fontes de informações envolvidas em qualquer problema de gestão (RUFINO, 2004). Assim, tomando por base as especificações de cada objetivo apresentado no item 5.2, bem como seus critérios/atributos e respectivas restrições, foram desenvolvidos os seguintes modelos, implementados em SIG e representados mediante fluxogramas para cada objetivo traçado.

### 5.3.1 Modelagem espacial da água superficial para irrigação

Com base nas informações disponíveis em relatórios do DNOCS, Ministério da Integração Nacional (MIN), do projeto BRAMAR e informações disponíveis pela AESA, SUDEMA e EMBRAPA, foram definidas mediante consultas aos especialistas em recursos hídricos e em literatura especializada consultada, a importância dos critérios adotados e sua influência direta no gerenciamento dos recursos hídricos do perímetro irrigado de Sumé. Assim, os dados foram selecionados para composição do problema e armazenado em SIG.

A etapa de pré-processamento dos dados demandou um enorme esforço característicos de uma análise multicritério em decorrência da diversidade de tipologias e fontes de informações envolvidas. Para tanto, após o armazenamento dos dados em formatos: *.txt* (textos e documentos), *.dwg* (arquivos de desenho oriundos do CAD) e *.shp* (formato nativo do *software* ArcGIS e atualmente o formato de troca mais utilizado para disponibilização de dados em geoprocessamento) em SIG, os mesmos foram processados conforme demonstrado na Figura 8, através das ferramentas contidas no *software* ArcGIS 10.3.1, em específico, na *ArcToolbox* do ArcMap.

Para possibilitar uma eficiente “álgebra” dos mapas envolvidos, todos os dados foram convertidos para o formato matricial (*raster*). Este formato possibilita a sobreposição dos critérios de forma mais eficiente do ponto de vista computacional, por permitir a análise *pixel a pixel*. Os critérios elencados, após processados, foram transformados em planos de informações *rasters* numa resolução espacial de 10m x 10m e, em seguida, padronizados numa classe de adequação de 1 a 4, onde 1 corresponde a classe *inadequada*, 2 – *marginalmente adequada*, 3 – *moderadamente adequada* e 4 – *altamente adequada*. Após a padronização ou reclassificação, os *rasters*

passaram pelo Processo de Análise Hierárquica que se configura como sendo a MCDA integrada ao SIG.

Os critérios/atributos selecionados, a princípio, e comparados par a par foram divididos em critérios técnicos (CT), critérios econômicos (CE) e critérios ambientais (CA) para uma melhor configuração do problema, da modelagem espacial e da tomada de decisão. O *raster* obtido para cada critério (CT, CE, CA) possibilitou um novo processo de comparação pareada com objetivo de encontrar um novo *raster*, que neste caso, corresponde às alternativas indicadas. Ao encontrar as áreas adequadas para o uso da água superficial torna-se possível a criação de cenários, ou seja, o gerenciamento da demanda, que corresponde à tomada de decisão por parte do analista ou órgão competente.

Merece destaque a obtenção do *raster* que contém as informações da fertilidade do solo. Para obtenção do mesmo, aplicou-se o AHP tendo em vista o número elevado dos parâmetros que compõem a informação conforme observado na Tabela 5, e a importância relativa de cada parâmetro no contexto da fertilidade do solo. Fez-se necessário então uma divisão dos parâmetros para melhor processamento do modelo espacial, assim, os parâmetros foram transformados em Indicadores Químicos de Qualidade do Solo, ou seja, agrupados em três classes de indicadores: quanto *os processos do solo ou de comportamento* ( $I_1$ ); *a capacidade do solo de resistir à troca de cátions* ( $I_2$ ) e os que indicam *as necessidades nutricionais das plantas* ( $I_3$ ) (GOMES e FILIZOLA, 2006).

A Figura 8 apresenta um fluxograma com as informações referente ao *GIS-MCDA*:

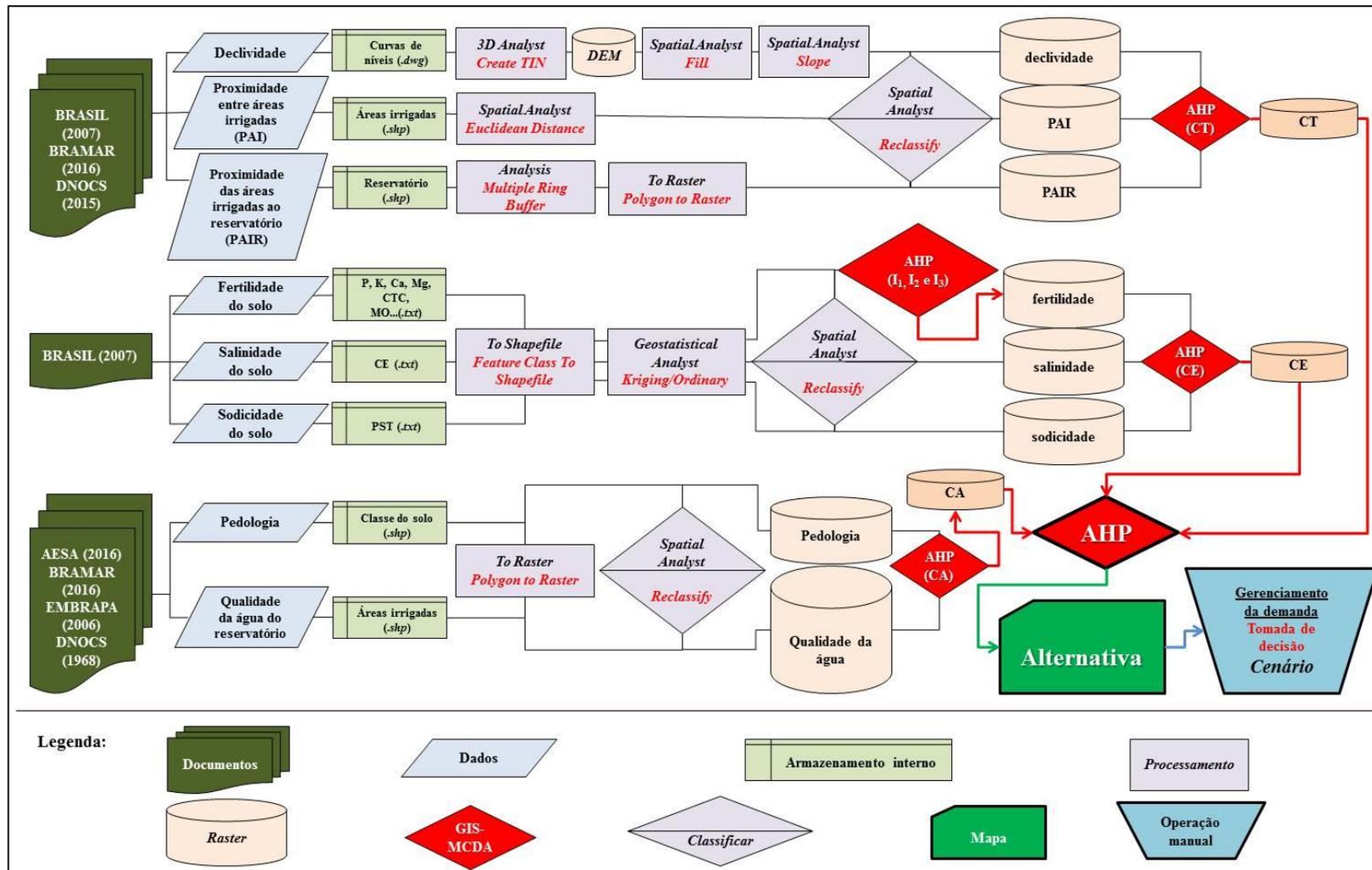


Figura 8 - Modelagem espacial, irrigação com água superficial.

A utilização do AHP em SIG para o caso de estudo deu-se com base em princípios estabelecidos por Marinoni (2004), onde o processo de análise hierárquica é realizado através da extensão do AHP no ambiente do ArcGIS (*extAhp20*). Nesse contexto, segundo Marinoni (2004), Marinoni *et al.* (2005) e Srdjevic, Bajcetic e Blagojevic (2010), para então aplicação do processo, são fundamentais as seguintes etapas para obtenção do mapa de adequação, que corresponde a alternativa, conforme apresentado também na Figura 8:

- Criação de um conjunto de dados *rasters* que representam os critérios, obtidos mediante técnicas de geoestatística espacial como interpolação e conversão de dados vetoriais para *rasters*;
- Reclassificação do conjunto de *rasters*;

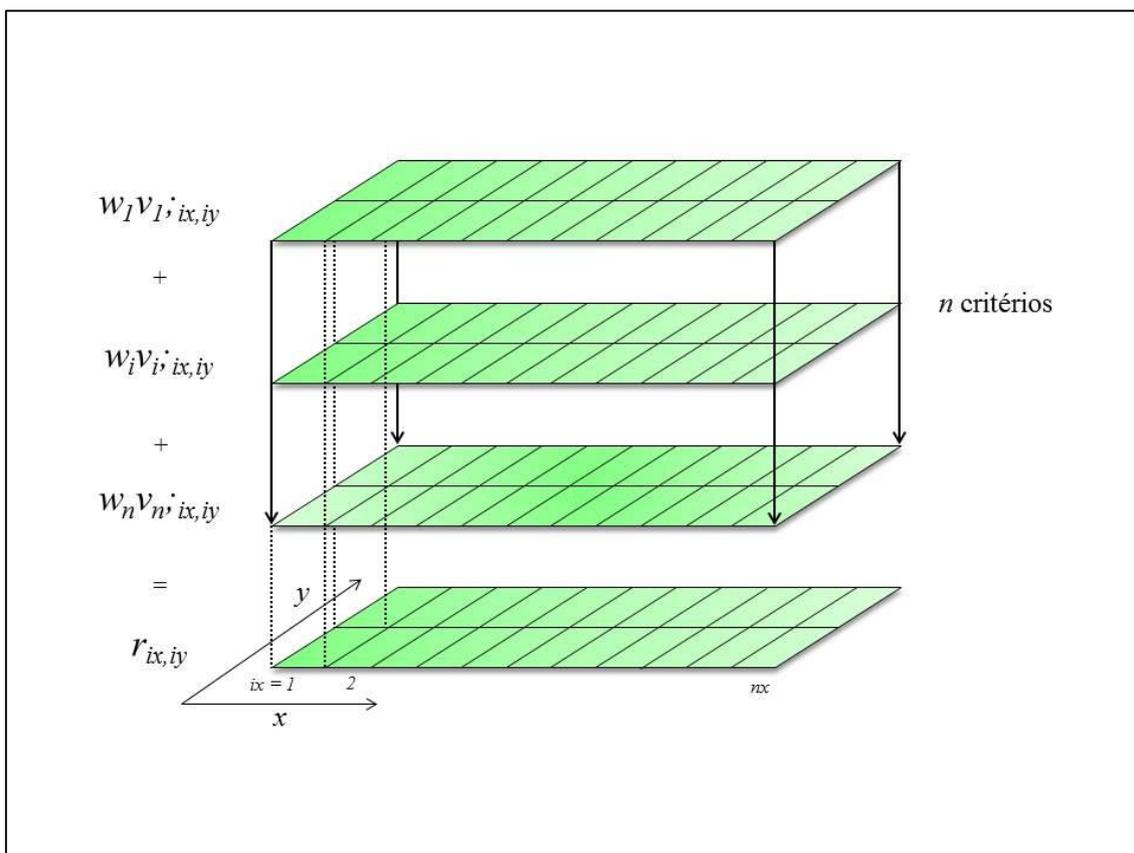
Em seguida, aplicação do processo *GIS-MCDA*,

- Estabelecimento da matriz de preferência com atribuição de valores conforme escala de intensidade de importância dos critérios;
- Determinação do peso dos critérios a partir do cálculo de autovetores e autovalores da matriz de preferência;
- Cálculo do *raster* resultante mediante uma soma ponderada do conjunto de critérios. Neste caso de estudo, o *raster* resultante corresponde à alternativa, ou seja, um mapa de aptidão.

Em específico, segundo Marinoni (2004), para este último ponto apresentado, os *rasters* uma vez classificados são multiplicados pelo seu peso correspondente e, conseqüentemente, somados. O elemento fundamental para o estabelecimento deste processo é a célula, neste caso, foram utilizados de 10m x 10m em todos os *rasters*, calculados conforme Equação 12 a seguir:

$$r_{ix,iy} = \sum_{i=1}^n w_i v_{i;ix,iy} \quad \text{Com } ix = 1 \dots nx; \quad iy = 1 \dots ny \quad \text{Equação 12}$$

Onde:  $r_{ix,iy}$  – é o valor resultante do *raster* na célula  $(ix,iy)$ ;  $w_i$  – peso do critério  $i$  ( $i = 1 \dots n$ , com  $n$  sendo o número total de critérios a ser considerado);  $v_{i;ix,iy}$  – valor da classe de adequação para o critério  $i$  na célula  $(ix,iy)$ ;  $nx, ny$  – número da célula do *raster* na direção  $x$  ( $nx$ ) e  $y$  ( $ny$ ), conforme demonstrado na Figura 9 abaixo:



**Figura 9** - Combinação ponderada dos *rasters* de critérios (Adaptado de MARINONI, 2004).

Para que a soma ponderada dos critérios ocorram, as células devem conter as mesmas dimensões para evitar possíveis erros na aplicação do processo no SIG.

### 5.3.2 Interpolação por Krigagem na composição do mapa de Fertilidade do Solo

Na literatura, autores como Souza *et al.* (2010) e Neto *et al.* (2011) mediante a geoestatística realizaram análises espaciais de parâmetros da fertilidade do solo, conforme os mencionados na Tabela 5 e 6. Nos referidos estudos foram aplicadas a *Krigagem*, técnica de interpolação fundamentada na estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial, adotando o conceito de variável regionalizada referente aos parâmetros mencionados.

A *Krigagem* foi desenvolvida para solucionar problemas de mapeamento geológico, no entanto, expandiu-se especialmente para mapeamento de solo e mapeamento hidrológico. Além disso, seu uso configura-se por fornecer, em média, uma estimativa não tendenciosa e com variância mínima. Ou seja, em média a diferença

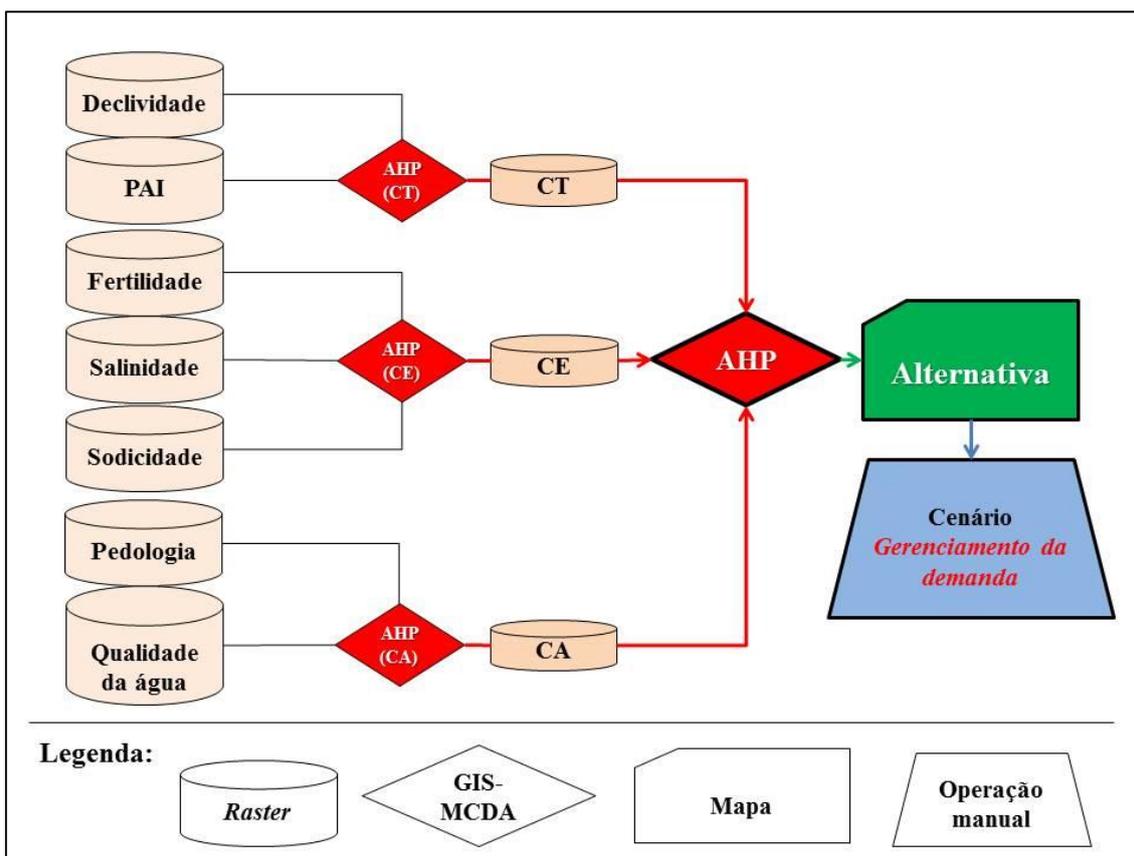
entre valores estimados e observados para o mesmo ponto deve ser nula (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004).

Sendo assim, diante da disponibilidade dos parâmetros supracitados, para o caso de estudo em relação aos *rasters* que compõem a Fertilidade do Solo, aplicou-se a Krigagem Ordinária considerando uma transformação do tipo logarítmica para possibilitar variações mais constantes ao longo da área de estudo e os dados mais perto de ser distribuídos normalmente. Com base na observação dos mapas de semivariogramas de superfície obtidos com o modelo de ajuste esférico dos parâmetros citados, observavam-se as direções de maior e menor variabilidade espacial dos parâmetros em estudo. Uma característica peculiar dos elementos da natureza é a sua variabilidade ou distribuição espacial que ocorre mais intensamente numa direção em relação à outra. Ou seja, é pouco provável que o parâmetro se espalhe igualmente em todas as direções em virtude das diferentes condições presentes no meio (CAMARGO, FUCKS e CÂMARA, 2004). Para modelagem dos dados, considerou-se verdadeira a anisotropia devida aos fenômenos naturais, em especial os ligados ao solo.

### **5.3.3 Modelagem espacial da água subterrânea para irrigação**

A modelagem dos critérios para o segundo objetivo, que é promover o uso da água contida no aquífero aluvial, seguiu o mesmo processamento das informações apresentadas na modelagem dos critérios para água superficial. No entanto, desprezou-se o critério da proximidade dos poços às áreas irrigadas pelo fato da maioria dos poços estarem contida dentro das áreas irrigadas, assim, tornou-se desprezível para análise este atributo como critério técnico.

A Figura 10 apresenta os *rasters* utilizados no modelo, para construção das alternativas de gestão:

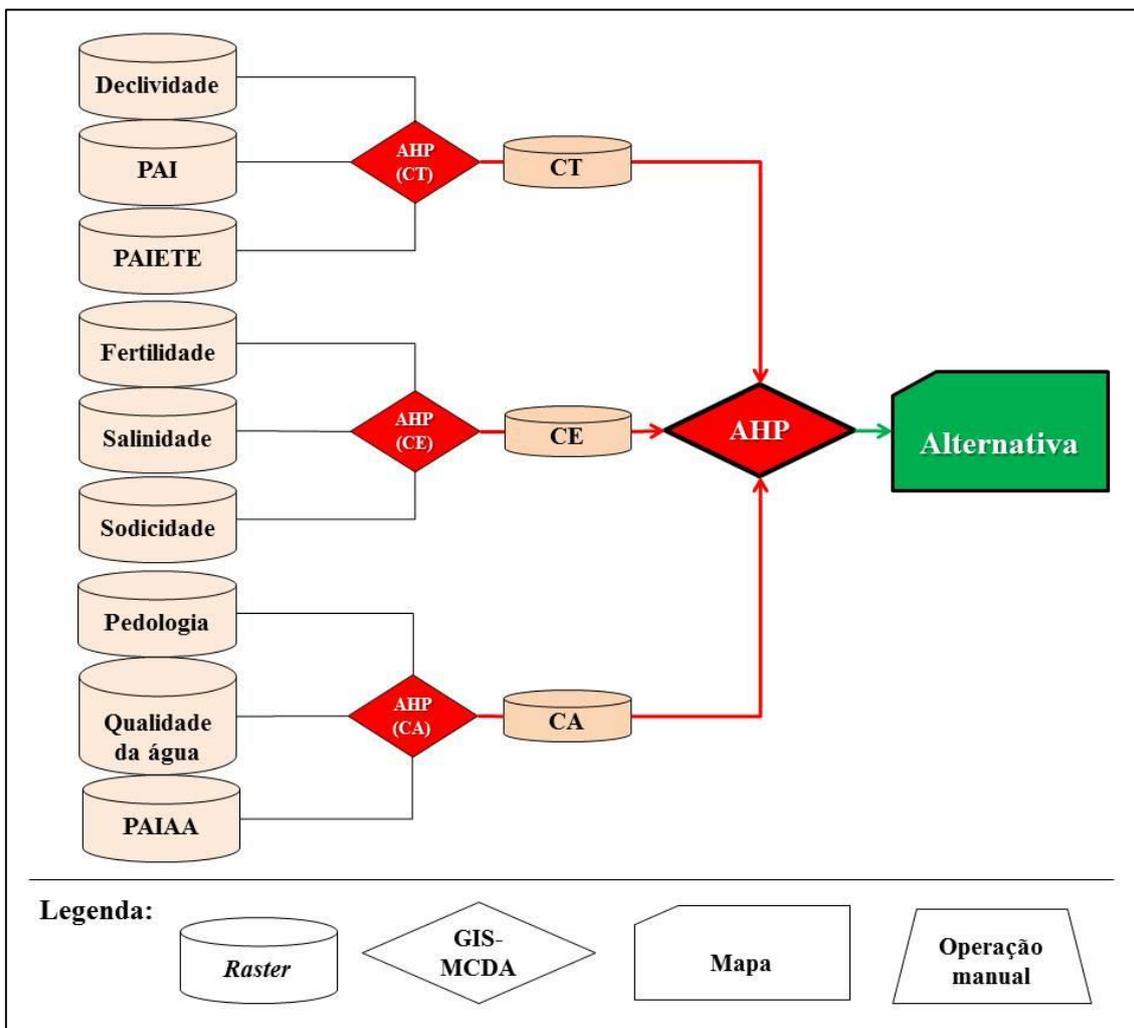


**Figura 10** - Modelagem espacial, irrigação com água subterrânea.

Portanto, como observado na figura acima, para a construção do *raster* CT, considerou-se apenas dois atributos, os *rasters* da declividade do terreno e proximidade entre as áreas irrigadas (PAI). Devido ao fato da distinção dos recursos hídricos utilizado, as comparações entre os CT, CE e CA foram variadas de forma a construir uma realidade para o uso da água subterrânea. Ou seja, a ordem de preferência utilizada quanto ao critério foi diferente da apresentada na água superficial.

#### 5.3.4 Modelagem espacial da água residuária para irrigação

A modelagem espacial dos critérios para água residuária seguiu mesmo princípio referente às águas superficial e subterrânea, no entanto, com adequações em alguns *rasters* devido ao objetivo ser diferente, ou seja, adequado à realidade considerando uma irrigação com água proveniente da ETE de Sumé. Na Figura 11, apresenta-se o modelo espacial multicritério:



**Figura 11** - Modelagem espacial, irrigação com água residuária.

Como observado na Figura 11, para modelagem espacial da irrigação com água residuária, considerou-se um novo critério/raster representado pela *Proximidade das Áreas Irrigadas ao Aquífero Aluvial (PAIAA)*. Esse critério é relevante devido ao fato de possível contaminação das águas subterrâneas por irrigação com água residuária, em decorrência das condições de baixa profundidade do aquífero aluvial e o solo presente.

O raster *PAIETE* corresponde à *Proximidade das Áreas irrigadas à Estação de Tratamento de Esgoto*, construído mediante os possíveis desafios técnicos enfrentados caso ocorra irrigação no perímetro com este recurso. Nesse sentido, foram definidas as classes de adequação com base em visita a campo e consulta a especialistas em engenharia de recursos hídricos, avaliando as dificuldades enfrentadas quanto à implementação da infraestrutura de condução da água residuária.

Por considerar que a água residuária apresenta condições distintas das águas superficial e subterrânea, a construção dos pesos nas matrizes de comparação na *GIS-MCDA* realizou-se de forma distinta, como é o caso na construção do *raster CA* no *AHP*, ou seja, na comparação dos *CE*, *CT* e *CA*.

Por questões de tempo hábil para desenvolvimento de pesquisa e de não haver informações precisas quanto a vazão de esgoto tratada pela *ETE*, para este objetivo, não criaram-se possíveis cenários com base numa relação de disponibilidade/demanda.

## 6.0 DIAGNÓSTICO ATUAL DOS RECURSOS HÍDRICOS E PERÍMETRO IRRIGADO

### 6.1 ÁGUAS SUPERFICIAIS

O diagnóstico do perímetro irrigado é fundamentado na atual situação dos recursos hídricos (superficiais, subterrâneos e de águas residuárias), bem como, aptidão agrícola (seja quanto ao solo ou as culturas atualmente praticadas) no perímetro irrigado, além da observação da atual infraestrutura do perímetro, tendo em vista observância ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Atualmente, a situação do reservatório de Sumé é crítica, conta com 5,5 % da capacidade (informação de 23/09/2016), ou seja, encontra-se no estado de observação pela AESA, com pouco mais de 2,4 milhões de metros cúbicos. Diante desta situação, com base na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) seria ilegal o uso da água para irrigação, tendo em vista o fundamento da referida política que evidencia no artigo 1º, inciso III que “em situação de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação animal”.

Neste contexto, a irrigação do perímetro com águas vindas do reservatório não seria possível. Bem como, considerando que em 1987, quando o reservatório continha apenas 7 milhões de metros cúbicos, o gerente do perímetro irrigado solicitou a interrupção da vazão que alimentava os canais (MENDONÇA, 2010). Para tanto, merece destaque que em 2006, a cidade de Sumé passou a ser abastecida pela adutora do Congo, o que possibilitou ao reservatório, após o colapso total de 1998, recuperar sua capacidade no final da primeira década do século XXI, conforme mostra a Figura 12.

Aspectos a serem considerados, que agravam esta situação, são as retiradas de água excessivas sem planejamento através de caminhões pipas e a prática da irrigação às margens do reservatório, como ocorre em outros reservatórios no Nordeste como o Epitácio Pessoa/Boqueirão-PB (NUNES, GALVÃO e RÊGO, 2016; SILVA, 2015). Atualmente, o perímetro irrigado de Sumé encontra-se desativado quanto ao abastecimento pelo reservatório de Sumé, no entanto, na última década, em meados de 2008, 2009 e 2010 o reservatório atingiu sua capacidade máxima (CANTALICE, 2009; AESA, 2016).



**Figura 12** - Evolução do volume do reservatório de Sumé nos últimos anos (AESAs, 2016).

No entanto, um fator preponderante que inviabiliza a irrigação no atual perímetro é a situação da infraestrutura dos canais que conduz água até os lotes que estão comprometidos. Em boa parte, há obstruções e erosão no canal principal conforme mostra a Figuras 13 e 14:



(13)



(14)

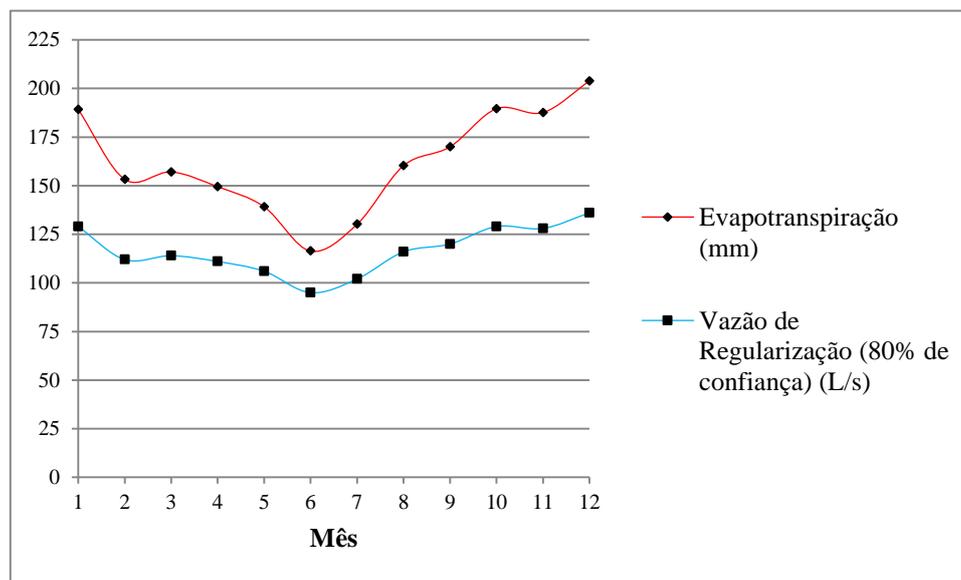
**Figuras 13 e 14** - Obstruções do canal principal que levava águas aos lotes (SILVA, 2016).

Quanto ao aspecto quantitativo da água do reservatório de Sumé, tomou-se por base informações contidas no relatório intitulado “Elaboração de diagnóstico e plano de desenvolvimento do perímetro irrigado Sumé”, Brasil (2007). No qual dispõe informações para estabelecimento da quantificação da área possível de ser irrigada. Os valores de referência da evapotranspiração média mensal na bacia hidrográfica do Rio Sucuru foram determinadas mediante o método de *Penman-Monteith*. Essa informação é de suma importância para o cálculo de vazões afluentes ao reservatório, bem como,

para simulação da operação do reservatório e determinação da sua capacidade de regularização de vazões mensais, isso com base em informações de evaporação em tanque classe “A” obtidos da estação de Ouro Velho-PB. As precipitações mensais na bacia hidrográfica do reservatório utilizadas foram observadas nos postos de Sumé e de Prata, no período de janeiro/1936 a dezembro/1991 (56 anos), precipitações essas ponderadas pelo polígono de Thiessen.

De posse de tais informações torna-se possível estimar área a ser irrigada do perímetro, considerando informações do relatório Brasil (2007), no qual determina as vazões regularizadas do reservatório em diferentes níveis de acumulação e com 80% do risco de não atendimento pleno em um mês qualquer, mediante adoção da série de vazões afluentes de janeiro/1936 a dezembro/1991.

As vazões de regularização mensal do reservatório considerando um nível de confiança de 80% são apresentadas na Figura 15, que diz respeito, tanto às demandas (representada pela evapotranspiração) como às disponibilidades (vazão regularizada).



**Figura 15** - Evolução no decorrer do ano (janeiro/dezembro) da demanda e disponibilidade hídrica.

Portanto, considerando as restrições apresentadas no item *A.1* assegurando a demanda para abastecimento humano com base na outorga concedida à CAGEPA pela ANA de uma vazão de 36,11 L/s (resolução nº 29 de 17 de novembro de 2004) e adoção de vazão ecológica de 5 L/s, a vazão restante deve ser destinada para irrigação no perímetro (BRASIL, 2007). Assim, pode-se com base nas Equações 13, 14 e 15, de

forma simplificada, obter aproximadamente a área possível de irrigação no perímetro (VIEIRA, 2002):

$$V_{ir} = \sum_{i=1}^n Q_{reg_i} \quad \text{Equação 13}$$

$$D_{req} = \sum_{i=1}^n ETp_i \quad \text{Equação 14}$$

$$A_{irrigável} = \frac{V_{ir}}{D_{req}} \quad \text{Equação 15}$$

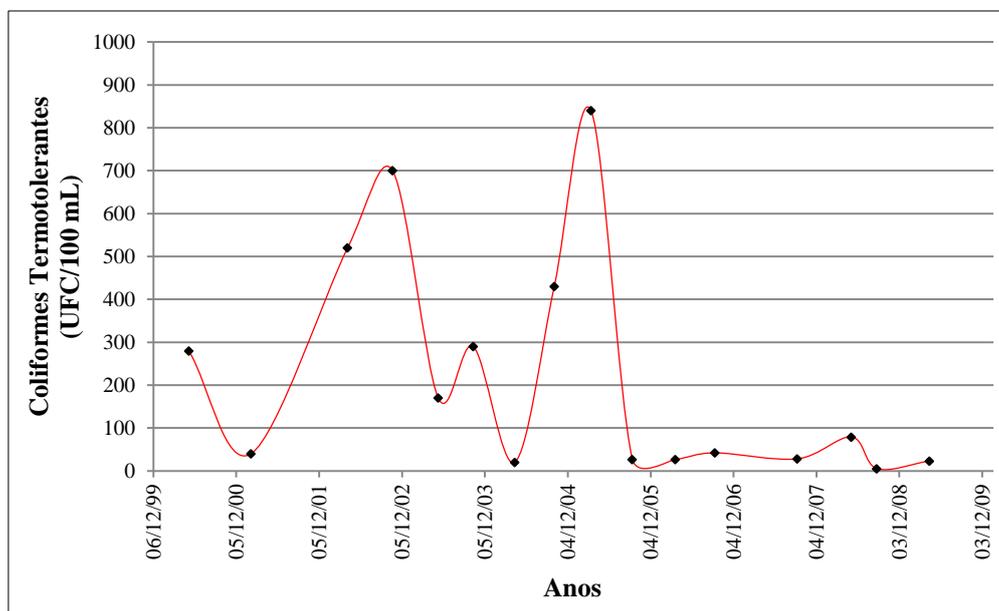
Onde:  $V_{ir}$  – Volume total de água anual disponível para irrigação em  $m^3$ ;  $Q_{reg_i}$  – Vazão de regularizada destinada para irrigação em  $m^3/s$  no mês  $i$ ;  $D_{req}$  – Demanda de água para irrigação em  $m^3/ha$ ;  $ETp_i$  – Evapotranspiração Potencial no mês  $i$ .  $A_{irrigável}$  – Área possível de irrigação em ha.

Sendo assim, mediante essa relação de disponibilidade/demanda, aproximadamente 120 hectares são possíveis de serem irrigados anualmente com águas do reservatório de Sumé, dos 287 hectares de área irrigável disponível.

No que diz respeito à qualidade da água do reservatório de Sumé, ao longo dos anos (em especial entre os anos de 2000 e 2009, com base em dados da AESA e SUDEMA) tem-se observado quanto ao nível de Coliformes Termotolerantes que o mesmo não ultrapassou o limite estabelecido pela legislação vigente, resolução CONAMA n° 357/2005 para águas destinadas a irrigação. Ou seja, os valores mensais estiveram sempre estiveram menor que 1000 coliformes por 100 mL da amostra, considerando o reservatório como Classe 2 (águas doces), que correspondem a águas que podem ser destinadas à irrigação de hortaliças e frutíferas como: melão e melancia. Conforme preconiza também a WHO (2006).

No entanto, observa-se em alguns anos que à medida que o reservatório recebe o aporte de água, como é o caso de outubro de 2004 e março de 2005 tal parâmetro esteve próximo do valor máximo permissível, respectivamente, 700 e 840 UFC por 100 mL da amostra, isto quando o reservatório apresentava uma capacidade em torno de 50%. Após o período de chuvas a tendência do parâmetro é manter-se bem abaixo dos mencionados. Nesse sentido, diante tais informações devido aos baixos valores, a

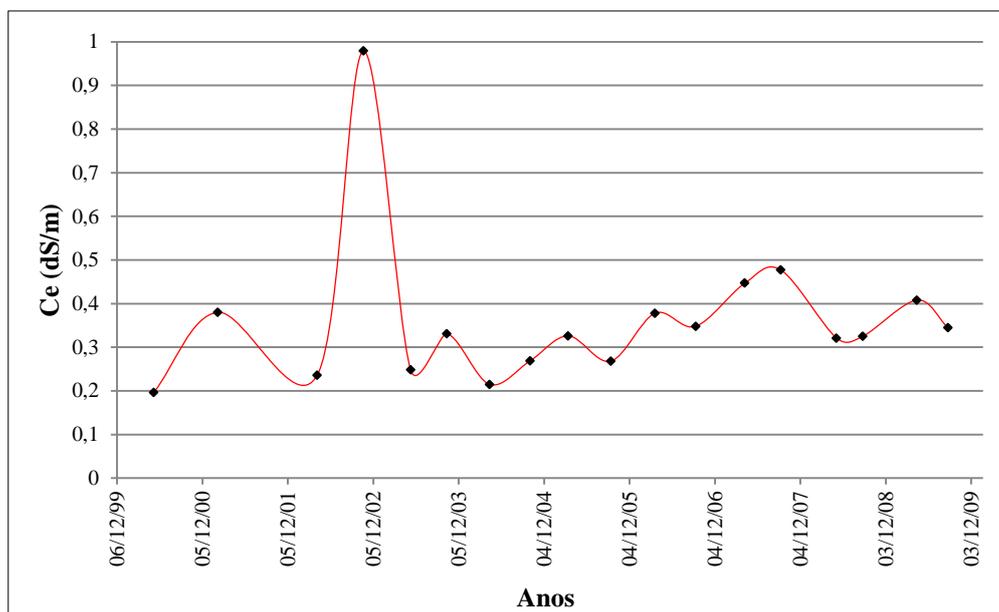
referida água pode ser destinada a irrigação de hortaliças (herbácea ou fruto) e frutas, considerando que em média o valor de Coliformes Termotolerantes encontra-se em torno de 220 UFC/100 mL, com desvio padrão da ordem de 268.



**Figura 16** - Comportamento dos níveis de Coliformes Termotolerantes do reservatório de Sumé (AESA, 2016).

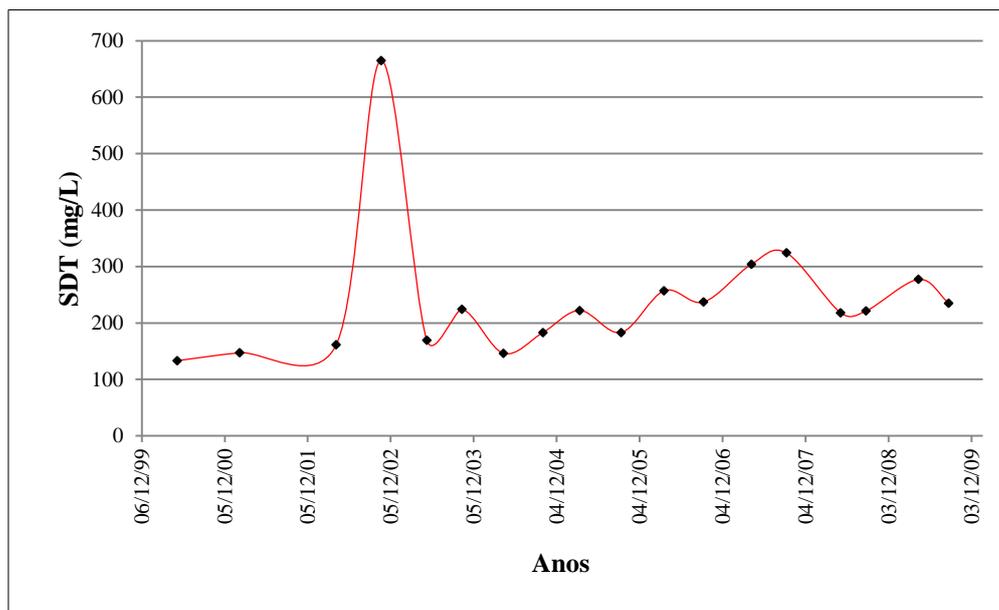
Além do parâmetro microbiológico citado, a condutividade elétrica (Ce) da água do reservatório representa um fator preponderante quanto à produção agrícola no perímetro, em específico para solos semiáridos onde o conteúdo de sal da água de irrigação pode ser elevado devido às condições climáticas (precipitação/evapotranspiração). A Figura 17 demonstra os níveis da condutividade elétrica da água do reservatório no decurso dos anos 2000 a 2009, com análises realizadas em sua maioria no primeiro e segundo semestre de cada ano.

Em linhas gerais os dados demonstram que a Ce ao longo dos anos citados tem sido em média de 0,361 dS/m, com desvio padrão de 0,172 dS/m. Sendo o valor máximo de 0,979 dS/m encontrado em outubro de 2002 quando então o reservatório apresentava 5% de sua capacidade. Nesse contexto, com base nos dados e informação da Tabela 4 que diz respeito ao grau de restrição de uso, não há restrição quanto ao uso da água do reservatório no perímetro irrigado para o referido parâmetro, exceto em situações de baixa capacidade, onde há elevação na concentração de sais, sendo necessário intensificar o monitoramento quanto a esse parâmetro.



**Figura 17** - Comportamento da Ce da água do reservatório de Sumé (AESAs, 2016).

Outro parâmetro de suma importância conforme apresentado na Tabela 4 é a concentração de SDT, as águas do reservatório estiveram abaixo do valor máximo permitido pela resolução CONAMA nº 357/2005 que estabelece um limite de 500 mg/L para águas destinadas a irrigação. Exceto também, para o mês de outubro de 2002 onde o parâmetro atingiu um valor de 665 mg/L. A Figura 18 a seguir demonstra a evolução do parâmetro no decorrer dos anos:



**Figura 18** - Comportamento da SDT do reservatório de Sumé (AESA, 2016).

Com base nas informações, as concentrações de SDT encontram-se em média com valor de 239,2 mg/L, e o desvio padrão de 119,2. Sendo assim, com base nas informações da Tabela 5 de restrição de uso para irrigação, água com valores menores que 500 mg/L para este parâmetro não apresentam nenhuma restrição, ou seja, não há impactos seja no solo ou cultura praticada.

No que diz respeito ao pH, sempre esteve dentro da faixa ideal conforme resolução CONAMA n° 357/2005 para mesma série de anos, apresentado o valor mínimo de 6,96 em março de 2005 e máximo de 8,79 em agosto de 2009. Neste contexto, conforme Tabela 4, apenas este ultimo valor a qual foi citado como valor máximo esteve fora da faixa de amplitude normal.

## 6.2 ÁGUAS SUBTERRÊNEAS

Como bem visto acima, diante da situação atual de defasagem dos canais do perímetro irrigado que impossibilita a condução de água para os lotes pelo sistema, a produção agrícola no perímetro tem sido realizada com a água do aquífero aluvial.

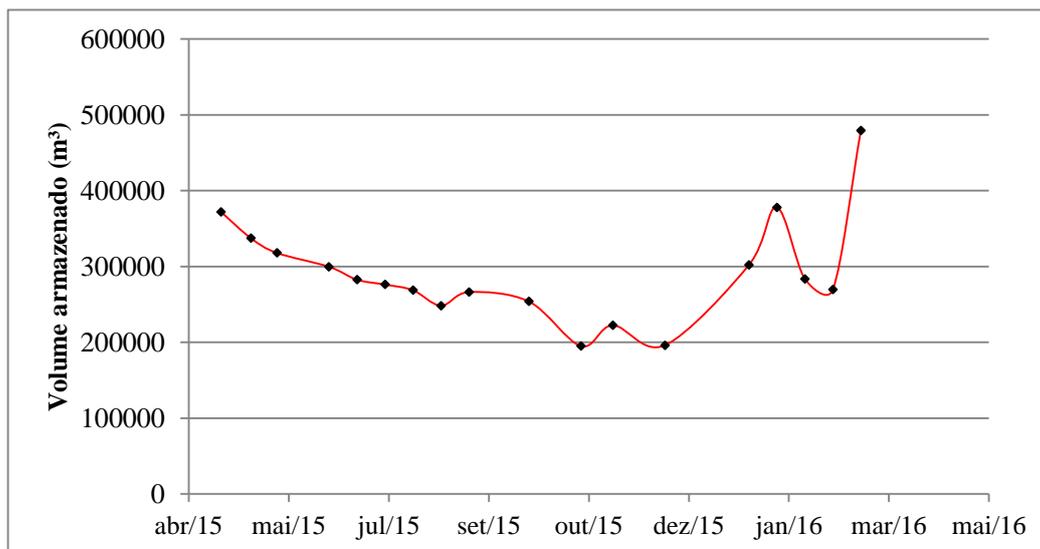
Atualmente, o projeto BRAMAR tem monitorado cerca de trinta e três poços quanto aos níveis estáticos (e em alguns poços nível dinâmico) no aquífero aluvial, sendo nove deles monitorados em relação à qualidade físico-química e microbiológica. A superexploração dos poços torna-se evidente ao acompanhar em visitas técnicas o

aumento dos níveis estáticos no decorrer do tempo. Em alguns casos a exploração já chegou a secar poços.

Diante da situação atual, torna-se fundamental para melhor compreensão e, posteriormente, realização da modelagem espacial a identificação dos poços ativos e monitorados, e as respectivas culturas praticadas no perímetro, tendo em vista que a irrigação está sendo mantida apenas por águas subterrâneas e pelo período chuvoso. Para tanto, a caracterização quanto as culturas praticadas (Quadro 1, ver Apêndice) é essencial para definir o recurso a ser utilizado, pois cada cultura exige parâmetros diferentes sejam microbiológicos ou químicos.

O aquífero aluvial de Sumé, presente no perímetro irrigado possui um valor de armazenamento máximo de 1,36 milhões de metros cúbicos de água, isto considerando uma modelagem realizada com informações de nível freático de 28 poços na área de estudo entre os meses de abril de 2015 e março de 2016. Neste sentido, para estimar a área possível de irrigação com água do manancial subterrâneo e criar os possíveis cenários de uso deste recurso hídrico, utilizou-se da informação quanto ao volume mensal armazenado, que corresponde neste caso de estudo como a disponibilidade hídrica mensal (VIEIRA e RÊGO, 2016).

Para tanto, levou-se em consideração a relação de disponibilidade/demanda semelhante à apresentada na Equação 15. No entanto, considerou-se para este objetivo o volume mensal armazenado de água no aquífero, com exploração de no máximo 80% desta água armazenada no mês, por questões de manutenção da sustentabilidade do manancial subterrâneo.



**Figura 19** - Volume de água armazenado pelo manancial subterrâneo (VIEIRA e RÊGO, 2016).

Sendo assim, considerando uma relação de disponibilidade/demanda, estima-se que anualmente, em média, seja possível irrigar mensalmente aproximadamente 150 hectares do perímetro irrigado com este recurso.

No que diz respeito à qualidade da água subterrânea, considerou-se as análises química e microbiológica realizadas em nove poços representativos, distribuídos ao longo do curso do aquífero aluvial como mostra Figura 4. Para tanto, os parâmetros considerados para este diagnóstico foram os mesmos utilizados quanto à água superficial (Tabela 4) e suas respectivas restrições, além de observar aos níveis de bactérias *Escherichia Coli* e nitrato presente na água dos poços, tendo em vista a disponibilidade da informação.

As análises de água adotadas foram realizadas no âmbito do projeto BRAMAR, correspondente aos meses de julho e agosto de 2016. Os parâmetros químicos foram adotados tendo em vista a resolução CONAMA n° 396/2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Nesta resolução, os parâmetros mínimos obrigatórios a serem avaliados são: Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Coliformes Termotolerantes e Nitrato. Ao observar a resolução supracitada, em específico o Anexo I, ao tratar dos parâmetros citados, não há especificações quanto aos respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP) para irrigação, sendo assim, adotadas informações de Ayers e Westcot (1985).

A Tabela 9 apresenta abaixo, a estatística dos parâmetros Ce, pH, SDT e nitrato dos nove poços avaliados nos meses de julho e agosto:

**Tabela 9** - Estatística descritiva das análises de qualidade da água dos poços (Fonte: projeto BRAMAR).

Mês	Parâmetros	Estatística descritiva				
		Média	Erro padrão	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<b>Julho</b>	<i>Ce (dS/m)</i>	2,47	1,03	3,10	0,79	10,45
	<i>pH</i>	7,76	0,10	0,30	7,37	8,12
	<i>SDT (mg/L)</i>	1699,67	754,63	2263,89	512	7534
	<i>Nitrato (mg/L)</i>	3,42	1,67	5,00	0,01	14,30
<b>Agosto</b>	<i>Ce (dS/m)</i>	2,76	1,09	3,27	0,81	11,11
	<i>pH</i>	7,78	0,09	0,26	7,43	8,09
	<i>SDT (mg/L)</i>	1910,67	807,47	2422,42	519	8123
	<i>Nitrato (mg/L)</i>	5,24	1,96	5,89	0,34	15,35

A Tabela 9 apresenta um resumo estatístico referente às análises de qualidade da água dos nove poços apresentados na Figura 4. Ao observar os parâmetros, em especial a condutividade elétrica e o SDT (Tabela 26, em Anexo), os níveis encontrados na água representam risco de comprometer o solo do perímetro irrigado, pois nos poços P3, P6, P10 e P33 foram encontrados valores superiores a 1000 mg/L de SDT, em alguns casos como os poços P3 e P33 as concentrações superam os 2000 mg/L, aumentando desta forma os riscos de salinização das áreas irrigadas com uso das águas desta fonte para os resultados das análises de julho de 2016. No mês de agosto, em média este parâmetro encontrou-se em torno 1910 mg/L.

Estas concentrações mencionadas, corroboram com as concentrações indicadas pelas medidas de Ce encontradas na água dos poços P3, P6, P10, P11, P14 e P33 que superaram 1,25 dS/m no mês de julho de 2016, em específico, por exemplo, as águas dos poços P3 e P33 superaram mais de 3,0 dS/m, que possibilita o risco de sérios impactos ambientais quanto ao uso prolongado e sem planejamento deste recurso. Em relação à concentração de nitrato, usualmente a água para irrigação segundo Ayres e Westcot (1985) situa-se entre 0 e 10 mg/L. A resolução CONAMA n° 396/2008 estabelece para consumo humano, dessedentação animal e recreação, respectivamente,

10 mg/L, 90 mg/L e 10 mg/L. A presença de nitrato em águas subterrânea pode estar associada à contaminação da água por atividades agropecuárias via fertilizantes, além dos dejetos de esgotos brutos que podem infiltrar em camadas profundas do solo por fossas sépticas, bem como de lagoas de decantação que recebem dejetos em misturas líquidas (RESENDE, 2002), e lançam em rios intermitentes como o caso de estudo, no qual o aquífero aluvial recebe cargas de esgoto doméstico bruto, advindo por parte da cidade de Sumé e tratados da ETE. Tomando por bases informações da Tabela 4, entende-se que apesar do aquífero está localizado numa área irrigada e até mesmo por receber águas residuárias, as concentrações de nitrato encontram-se em sua maioria numa faixa adequada para irrigação, devido a poços como: P3, P6, P10, P11, P28 e P33 apresentarem concentrações < 5,0 mg/L para o mês de julho. Poços como P14 e P25 apresentaram valores superiores a 8,5 mg/L nos dois meses, em agosto, respectivamente, essa concentração foram da ordem de 11 mg/L e 14 mg/L. O pH esteve sempre dentro da amplitude normal para águas destinadas a irrigação nos dois meses avaliados.

Do ponto de vista microbiológico, no que diz respeito ao nível de Coliformes Termotolerantes (Tabela 26, em Anexo), estiveram bem abaixo do estabelecido pela WHO (2006), bem como da resolução n° 357/2005, que apesar de ser esta resolução destinada às águas superficiais, possibilita um comparativo, de maneira que níveis  $\leq 10^3$  UFC/100 mL são indicados para irrigação de hortaliças e frutíferas, pois nos poços monitorados os maiores valores encontrados foram de 208 UFC/100 mL no P14 no mês de julho e 150 UFC/100 mL no P3 em agosto, valores estes que indicam uma água com qualidade para irrigação no perímetro. No mês de julho, por exemplo, quanto a bactérias *Escherichia Coli*, seis poços indicaram ausência, ou seja, apenas os poços P3, 28 e 33 indicaram presença.

### 6.3 ÁGUAS RESIDUÁRIAS

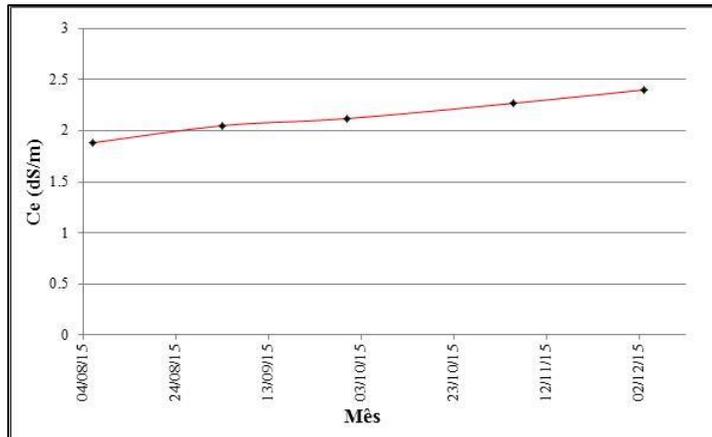
No que diz respeito às águas residuárias produzidas pela cidade de Sumé, observa-se que parte dela é drenada para o Rio Sucuru através de riachos como o dos Pilões, chegando a atingir o aquífero aluvial contido no perímetro irrigado. Outra parte da água residuária tem por destino a estação de tratamento de esgotos da cidade, localizada ao lado do perímetro irrigado, com tratamento baseado em lagoas de estabilização. Essa água passa pelos processos da estação e, posteriormente, é lançada no curso do Rio Sucuru.

Nesse sentido, para modelagem espacial dessa alternativa que diz respeito ao gerenciamento dos recursos hídricos vindos da estação de tratamento de esgoto, torna-se fundamental o conhecimento da qualidade da água pós-tratamento. Pois o caso de estudo busca demonstrar, também, a possibilidade de uso de tal recurso com base em critérios que envolvem, por exemplo, a salinidade do solo onde será destinada a água.

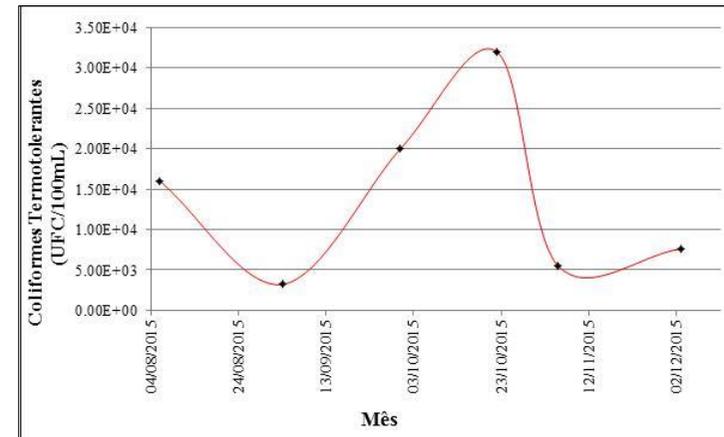
A qualidade da água para irrigação está relacionada a seus efeitos prejudiciais ao solo e as culturas, e de certa forma a vida humana quanto às questões microbiológicas. Assim, quanto melhor a qualidade, mais usos são possíveis. As águas residuárias requerem muitas vezes técnicas especiais de manejo para controlar ou compensar eventuais problemas de salinidade e toxicidade das plantas ligadas a sua utilização (ANANE *et al.*, 2012; PEDRERO *et al.*, 2011; AYERS e WESTCOT, 1976).

No Brasil, a resolução do CONAMA nº 54 de 2005 estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, dentre essas modalidades, o reúso para fins agrícolas está presente. No entanto, não há uma regulamentação do reúso da água no Brasil quanto ao parâmetro microbiológico (BASTOS *et al.*, 2008). Autores como Mendonça *et al.* (2005) adotaram em seus estudos informações da WHO (2006) que estabelece restrições de uso dessas águas para os tipos de culturas praticadas, em especial, quanto aos níveis de Coliformes Termotolerantes e seus risco. Para esse caso de estudo adotou-se também em especial para água residuárias restrições adaptadas da WHO (2006) conforme apresentado na Tabela 4. Quanto aos parâmetros químicos, optou-se pelas restrições estabelecidas por Ayers e Westcot (1985), utilizadas também por Tak *et al.* (2012).

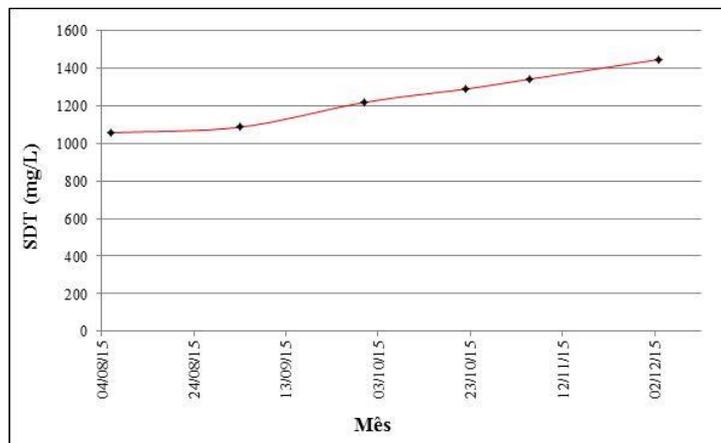
Nesse sentido, com base em informações da CAGEPA solicitadas pelo projeto BRAMAR a respeito da qualidade das águas residuárias tratadas pela ETE de Sumé, quanto aos principais parâmetros para definir usos na irrigação como: Coliformes Termotolerantes, Ce, SDT e pH da água, pode-se observar os seguintes comportamentos conforme Figuras 20, 21, 22 e 23:



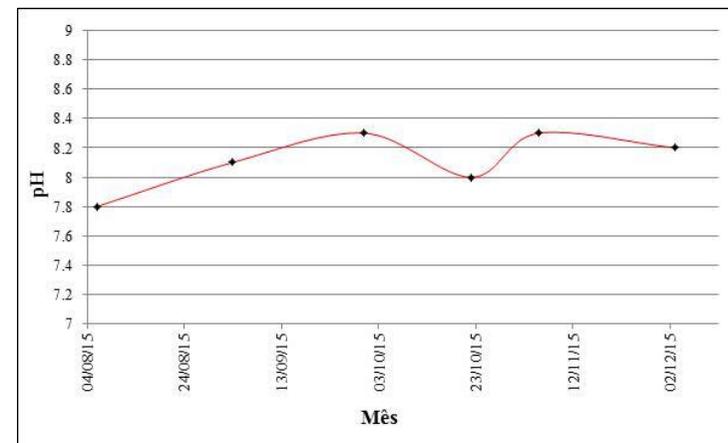
(20)



(21)



(22)



(23)

**Figuras 20, 21, 22 e 23 - Parâmetros químico e microbiológico da água residuária tratada.**

Conforme informado na figura acima e o que dispõe na resolução CONAMA n° 357/2005 e na WHO (2006), o fato dos Coliformes Termotolerantes se situarem acima de  $10^3$  UFC/100 mL, significa dizer que esta água não é indicada para culturas consumidas cruas como hortaliças e raízes, diferente dos níveis apresentados pelo reservatório de Sumé onde o referido parâmetro encontra-se bem abaixo para um reservatório tido como classe 2. Nesse contexto, o cultivo de culturas com esta água segundo a WHO (2006) deve ser realizado para culturas de porte alto com uso de irrigação por gotejamento.

Quanto aos três parâmetros químicos apresentados, segundo Ayers e Westcot (1985), para o nível da condutividade elétrica e os SDT, o grau de restrição de uso encontra-se numa faixa que varia de ligeiro a moderado impacto ao solo. O uso dessas informações quanto à qualidade química dos parâmetros é essencial para a tomada de decisão quanto ao estabelecimento da escala de intensidade de importância no AHP (na comparação aos pares), pois existe um risco de salinização do solo caso o gerenciamento do recurso hídrico seja realizado em locais onde os níveis no solo já superem os valores tolerados para o desenvolvimento das culturas. Sendo assim, torna-se fundamental ao usar determinado recurso, observar as condições do solo quanto à condutividade elétrica ou a sodicidade do mesmo.

O pH da água residuária encontrou-se dentro da faixa de amplitude normal, fator esse importante devido ao pH influenciar na troca catiônica do solo. Assim, quando existem valores superiores ou inferiores a esta amplitude da Tabela 4, a um grande risco de depreciação da qualidade do solo por essas águas e a perda de produtividade, pois o referido parâmetro influencia na fertilidade do solo.

#### 6.4 PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Com base em visita de campo, constatou-se que a produção agrícola atual do perímetro irrigado é dada essencialmente pela exploração da água contida em poços do aquífero aluvial. São irrigantes que, mesmo em meio à crise hídrica advinda da falta de planejamento e gerenciamento da água pelo órgão gestor, permanecem produzindo culturas em seus lotes. Exemplo disso é os irrigantes dos lotes 43 e 45 que mesmo estando localizados distantes do manancial, ou seja, localizados no final do perímetro continuam produzindo tomate, pimentão, melancia, pepino, mamão, goiaba, banana,

maracujá, caju, milho, feijão e palma em suas áreas irrigadas, mediante poços com irrigação por gotejamento conforme Figuras 24 e 25 abaixo:



(24)



(25)

**Figura 24 e 25** - Produção agrícola no perímetro irrigado.

Não apenas estes dois lotes citados acima cultivam ou cultivaram a cultura principal do início do projeto que era o tomate, mas também irrigantes dos lotes da parte inicial do perímetro como os lotes: 4, 6, 11 e 12, que nos últimos anos após a crise hídrica devida o colapso do reservatório de Sumé, permaneceram, é claro, a depender das condições climáticas, a cultivar, uns em maior e outros em menor escala, sempre a depender dos poços contidos no aquífero. Nesse sentido, tais informações obtidas em visita a campo foram fundamentais para identificar as condições do perímetro, do ponto de vista em saber quais lotes ainda praticam ou já praticaram alguma cultura, mesmo com a interrupção da emissão de água para os canais. Além disso, a visita ao perímetro possibilitou a verificação *in loco*, das condições do solo e poços que sustentam ainda alguma produção agrícola.

Outro cultivo bastante praticado no perímetro de Sumé é o de capim (sorgo e elefante) para alimentação de bovinos, caprinos e ovinos, exemplo disso, são os lotes 1, 7, 13, 17, 20, 24, 25 e 26 em que se cultivam pequenas ou grandes quantidades desta cultura. Por outro lado, observa-se também que após o colapso hídrico diversos lotes do perímetro não realizaram mais o cultivo, conforme constata a presença demasiada de algaroba em algumas áreas projetadas para irrigação.

Segundo informações da Cooperativa Agrícola Mista dos Irrigantes de Sumé (CAMIS), em abril do ano passado, havia uma área cultivada de 112,5 hectares que correspondiam em sua maioria à produção de milho, feijão e capim elefante. Para o mesmo mês deste ano de 2016, havia 82,0 hectares cultivados, neste caso, com hortaliças como pimentão, tomate de mesa e melancia, além de milho, feijão e o capim. Ainda segundo a CAMIS, a produção de bovinos e em maior quantidade de caprinos e

ovinos (com mais de 270 cabeças) gerou uma receita no mês de abril deste ano de R\$ 26.535,00 reais, isto já somado os R\$ 10.935,00 da produção de 28.350 litros de leite. Considerando a receita do início do ano até abril este valor chega a R\$ 105.725,00 reais. Nesse sentido, as receitas agropecuárias anuais do perímetro, segundo o DNOCS, giram em torno de mais de R\$ 186.725,00 reais (DNOCS, 2016).

## 7.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES FINAIS

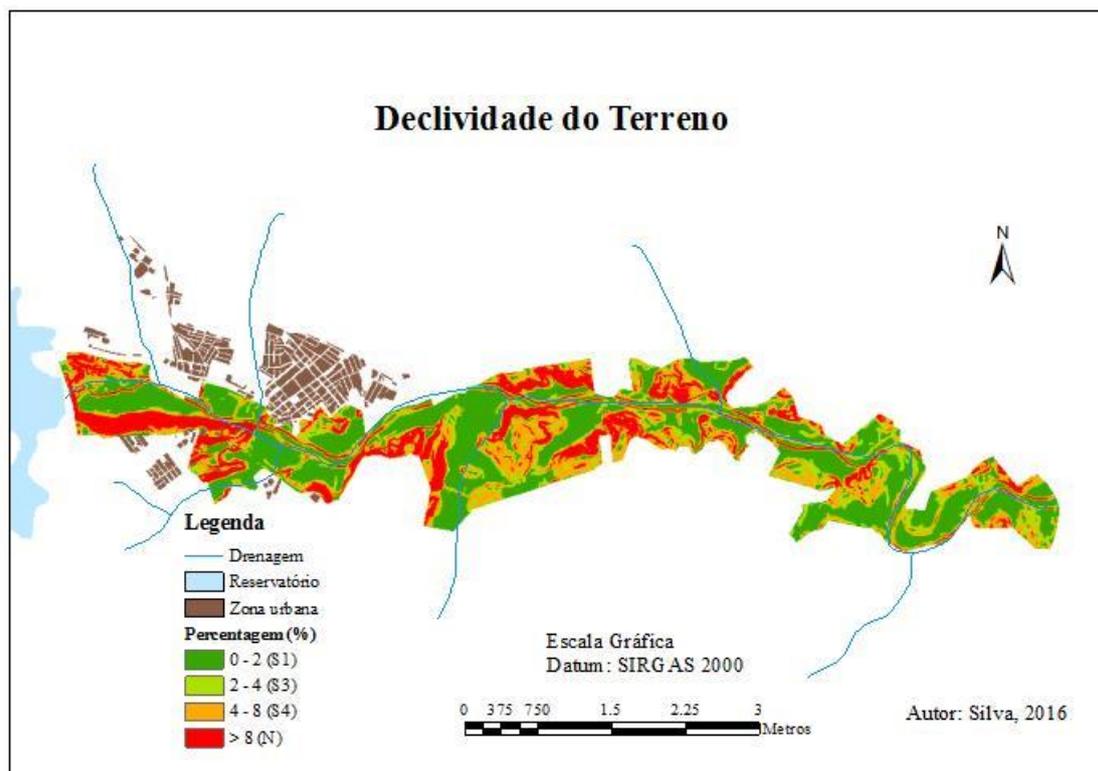
### 7.1 CRITÉRIOS TÉCNICOS (CT) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL

Os referidos critérios apresentados abaixo são extremamente indispensáveis para o gerenciamento dos recursos hídricos no perímetro irrigado, uma vez que, é fundamental selecionar áreas mais adequadas quanto ao tipo de recurso hídrico disponível tendo em vista a viabilidade técnica para condução da água ao referido local de irrigação (áreas irrigadas, Figura 3).

#### 7.1.1 Declividade do Terreno (CT<sub>3</sub>) e Proximidade entre as Áreas Irrigadas (PAI) (CT<sub>2</sub>)

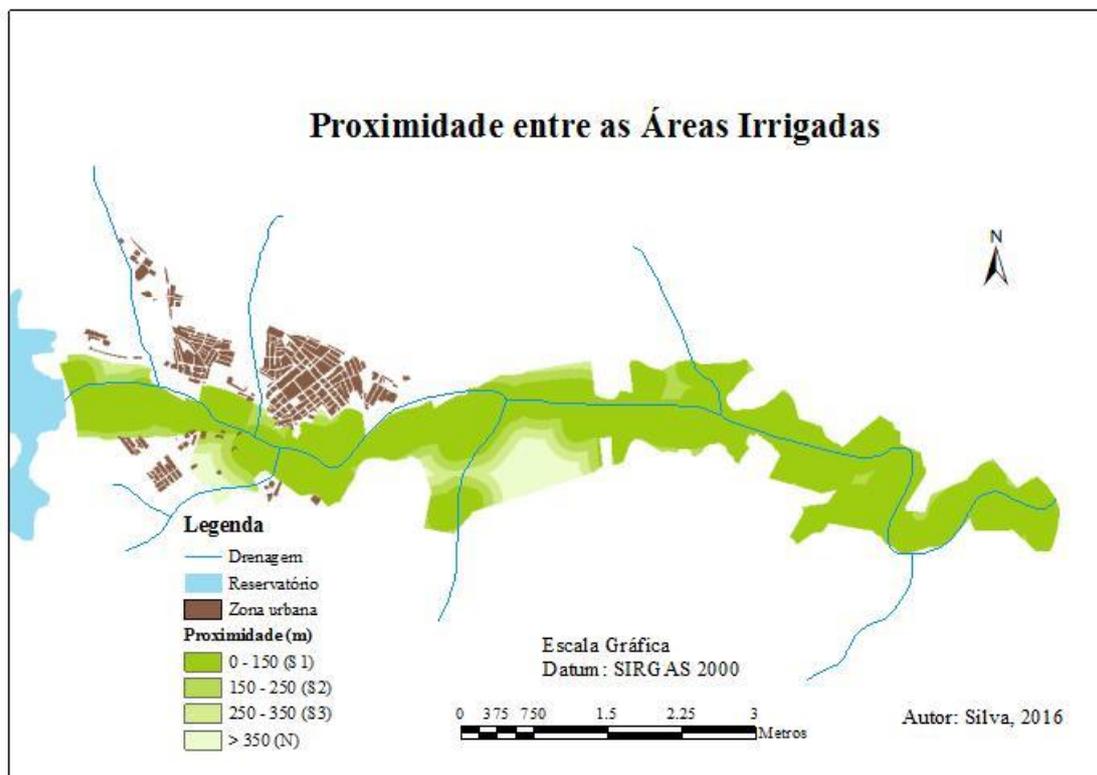
A declividade do terreno corresponde ao critério/atributo mais utilizado em *GIS-MCDA*, seja para definição de áreas com aptidão agrícola ou na tomada de decisão para o gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas. Nesse contexto, entende-se que áreas mais sustentáveis ou adequadas tecnicamente são aquelas mais planas.

Com base nas informações topográficas cedidas pelo DNOCS, gerou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno no SIG e, em seguida, obteve-se a declividade do terreno (Figura 26). Este critério influencia diretamente no escoamento superficial e subterrâneo da água, bem como na erosão do solo e lavagem de nutrientes. O perímetro descrito acima apresenta uma área total de 832,9 ha, com 354,45 ha (42,56%) altamente adequados e 169,11 ha (20,30%) inadequados.



**Figura 26** - Declividade do perímetro irrigado de Sumé.

Outra informação técnica relevante considerada para o estudo é a Proximidade entre as Áreas Irrigadas (PAI) no perímetro. Esse critério configura-se no entendimento que áreas mais próximas umas das outras são mais adequadas do ponto de vista do gerenciamento dos recursos hídricos, quanto à tomada de água do canal principal e canais secundários. Assim, quanto mais distante uma área da outra, torna-se dificultosa a condução dessas águas para as áreas irrigadas, de modo a necessitar de um número maior de canais secundários, bem como de superar mais obstáculos desde a inclinação do terreno a maiores riscos de manutenção e até mesmo a necessidade de um maior bombeamento e condução, considerando a irrigação proveniente de águas subterrâneas ou águas residuárias da ETE. Para tanto, com base nas visitas de campo, na distribuição das atuais áreas irrigadas, distribuição dos canais e nas informações de especialistas em recursos hídricos, foram adotadas as classes de adequação apresentadas na Figura 27 para melhor aplicação da modelagem espacial.



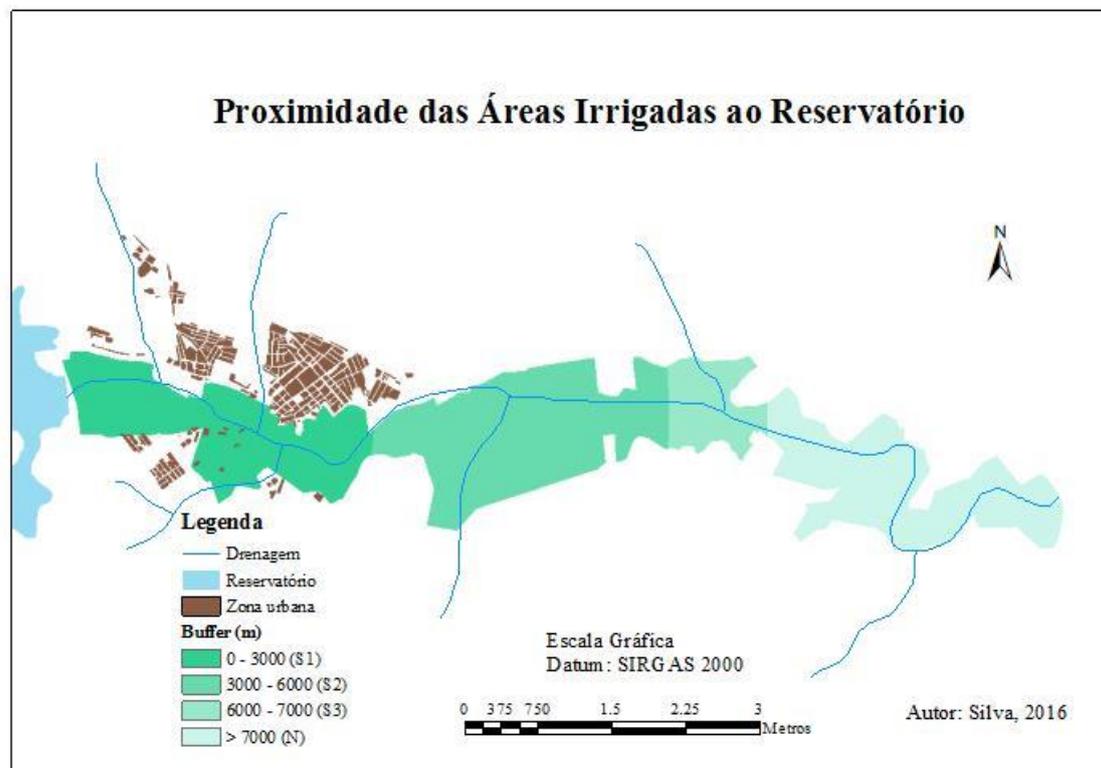
**Figura 27** - Proximidade entre as áreas irrigadas do perímetro.

Para obtenção da referida informação da Figura 27 aplicou-se através do SIG o método da distância euclidiana, que corresponde à distância entre dois pontos. Neste caso, a distância entre as áreas irrigadas. Observou-se que 78,15% da área do perímetro irrigado (650,95 ha) são consideradas como altamente adequadas, ou seja, distam até 150 m umas das outras, o que viabiliza o gerenciamento dos recursos hídricos por estarem mais próximas. Uma área de 47,12 ha (5,66%) foi considerada inadequada.

### **7.1.2 Proximidade das Áreas Irrigadas ao Reservatório (PAIR) (CT<sub>1</sub>)**

Para o atributo PAIR, tomou-se como base a necessidade de manutenção da infraestrutura nos canais principais do perímetro e, para fundamentar o atributo, consideraram-se as atuais obstruções existentes no canal principal, além da identificação de locais com maiores riscos de haver obstruções no canal mediante aspectos como erosão e matérias presentes como resíduos. Portanto, para a viabilização da irrigação no perímetro por água do reservatório, entende-se que quanto mais próximas forem as áreas irrigadas do reservatório mais adequadamente estão situadas para essa fonte hídrica, considerando, neste caso, os aspectos da necessidade de manutenção da

infraestrutura do canal. Ou seja, áreas mais distantes tornam-se inadequadas tendo em vista que a manutenção com realização de reparos inviabiliza a irrigação na parte inferior do perímetro devido à interrupção do fornecimento de água. O resultado da distribuição espacial deste atributo (PAIR) é mostrado na Figura 28.



**Figura 28** - Proximidade das áreas irrigadas ao reservatório.

Assim, observa-se que para o caso de estudo há uma área de aproximadamente 233 ha inadequada (28% do perímetro irrigado) localizada na parte inferior do perímetro. E um total em torno de 230 ha (27,61%) altamente adequada.

## 7.2 CRITÉRIOS ECONÔMICOS (CE) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL

### 7.2.1 Fertilidade do solo (CE<sub>2</sub>)

Os indicadores químicos de qualidade de solo são relevantes nos estudos tanto agrônômicos quanto ambientais. Normalmente, são agrupados em quatro classes: os que indicam (a) *os processos do solo ou de comportamento*, exemplo, o pH; os que indicam (b) *a capacidade do solo de resistir à troca de cátions*, como CTC efetiva; os que indicam (c) *as necessidades nutricionais das plantas* como é o caso de nitrogênio (N),

fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Além daqueles que indicam *(c) a contaminação ou poluição* (GOMES e FILIZOLA, 2006).

Para o caso de estudo, foram consideradas as três primeiras classes, tendo em vista a disponibilidade de informações e o fato de considerar neste atributo a fertilidade do solo; excluindo a contaminação. Sendo assim, para obtenção de um mapa de fertilidade do solo, fez-se necessário a aplicação da modelagem multicritério, em especial do método do AHP. A adoção de tais grupos foi adaptada para as informações disponíveis e a realidade do caso:

- (a) *Processos do solo ou comportamento* ( $I_1$ ): pH e MO;
- (b) *Capacidade do solo de resistir à troca de cátions* ( $I_2$ ): H+Al; SB; CTC(t); CTC(T) e V;
- (c) *Necessidades nutricionais das plantas* ( $I_3$ ): P, K, Ca; Mg e P-rem.

Tendo em vista o número elevado de parâmetros e que cada um possui sua devida importância no contexto da interpretação de fertilidade do solo (material orgânico e complexo de troca catiônica), para obtenção de um mapa que represente a realidade do perímetro quanto a tais parâmetros, julgou-se necessário o uso da AHP ao adotar os grupos de indicadores químicos de qualidade. Assim, com base na literatura e informações obtidas com especialistas em ciências do solo, adotaram-se as seguintes escalas de intensidade de importância e obteve-se a matriz de comparação aos pares, os pesos referentes a cada parâmetro e a Razão de Consistência (CR):

**Tabela 10** - Matriz de comparação aos pares do indicador  $I_1$  - Processos do Solo ou Comportamento.

	pH	MO	Peso (%)	CR (Razão de Consistência)
pH	1	0.333	25	
MO	3	1	75	0,0

Em decorrência da constatação de lançamento de águas residuárias no curso do Rio Sucuru, provenientes da zona urbana de Sumé e sua ETE, que influenciam na manutenção e elevação das concentrações de MO no solo do perímetro, tal parâmetro foi considerado como mais relevante para o caso de estudo (Tabela 10). O pH do solo corresponde a outro parâmetro importante, pois influencia diretamente no complexo de troca catiônica, de modo que fornece indícios gerais das condições do solo. No

perímetro irrigado, tal parâmetro encontra-se acima de 7,0, o que corrobora para níveis em geral altamente adequados de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  adsorvidos no complexo coloidal de troca.

Quanto à Capacidade de Troca Catiônica, que diz respeito ao grupo  $I_2$ , foram consideradas as seguintes comparações (Tabela 11) com relação à escala de intensidade de importância dos parâmetros para o complexo catiônico, além da devida importância de cada parâmetro para interpretação da fertilidade do solo.

**Tabela 11** - Matriz de comparação aos pares do indicador  $I_2$  - Capacidade de Troca Catiônica.

	CTC (t)	CTC (T)	V(%)	SB	H + Al	Peso (%)	CR
CTC (t)	1	0,5	0.333	3	5	18,564	
CTC (T)	2	1	0.333	3	5	24,367	
V(%)	3	3	1	3	5	42,403	
SB	0.333	0.333	0.333	1	3	9,926	0,067
H + Al	0,2	0,2	0.2	0.333	1	4,740	

Como observado, o parâmetro de maior peso neste índice de qualidade é a saturação por bases (V%), que corresponde à soma das bases trocáveis representada em porcentagem de capacidade de troca de cátions, ou seja, envolve diretamente a CTC (T). Neste contexto, tais comparações relativas quanto à saturação por bases com demais parâmetros justifica-se pelo fato de tal parâmetro ser um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, de modo que permite compreender se os solos são eutróficos (férteis) ou distróficos (pouco férteis). Os solos distróficos podem ser muito pobres em  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  e apresentar um teor de alumínio trocável muito elevado, que não é o caso do perímetro irrigado de Sumé, pois tais parâmetros são adequados (RONQUIM, 2010).

A matriz de comparação aos pares (Tabela11) também demonstra a importância da capacidade de troca catiônica, CTC (T) e CTC (t), pois tais parâmetros representam a gradação da capacidade de liberação de vários nutrientes, influenciando na manutenção da fertilidade por um longo período, reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação, por exemplo, de fertilizantes. Neste contexto, considerando que a maior parte da CTC do solo contida no perímetro irrigado está ocupada por cátions

essenciais como os citados acima, pode-se afirmar que se trata de um solo adequado para nutrição das plantas. Pelo contrário, quando grande parte da CTC é ocupada por cátions potencialmente tóxicos como:  $H^+$  e  $Al^{+3}$ , este será um solo pobre (RONQUIM, 2010).

O indicador que diz respeito às Necessidades Nutricionais das Plantas ( $I_3$ ), seus parâmetros são também comparados com base numa relação de importância, considerando-se para este caso os parâmetros disponíveis apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12** - Matriz de comparação aos pares do indicador  $I_3$ . - Necessidades Nutricionais das Plantas.

	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>P-rem</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>CR</b>
<b>P</b>	1	3	5	7	7	50,217	
<b>K</b>	0.333	1	3	5	7	26,513	
<b>Ca</b>	0.2	0.333	1	3	5	13,144	
<b>Mg</b>	0.143	0.2	0.333	1	3	6,467	0,068
<b>P-rem</b>	0.143	0.143	0.2	0.333	1	3,658	

A quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas é fator preponderante para o aumento da produtividade. Nesse sentido, dos parâmetros mencionados acima, chamados de macronutrientes, e com base nos dados disponíveis, realizou-se a comparação pareada numa escala de intensidade de importância de tais elementos no contexto da exigência nutricional ( $P > K > Ca > Mg$ ) das culturas praticadas no perímetro irrigado (Quadro 1). As concentrações dos elementos citados são consideradas, para os dados observados, em geral, boas, ou seja, são altamente adequadas.

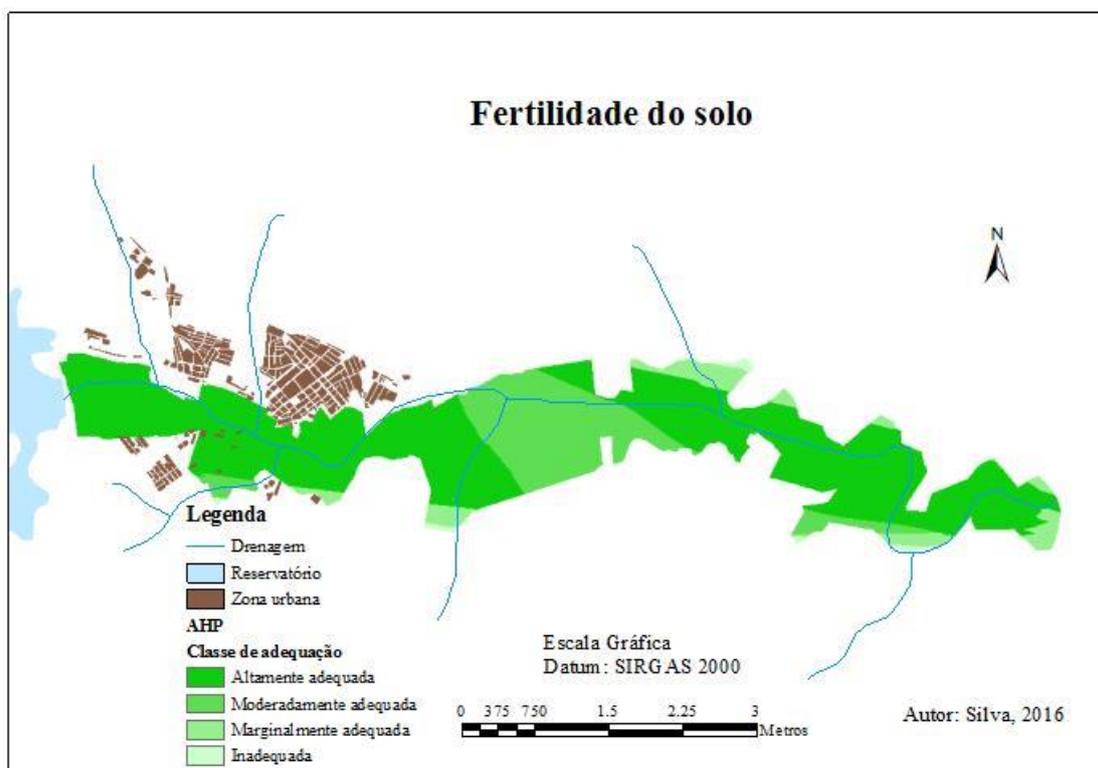
Para o caso de estudo optou-se por considerar, também, os valores referentes à *P-rem* que diz respeito a uma estimativa da capacidade “tampão” do solo, ou seja, mede a quantidade de fósforo que permanece em solução de equilíbrio em resposta a uma concentração de fósforo adicionada ao solo (DONAGEMMA *et al.*, 2008). Quanto à determinação de nitrogênio, enxofre e outros micronutrientes, os mesmos não são realizados rotineiramente, pelo fato de não haver critérios totalmente comprovados para sua interpretação (GUIMARÃES e ALVAREZ V., 1999).

Assim, com a obtenção de três mapas correspondente a cada indicador ( $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ ), aplicou-se o AHP no intuito de obter um único mapa de fertilidade do solo através da seguinte matriz de comparação aos pares:

**Tabela 13** - Matriz de comparação aos pares dos indicadores.

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	Peso (%)	CR
$I_1$	1	0.2	0.2	8,875	0,052
$I_2$	5	1	0.5	35,219	
$I_3$	5	2	1	55,907	

Como observado, o peso maior é dado ao  $I_3$  (55,907%) que corresponde aos parâmetros que configuram em particular a necessidade nutricional das plantas, seguida do indicador que trata da capacidade de troca catiônica do solo (35,219%), tais parâmetros tomaram como base consulta a especialistas de ciência dos solos, entendendo que parâmetros como, por exemplo, CTC e V(%) dependem diretamente das relações de concentração dos elementos químicos apresentados no  $I_3$ . Assim, obtendo o seguinte mapa de fertilidade do solo (Figura 29).



**Figura 29** - Mapa de fertilidade do solo do perímetro.

Como observado, a modelagem demonstra que o perímetro apresenta uma área pouco maior que 560 hectares altamente adequados, ou seja, mais de 67% do perímetro, isto tomando por base a interpretação da fertilidade apresentada na Tabela 6. Uma pequena parte corresponde a uma área inadequada (aproximadamente 1%). O resultado demonstra que o solo do perímetro apresenta condições adequadas para desenvolvimento das culturas praticadas, devido às boas concentrações de P, K, Ca e Mg que compõem a capacidade do solo de resistir à troca de cátions, com níveis baixos de acidez potencial e elevada soma de bases. Além disso, o solo de perímetro apresenta valores elevados de fósforo disponível, interpretado neste caso como uma condição altamente adequada.

Quanto ao pH (acidez ativa), conforme já mencionado, o mesmo situou-se, nas análises, sempre acima de 7,0. Nesse sentido, quanto mais próximo deste valor, mais adequado torna-se o solo para realização dos processos físico-químico. De modo que o resultado da estatística espacial apontou que na maior parte do perímetro o solo apresenta-se marginalmente adequado, ou seja, mais de 76% (aproximadamente, 637 ha) com valores próximos a neutralidade.

Como outrora mencionado, atualmente está sendo lançada água residuária no curso do Rio Sucuru, esse pode ser um dos aspectos que esteja diretamente influenciando a fertilidade do solo no perímetro irrigado, a jusante do reservatório de Sumé, onde se constatou em visita de campo a presença de esgoto doméstico sendo lançado, advindos pelos afluentes que cortam a cidade de Sumé, como é o caso do riacho da Pedra Comprida.

As águas residuárias domésticas são uma grande fonte de material orgânico com presença de fósforo e nitrogênio, de maneira que servem como fertilizantes químicos naturais. Bem como a matéria orgânica corresponde a um indicador biofísico do solo que auxilia na manutenção da porosidade, de modo que um solo rico em matéria orgânica também apresentará altos índices de capacidade de troca catiônica total, conforme as concentrações encontradas no perímetro. No entanto, as águas residuárias domésticas, quando utilizadas sem tratamento adequado pode contaminar as águas subterrâneas com bactérias, parasitas e vírus que criam graves problemas de saúde pública (RONQUIM, 2010; METCALF & EDDY, 1991).

Segundo especialistas que tiveram como estudo de caso o perímetro irrigado de Sumé e os proprietários dos lotes, as informações são que os primeiros lotes eram os

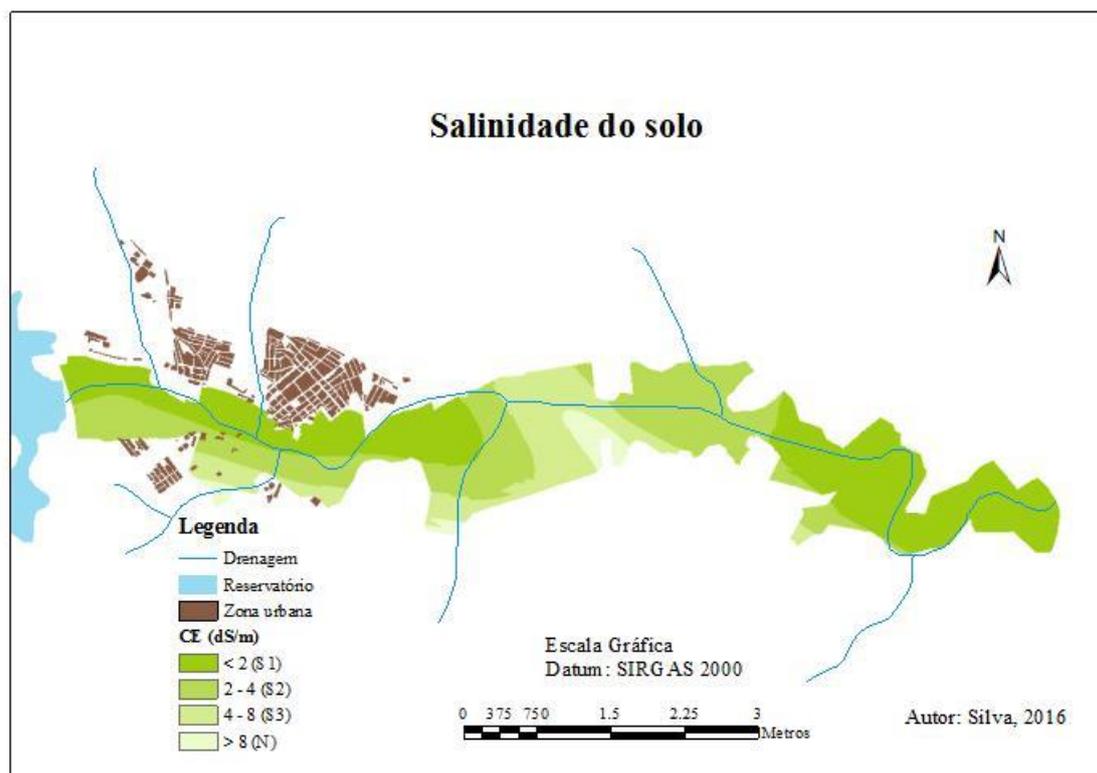
mais produtivos (próximos à zona urbana e reservatório); bem como, os localizados na parte inferior, conforme encontrado na modelagem e apresentado pela Figura 29.

Outra informação proveitosa apresentada na Figura 29 é a descontinuidade quanto à classe altamente adequada no decurso do perímetro. Verifica-se uma faixa intermediária considerada como moderadamente adequada, essa informação corrobora com o alto índice de salinidade (alta condutividade elétrica) encontrado nessa faixa (parâmetro não avaliado neste mapa, ver Figura 30). Segundo D'Almeida *et al.*, (2005), no solo, os efeitos da salinidade no desenvolvimento vegetal são advindos das alterações nas propriedades químicas e físicas; no que diz respeito às propriedades químicas, pode ser destacado o aumento demasiado de sais e sódio trocável, que influencia na fertilidade, e em longo prazo pode ocasionar a desertificação. Além disso, afeta diretamente o metabolismo dos organismos presentes no solo, reduzindo drasticamente a fertilidade. Portanto, o excesso de sódio corrobora para destruição da estrutura do solo, que mediante a falta de oxigênio torna-se incapaz de assegurar o crescimento vegetativo (SOCO, 2009).

### **7.2.2 Salinidade (CE<sub>1</sub>) e Sodicidade do solo (CE<sub>3</sub>)**

No que diz respeito à salinidade do solo, o parâmetro mais significativo do critério econômico, utilizou-se a também a geoestatística com base na interpolação por Krigagem conforme descrita também no item 6.2.1. Nesse sentido, obtiveram-se as áreas com as classes de adequação apresentadas na Figura 30.

A identificação de áreas com potencial de salinidade é de suma importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que, nas áreas onde a salinidade situa-se elevada, água para irrigação com concentrações de sais acima de 0,7 dS/m, pode agravar o problema citado. Segundo Dias e Blanco (2010) a implicação prática da salinidade sobre o solo é a perda da fertilidade e a susceptibilidade à erosão. Além de outros impactos como a contaminação das reservas hídricas subterrâneas, e nas plantas os efeitos implicam na perda de produtividade e de qualidade, ou até mesmo perda total da produção. Solos com valores de salinidade entre 4 e 8 dS/m (solo medianamente salino) afetam o rendimento de várias culturas, e como já citado, um solo fortemente salino (> 8,00 dS/m) somente culturas tolerantes produzem satisfatoriamente (RICHARDS, 1954).



**Figura 30 - Condutividade elétrica do solo.**

Algumas culturas são bastante tolerantes a salinidade do solo como: algodoeiro (*Gossypium hirsutum*), beterraba (*Beta vulgaris*), abobrinha italiana (*Cucurbita pepo melopepo*), cevada (forragem e grão) (*Hordeum vulgare*), sorgo (*Sorghum bicolor*) e tomateira (*Phoenix dactylifera*). Pelo contrário, culturas como: alface (*Lactuca sativa*), batata doce (*Ipomoea batatas*), cebola (*Allium cepa*), cenoura (*Daucus carota*), feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), laranja (*Citrus sinensis*), milho grão (*Zea mays*) e pimentão (*Capsicum annuum*) são mais restritivas a salinidade exigindo valores < 2,0 dS/m (DIAS e BLANCO, 2010).

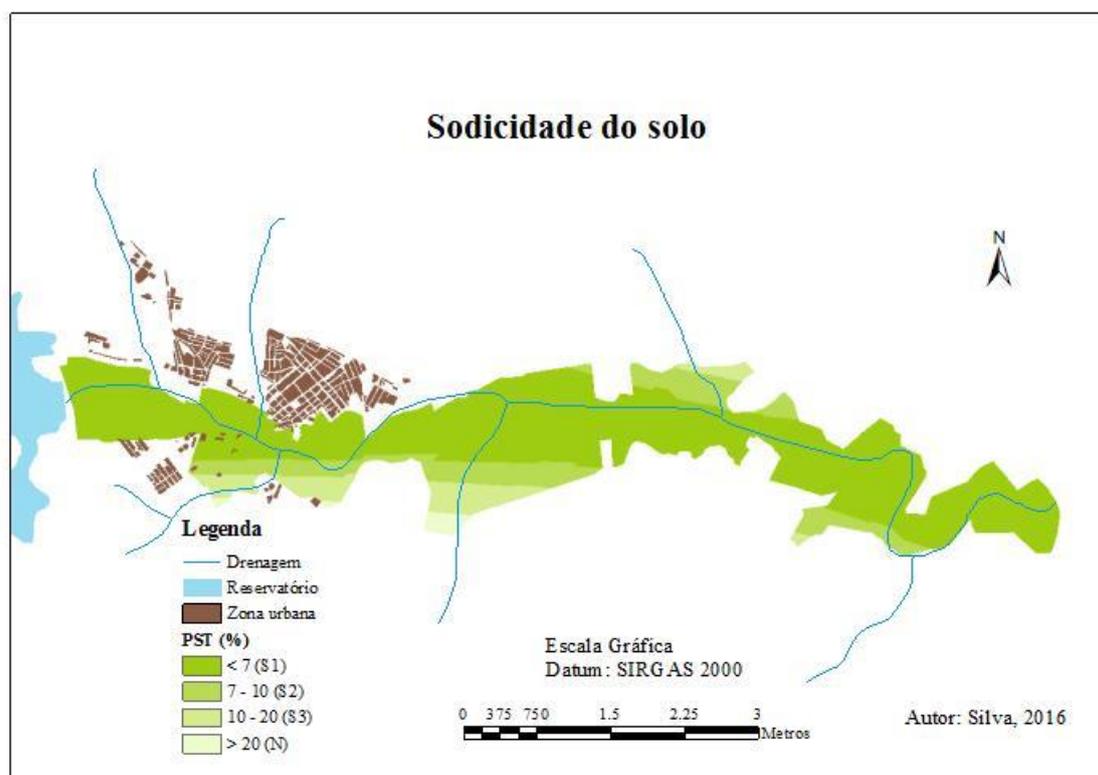
Aproximadamente 21% do perímetro encontra-se com condutividade elétrica do extrato de saturação do solo > 4 dS/m, de modo que boa parte desses valores encontra-se nos lotes 17, 18 e 19. Por outro lado, as partes inferior e superior do perímetro apresentam os melhores resultados quanto a Ce (mais de 44% com valores < 2,0 dS/m).

Nas regiões semiáridas, como em Sumé, as condições elevadas de evapotranspiração e baixa precipitação pluvial ao longo dos anos contribuem diretamente para presença de solos de caráter sódico e solódico, formados pela consequência da salinização primária, que é resultado do processo natural da ação do intemperismo sobre as rochas e minerais presentes no solo. Tais problemas são

agravados, essencialmente, pelo manejo inadequado da irrigação praticada nessas áreas, como nos perímetros irrigados onde não existam sistemas de drenagem, natural e/ou implantado, bem como esses não funcionem de forma eficiente devido à falta de manutenção (AMORIM *et al.*, 2010).

Segundo Amorim *et al.* (2010) o excesso de sais solúveis e/ou sódio trocável dificulta a absorção de água do solo pelas plantas, induz à toxicidade de íons específicos (sódio e cloretos), causa desequilíbrio nutricional e impede a infiltração de água no solo. Além desses impactos, provoca também a redução do crescimento e rendimento da planta. Nesse sentido, o estudo da sodicidade ou percentagem de sódio trocável (PST) do solo é crucial para compreender qual a classe do solo, ou seja, se solos são: não-sódicos, ligeiramente sódicos, mediantemente sódicos e fortemente sódicos, tendo por base uma relação entre os teores de sódio trocável e sais solúveis.

Portanto, a quantidade de sódio trocável presente no solo em relação aos demais cátions adsorvidos é relevante do ponto de vista de solos afetados por sais, particularmente quando há predominância do íon sódio em relação aos demais cátions trocáveis no complexo sortivo, conforme estado encontrado no perímetro irrigado. A Figura 31 mostra as classes de sodicidade:



**Figura 31** - Percentagem de sódio trocável do solo no perímetro.

O mapa acima informa que aproximadamente 629 ha (75,62%) correspondem a solos altamente adequados, observa-se também que essa faixa mostra as margens do Rio Sucuru apresentando as melhores condições, ou seja, solos não sódicos. Isto significa que a percentagem de sódio trocável encontra-se <7%. Essa informação é de suma importância tendo em vista a possibilidade de irrigação com água residuárias advindas da ETE.

Já as faixas inadequadas (solos fortemente sódicos) situam-se a margem direita do Rio Sucuru. Em especial, por exemplo, na parte onde está contido o riacho Oiti. As informações encontradas na Figura 31 convergem claramente com outra informação do relatório do DNOCS (1968), que classifica tais áreas como Unidade Sucuru Salgada (USS), com mais de 70 ha. No caso de estudo, Figura 31, tais unidades apresentam *solos medianamente e fortemente sódicos*, respectivamente, *marginalmente adequada (S3)* e *inadequada (N)*, correspondendo também a mais 70 ha do perímetro irrigado.

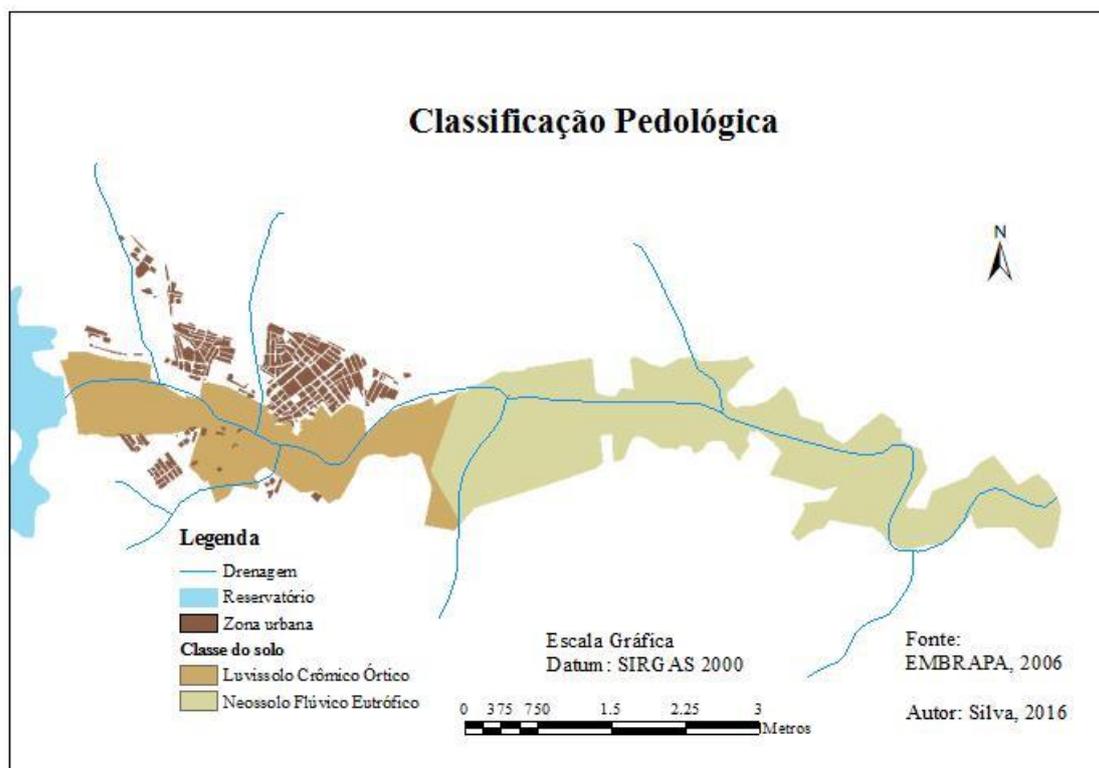
O conhecimento do parâmetro sodicidade é fundamental devido ao efeito do sódio nas plantas e no solo, em especial quando se pretende adotar práticas de manejos adequados da água e de cultivo visando à produção com águas salinas. Segundo Dias e Blanco (2010) dependendo do grau de salinidade, a planta, em vez de absorver, poderá perder a água que se encontra no seu interior, esse efeito acontece quando as plantas absorvem os sais do solo juntamente com a água, de modo que há intoxicação por excesso de sais absorvidos.

### 7.3 CRITÉRIOS AMBIENTAIS (CA) QUE INFLUENCIAM NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS – ÁGUA SUPERFICIAL

#### 7.3.1 Classe do solo (CA<sub>2</sub>)

O solo do perímetro irrigado de Sumé apresenta segundo a Embrapa (2006) duas classificações em específico, a primeira delas, a jusante do reservatório com área de aproximadamente 33%, ou seja, 280 ha correspondendo a características de Luvisolo Crômico, apresentando atividade alta da fração argila e saturação por bases altas conforme revelado pelas análises físico-químicas. Estes solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural variam de bem a imperfeitamente drenados, normalmente pouco profundo de 60 a 120 cm, e em grande parte possui mudança textural abrupta, conforme constatado em sondagem à percussão (SPT) realizada no

âmbito do projeto BRAMAR por intermédio da Associação Técnica Científica Luiz de Oliveira Júnior (ATECEL) onde se verificou um solo com contraste na textura e cor. O solo apresenta horizonte textural argila arenosa de cor escura, intercalada por uma areia média e grossa, pouco compactada de cor clara.



**Figura 32** - Classe de solo do perímetro irrigado.

Outro solo presente no perímetro, neste caso, em maior parte é o Neossolo de subordem Flúvico, que são solos derivados de sedimentos aluviais Eutróficos, também com saturação por bases alta. Nesta parte do perímetro, o solo possui uma textura de caráter mais arenosa em relação à primeira parte do perímetro, tomando como base a SPT realizada no âmbito do projeto BRAMAR. Neste contexto, considerando a textura do solo, que varia de argila arenosa a arenosa, e como do ponto de vista agrícola os solos argila arenoso são melhores, assim, considerou-se como mais adequado em relação a textura arenosa para o caso de estudo.

### 7.3.2 Qualidade da água do reservatório (CA<sub>1</sub>)

Considerando as culturas apresentadas no Quadro 1, bem como tendo por base as informações apresentadas nas Figuras 16, 17 e 18 que apresentam alguns parâmetros de importância no contexto da irrigação, e adotando as restrições apresentadas na

Tabela 4, observa-se que diante os parâmetros estudados sendo os principais: condutividade elétrica da água e Coliformes Termotolerantes, a água do reservatório não apresenta riscos sejam eles de comprometer as culturas quanto aos aspectos químicos e biológicos. Assim, o mapa abaixo demonstra que todas as áreas irrigadas são *altamente adequadas* para irrigação com água do reservatório.



**Figura 33** - Classe de adequação da qualidade da água superficial para irrigação.

Para este atributo, Figura 33, considerou-se também adequadas as áreas irrigadas que no momento da visita a campo não apresentavam práticas culturais, ou seja, que não foram cultivadas no ano de 2015 ou 2016, conforme relatório do BRAMAR (2016).

## 7.4 MODELAGEM ESPACIAL MULTICRITÉRIO – ÁGUA SUPERFICIAL

### 7.4.1 Aplicação do AHP

A utilização de critérios técnicos, econômicos e ambientais neste trabalho tem por objetivo proporcionar uma melhor problematização do caso de estudo, bem como facilitar a comparação aos pares dos atributos/critérios e obter melhores resultados

quanto à modelagem espacial. Cada critério ao ser comparado descreve uma realidade que influencia diretamente na tomada de decisão para o gerenciamento dos recursos hídricos no perímetro irrigado de Sumé; na verdade, as comparações permitem o estabelecimento de pesos que configuram características particulares às alternativas criadas a partir da soma ponderada.

Nesse sentido, a depender do recurso hídrico modelado, ou seja, do objetivo abordado, essas comparações são distintas, pois ao gerenciar os recursos hídricos é de suma importância conhecer a qualidade e quantidade do recurso disponível, as condições do solo onde está sendo lançado o recurso hídrico e quais culturas estão sendo praticadas. Ou seja, para modelar espacialmente tais informações torna-se necessário subdividir o problema, observado, os aspectos e impactos referentes às ações de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos.

Portanto, a adoção de tais critérios parte do princípio do conceito da gestão ambiental quanto à definição de aspecto e impacto ambiental, pois ao lançar uma água com a salinidade elevada no solo (aspecto), a consequência, ou seja, o impacto ambiental é a salinização do solo; logo, a qualidade da água representa um critério ambiental que deve ser modelado a depender do objetivo (recurso gerenciado).

Sendo assim, ao aplicar a *GIS-MCDA* para a água superficial construíram-se as seguintes matrizes de comparação aos pares para representação da realidade do problema:

### **Critérios Técnicos – CT**

**Tabela 14** - Comparação pareada dos Critérios Técnicos.

	CT <sub>1</sub>	CT <sub>2</sub>	CT <sub>3</sub>	Peso (%)	CR
CT <sub>1</sub>	1	7	3	66,942	
CT <sub>2</sub>	0.413	1	0.333	8,795	0,007
CT <sub>3</sub>	0.333	3	1	24,264	

Os critérios técnicos, sua comparação fundamenta-se no ponto de vista dos desafios técnicos existentes ao gerenciar água para um perímetro com mais de 280 hectares de áreas irrigadas. Avaliar condições de declividade do terreno (CT<sub>3</sub>), a distância existente entre as áreas irrigadas (CT<sub>2</sub>) para facilitar a tomada de água de um mesmo recurso e a proximidade das áreas irrigadas ao reservatório (CT<sub>1</sub>) são

fundamentais para o gerenciamento dos recursos hídricos de maneira geral. Áreas mais distantes do reservatório tornam-se mais inadequadas, devido à necessidade de manutenção comum a toda infraestrutura hídrica. Bem como, o real risco de obstruções condiciona a tais áreas mais afastadas do reservatório estarem mais propícia a não receber água advinda do reservatório. Portanto, o referido CT<sub>1</sub> recebeu uma maior importância relativa, seguido da declividade, pois do ponto de vista técnico, não adianta possuir apenas áreas próximas, a declividade deve ser adequada para o referido cultivo.

### **CrITÉrios EconÔmicos – CE**

**Tabela 15** - Comparação pareada dos CritÉrios EconÔmicos.

	CE <sub>1</sub>	CE <sub>2</sub>	CE <sub>3</sub>	Peso (%)	CR
CE <sub>1</sub>	1	5	2	58,155	
CE <sub>2</sub>	0.2	1	0.333	10,945	0,004
CE <sub>3</sub>	0.5	3	1	30,9	

O CE para este objetivo, a princípio, deve ser considerado como mais valoroso pelo fato de tais atributos influenciarem diretamente na produtividade agrícola. Primeiro que, como já descrito, solos com salinidade (CE<sub>1</sub>) alta influencia diretamente no desenvolvimento da planta, sendo neste caso de estudo dentre os CE o que possui uma maior importância relativa, seguido do critério que diz respeito à sodicidade do solo (CE<sub>3</sub>) e a fertilidade do solo (CE<sub>2</sub>).

### **CrITÉrios Ambientais – CA**

**Tabela 16** - Comparação pareada dos CritÉrios Ambientais.

	CA <sub>1</sub>	CA <sub>2</sub>	Peso (%)	CR
CA <sub>1</sub>	1	3	75	
CA <sub>2</sub>	0.333	1	25	0,0

A qualidade da água (CA<sub>1</sub>) corresponde a um critério essencial no gerenciamento dos recursos hídricos, mais valoroso que a textura do solo (CA<sub>2</sub>). Uma água com qualidade inadequada seja em termos de condutividade elétrica, SDT ou até mesmo de níveis de Coliformes Termotolerantes pode comprometer as condições do solo e cultura.

Nesse contexto, para obtenção de um mapa de adequação para o uso da água superficial, fez-se necessária a comparação dos critérios principais: CT, CE e CA.

**Tabela 17** - Comparação pareada resultante dos CT, CE e CA.

	<b>Alternativa I – Água superficial</b>				
	<b>CT</b>	<b>CE</b>	<b>CA</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>CR</b>
<b>CT</b>	1	0.333	7	28,974	
<b>CE</b>	3	1	9	65,536	0,077
<b>CA</b>	0.143	0.111	1	5,49	

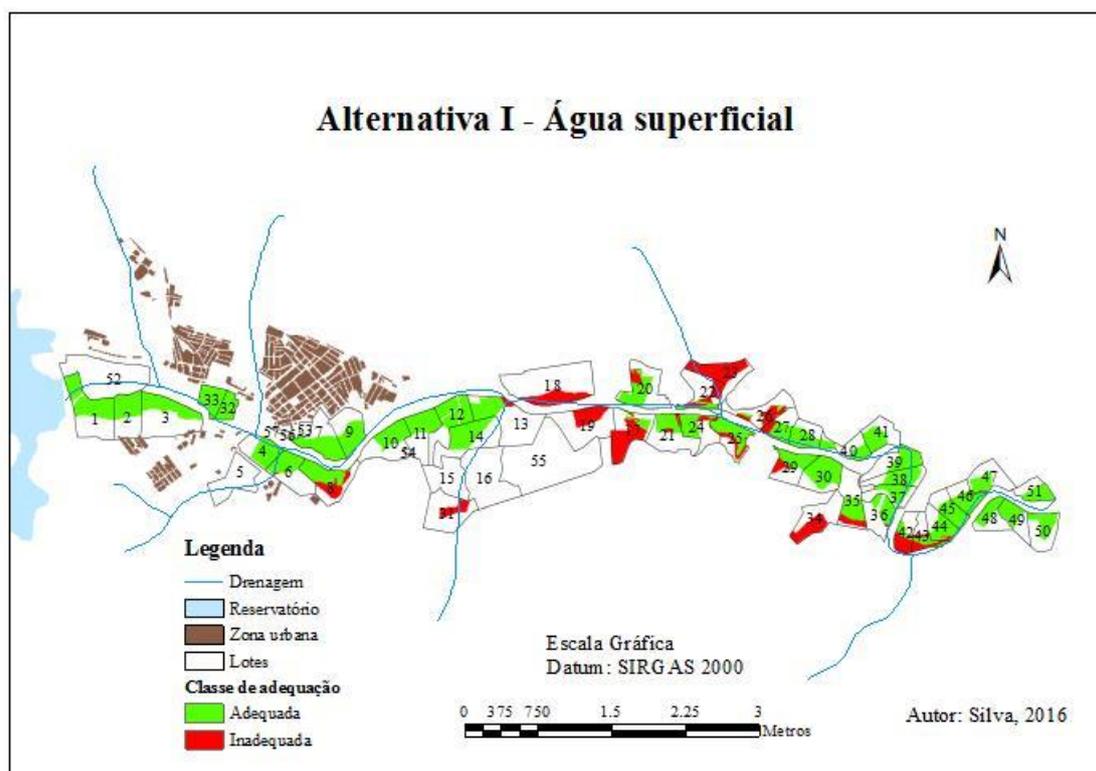
Esta comparação fundamenta-se no fato de que a água advinda do reservatório possui uma qualidade excelente do ponto de vista microbiológico e químico, quanto aos parâmetros avaliados. Neste caso, o critério ambiental constituído da qualidade da água não é muito relevante, recebendo mediante a comparação aos pares um peso de 5,49%. Uma água de qualidade adequada não exerce impactos negativos ao meio ambiente nem à produção de culturas,

A informação acima é fundamental para compreensão dos modelos de *GIS-MCDA*, pois assim surge a possibilidade de duas comparações que dão origem a duas alternativas (Alternativa I e II). A Primeira delas está representada na Tabela 17, onde a comparação aos pares estabelece uma maior evidência para os critérios econômicos (CE) e a segunda, Alternativa II, evidencia os critérios técnicos (CT) conforme apresenta a seguir a Tabela 18.

**Tabela 18** - Comparação pareada resultante dos CT, CE e CA.

	<b>Alternativa II – Água superficial</b>				
	<b>CT</b>	<b>CE</b>	<b>CA</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>CR</b>
<b>CT</b>	1	3	9	65,536	
<b>CE</b>	0.333	1	7	28,974	0,077
<b>CA</b>	0.111	0.143	1	5,49	

O referido CE considera em sua essência as condições de salinidade e fertilidade do solo, assim, com a adoção de tais pesos obtidos da comparação aos pares na Tabela 17, obteve-se um mapa de adequação que indica as áreas irrigadas adequadas e inadequadas para o uso da água superficial, conforme a Figura 34:



**Figura 34** - Alternativa I: modelagem espacial multicritério para água superficial.

Portanto, com aplicação do AHP, o modelo demonstrou que aproximadamente 61,80 hectares das atuais áreas irrigadas são **inadequados para irrigação** considerando as comparações pareadas dos critérios abordados no caso de estudo. Por outro lado, pouco mais de 224,32 hectares são **altamente adequados**.

Para este resultado apresentado acima, no modelo, considerou-se como critério de maior relevância o econômico, com peso de 65,536%. Este modelo é o que melhor representa a realidade, tendo em vista que a fertilidade do solo, salinidade e sodicidade são aspectos ou critérios que influenciam diretamente na produtividade agrícola do perímetro e no gerenciamento dos recursos hídricos. Assim, com base no estabelecimento dos critérios, o modelo apontou os lotes 18, 19, 23, 31 e 34 como integralmente inadequados.

A justificativa para o fato das áreas irrigadas dos lotes 18 e 19 serem inadequadas conforme demonstrada pelo modelo, é dada por estarem localizados numa faixa marginalmente adequada, com condutividade elétrica compreendida entre 4,0 a 8,0 dS/m. Este aspecto é de suma importância do ponto de vista do gerenciamento dos recursos hídricos, pois solos medianamente salinos como estes dos lotes citados afetam o rendimento de diversas culturas, sendo necessário um maior cuidado quanto ao

manejo da água para irrigação, de forma a não tornar esses solos fortemente salinos, onde apenas culturas tolerantes conseguem seu desenvolvimento. Nesse sentido, fez-se necessário uma visita a campo para observar se o resultado encontrado com as restrições descritas condiz com a realidade. Assim, observou-se em campo que tais áreas não são cultivadas (Lotes 18 e 19), ou seja, não há produção agrícola seja em grandes ou pequenas quantidades atualmente, fato esse comprovado pela presença demasiada de algaroba de médio e grande porte nas áreas irrigadas, e algumas cortadas poucos dias antes da visita conforme mostram as Figuras 35 e 36.



(35)



(36)

**Figuras 35 e 36** - Lotes 19 e 18, respectivamente, com a presença demasiada de algaroba e alguns troncos cortados.

Apesar de tais áreas possuírem declividades altamente adequadas (menores que 2%) do ponto de vista agrícola, estarem próximas, facilitando também o gerenciamento da tomada de água dos canais e estarem a menos de 6.000 m de distância do reservatório, encontra-se numa faixa denominada de moderadamente adequada do ponto de vista da fertilidade do solo.

As áreas irrigadas dos lotes 31 e 34 também foram indicadas como inadequadas. Conforme observado, tais lotes encontram-se mais distantes em relação aos outros, esse aspecto influencia diretamente na tomada de água do canal principal, especialmente, a área irrigada do lote 31. Além disso, tais áreas encontram-se em faixas consideradas como inadequadas do ponto de vista da salinidade e sodicidade. Ainda em relação ao lote 31, conforme informado pelo proprietário, na referida área segundo informações técnicas do DNOCS o solo apresenta-se como fortemente salino, tornando-se inadequado de modo que não são praticadas culturas como: tomate, melancia e outros tipos de culturas como realizada em outras áreas irrigadas.

No que diz respeito ao lote 34 na Figura 38, no canto superior da imagem, próximo ao lote 35 (onde se cultiva tomate), observa-se claramente que não há produção agrícola no mesmo devido à presença de algaroba de grande porte em sua área irrigada.



(37)



(38)

**Figuras 37 e 38** - Lotes 31 e 34, respectivamente.

Conforme imagem acima observa-se o solo considerado salino do lote 31, confirmado como solo improdutivo. Os lotes 31 e 34 não apresentam cultivos de culturas básicas praticadas noutros lotes.

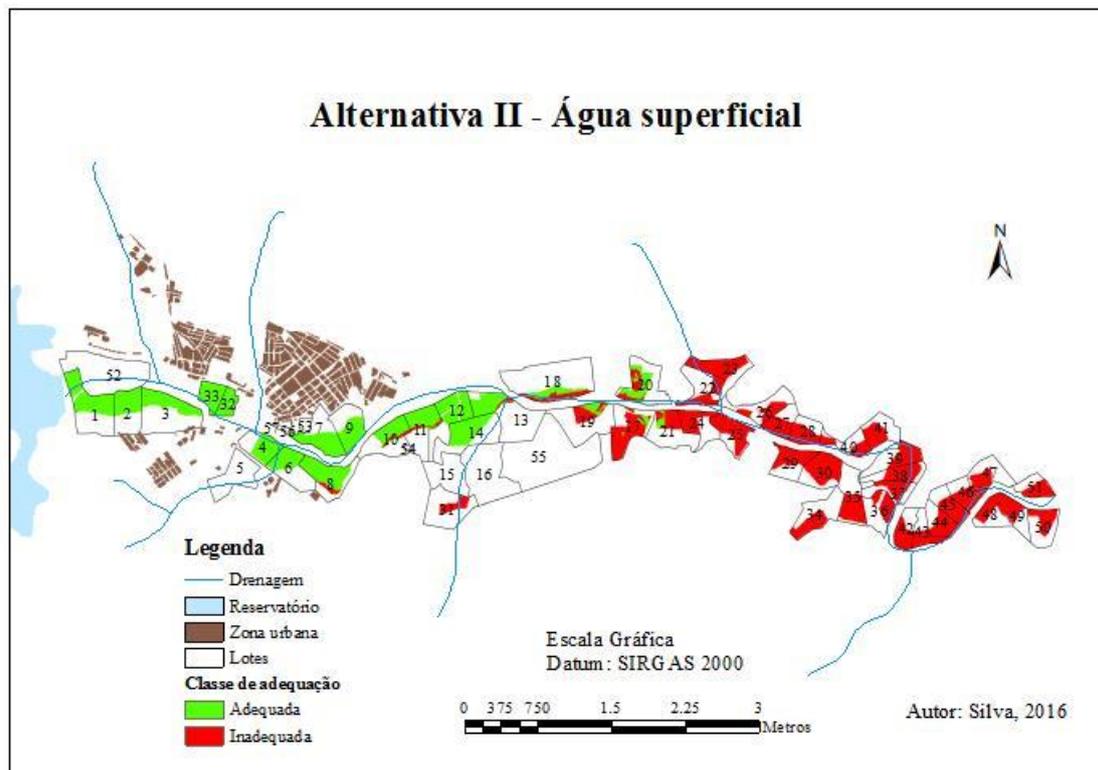
O lote 23 ainda com base no modelo de análise multicritério, também se encontra integralmente inadequado. Atualmente, o mesmo não apresenta cultivo, estando localizado numa área considerada de marginalmente a inadequada quanto aos três critérios econômicos. Apesar de estar contido numa área com declividade adequada, situa-se a mais de 6.000 m do reservatório, sendo considerada com marginalmente adequada para este critério técnico.

O solo apresentado nos lotes 23 e 26 possuem as mesmas características. A área irrigada do lote 26 é praticamente inadequada, estes dois solos apresentam teores elevados de salinidade e sodicidade, além de como visto *in loco* haver uma acentuada presença de cascalho e pedras na área que divide tais lotes, tidas como propriedade particular.

Portanto, observa-se que de maneira geral a salinidade do solo influenciou diretamente na indicação das áreas como inadequadas. Deve-se ressaltar que algumas áreas apesar de encontrarem-se como inadequadas do ponto de vista do gerenciamento dos recursos hídricos, com base no modelo, como é o caso do lote 17, ainda praticam culturas como: capim, milho, feijão e coqueiros. No entanto, um fator que denuncia que a salinidade destes solos está prejudicando as culturas e a produtividade agrícola, é o fato da utilização de novas áreas ditas como de sequeiro para cultivo, neste caso, em terrenos com declividades inadequadas.

Tomando por base os CT como os mais valiosos (Alternativa II) do ponto de vista para o gerenciamento dos recursos hídricos, conforme escala de intensidade de importância estabelecida na Tabela 18:

Obtém-se a seguinte realidade representada na Figura 39 pela *GIS-MCDA*:



**Figura 39** - Alternativa II: modelagem espacial multicritério para água superficial.

Este critério quando ponderado, fundamenta-se numa realidade na qual os canais sofrem grande risco de obstruções seja devido à erosão, ou falta de manutenção dos canais principais e secundários, ou por parte dos irrigantes e/ou órgão responsável. Pois como visto em visita aos lotes, há trechos mais susceptíveis a degradação conforme Figuras 40 e 41. Portanto, o modelo aponta que os primeiros lotes são mais adequados considerando as questões técnicas inerentes as infraestruturas hídricas.



(40)



(41)

**Figuras 40 e 41** - Obstruções encontradas no canal principal, parte inferior do perímetro.

Nesse contexto, aproximadamente 120,45 hectares são adequados considerando as comparações supracitadas e 165,67 hectares inadequados. Assim, conforme apresenta o modelo, torna-se inviável a manutenção da irrigação por água superficial na parte inferior do perímetro devido a tais desafios técnicos, sendo necessária para esta segunda alternativa outra fonte para abastecimento da parte inferior do perímetro irrigado. Principalmente, pelo fato, também, do reservatório suportar irrigação de, aproximadamente, 120 hectares com base na relação de disponibilidade/demanda.

#### **7.4.2 Cenários – Tomada de decisão: gerenciamento da demanda de água superficial para irrigação**

O planejamento fundamentado em cenários, ou cenarização, possibilita ampliar o conhecimento quanto ao uso dos recursos hídricos no perímetro irrigado, de modo a demonstrar a melhor forma para o estabelecimento do desenvolvimento. Sendo assim, a cenarização trabalha com várias possibilidades diante das incertezas de disponibilidade dos recursos.

Para o Cenário I, adotou-se como base o resultado da Alternativa I, alternativa na qual se apresenta uma área de aproximadamente 60 ha como inadequada. Surge então à necessidade da tomada de decisão quanto ao gerenciamento da demanda de água superficial para irrigação, que se constitui, neste caso de estudo como criação de possíveis cenários. Assim, considerou-se para este cenário, Cenário I, as restrições pré-estabelecidas quanto à qualidade química e microbiológica da água para irrigação, em especial a condutividade elétrica e Coliforme Termotolerantes, uma vez que, cada fonte apresenta uma qualidade distinta; águas superficiais possuem qualidade diferenciada das águas subterrâneas, bem como, águas subterrâneas também distinguem de águas residuárias.

Ou seja, a princípio, para o Cenário I, a irrigação deve observar as culturas praticadas em cada lote e, conseqüentemente, a água é distribuída para os Lotes Potencialmente Irrigáveis (LPI) de maneira a envolver o uso e a ocupação do solo quanto ao tipo de cultura.

Essa distribuição, em área, corresponde ao máximo em média a 120 hectares mensais conforme descrita na relação disponibilidade/demanda apresentada no item 5.1, Equação 15. Para tanto, tendo em vista que o reservatório não atende às áreas irrigadas totais do perímetro, a tomada de decisão quanto à fonte hídrica e que áreas deverão ser irrigadas é de suma importância para manutenção do perímetro e seu desenvolvimento. Sendo assim, adotando as restrições supracitadas quanto à importância da água que irriga e as culturas praticadas pelos irrigantes, construiu-se o Cenário I considerando, para este caso de estudo, apenas as atuais áreas irrigadas onde estão sendo produzidas culturas com a água dos poços ou somente no período chuvoso, que passariam a ser abastecidas com água superficial.

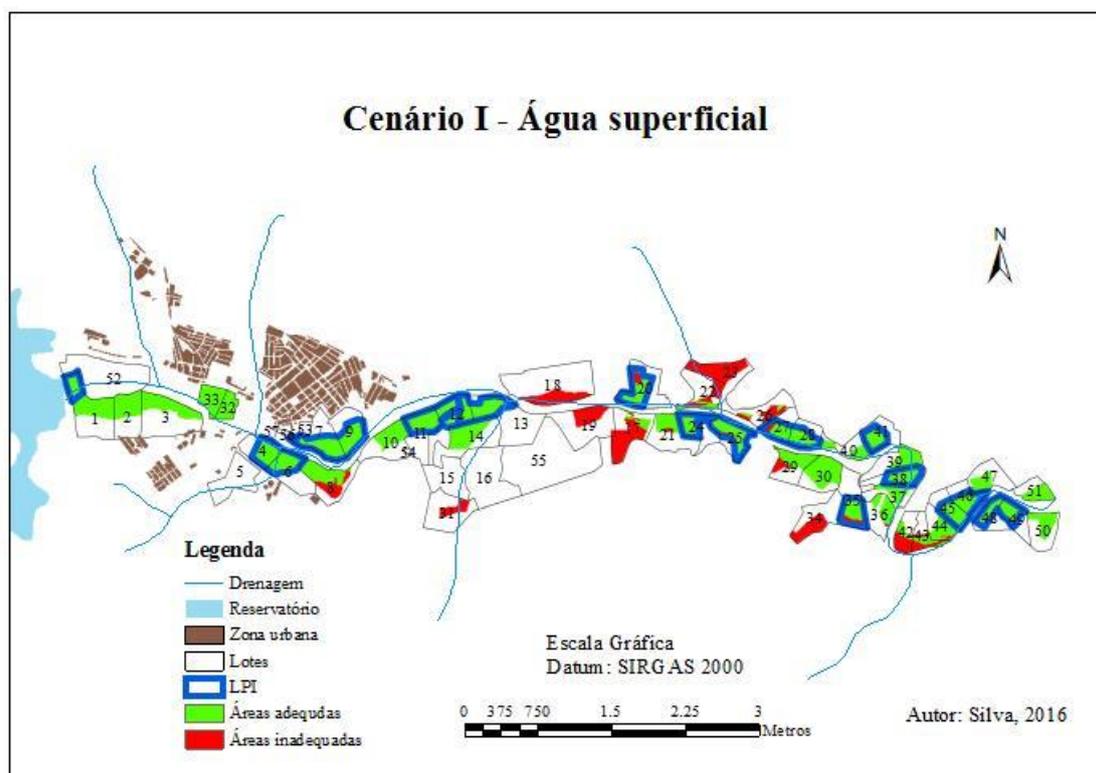
O Cenário I, apresenta um planejamento estratégico do uso do recurso hídrico superficial tendo em vista, a priori, as áreas irrigadas adequadas apontadas pelo modelo da Alternativa I. Nesse sentido, os lotes adequados foram apontados como LPI pelo fato de terem cultivado no decurso de 2015 ou atualmente praticado culturas que necessitam de uma água com uma qualidade química e microbiológica mais adequada. Após a crise hídrica vivenciada pelos irrigantes de Sumé, as práticas culturais têm-se mantido em menor escala, mas permanente por parte de alguns irrigantes a depender das condições climáticas. Portanto, para este cenário foram considerados os irrigantes remanescentes.

Assim, para o real estabelecimento do Cenário I, foram consideradas as seguintes prioridades na tomada de decisão quanto ao gerenciamento da demanda de água superficial, representado espacialmente na Figura 42.

***Lotes que atualmente cultivam ou cultivaram em 2015:***

- *Hortaliças como: tomate, pimentão e cebola.*
- *Frutíferas que desenvolvem rente ao solo: melancia e melão.*
- *Frutíferas como: goiaba e manga; banana.*
- *Feijão e milho.*
- *Capim ou outro tipo de cultura.*

Com base nesta ordem de prioridade, construiu-se espacialmente o seguinte cenário apresentado na Figura 42:



**Figura 42** - Cenário I: tomada de decisão quanto ao gerenciamento da água superficial.

Conforme demonstrado no Cenário I, nem todos os lotes do perímetro atualmente cultivam ou cultivaram em 2015 algum tipo de cultura das citadas acima, ou seja, há lotes sem cultivo algum. Sendo assim, algo em torno de 118 ha corresponde a LPI devido suas práticas agrícolas ainda permanecerem, o que atende a relação de disponibilidade/demanda.

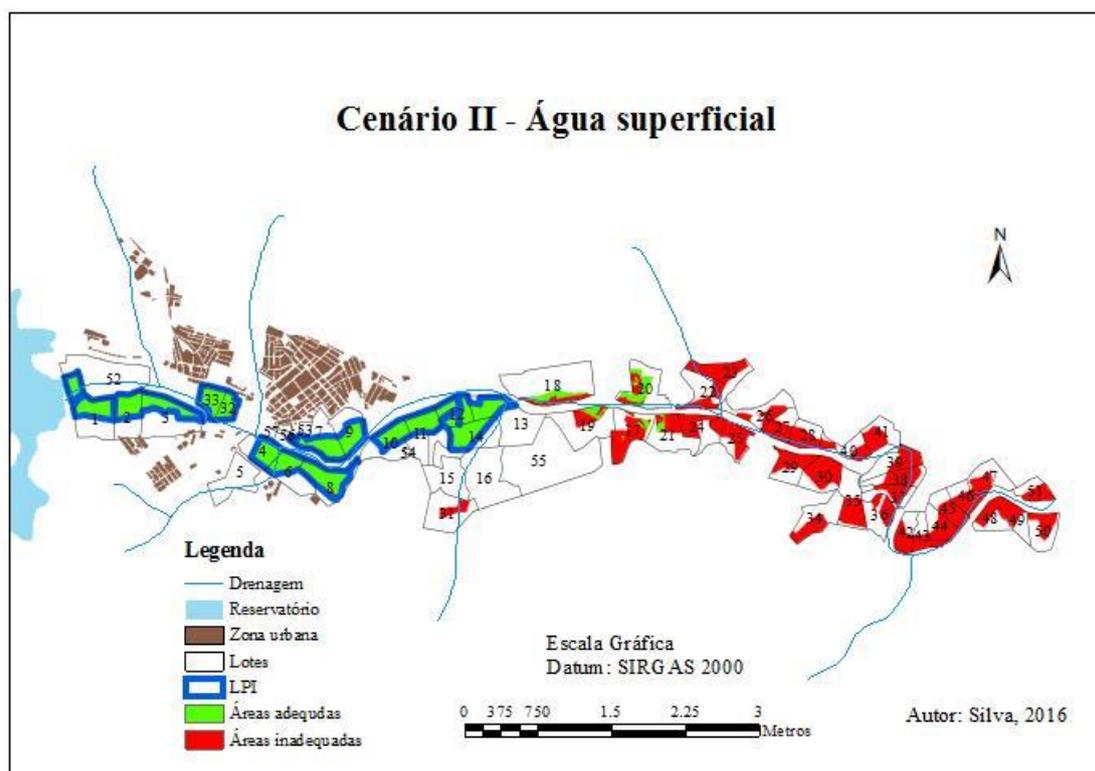
No entanto, algumas observações devem ser destacadas, como por exemplo:

- As culturas que atualmente ou no decurso de 2015 foram praticadas, em sua maioria correspondem a culturas de ciclos curtos, isso implica dizer que nem sempre a área irrigável do LPI permanecerá a mesma durante o ano.
- Nem todas as áreas irrigadas com culturas identificadas no momento da visita técnica apresentavam suas áreas integralmente cultivadas, sendo assim, tendo em vista o desejo de uma melhor representação espacial dos cenários, consideraram-se tais áreas irrigadas como sendo completamente irrigadas.
- Áreas irrigadas que contêm faixas de inadequação menores que 10%, foram considerados na cenarização desde que houvesse prática agrícola.

Portanto, com base no Cenário I, os lotes 4, 6, 7, 11, 12, 20, 24, 25, 27, 28, 35, 38, 41, 45, 46, 48, 49 e parte do lote 1, receberiam as águas advindas do reservatório. Neste caso, considerando na modelagem um maior peso para os critérios econômicos conforme Alternativa I, apresentada. Ressalve-se que, a disponibilidade de água é o fator crucial que contribui para a utilização integral ou parcial das áreas irrigadas por parte dos irrigantes que ainda cultivam; aspecto esse que demonstra a realidade e viabilidade do cenário acima.

Por outro lado, ao considerar os desafios técnicos no gerenciamento dos recursos hídricos, diante da necessidade de reativação do perímetro irrigado por água superficial, o cenário que melhor representa tal desafio surge da Alternativa II, apresentada na Figura 39. Nesse sentido, o Cenário II foi construído tomando por base as culturas praticadas no início do projeto do perímetro irrigado, que corresponde às hortaliças como tomate industrial e comercial, “carro-chefe”, e frutífera como melancia, melão e banana, que necessitam de uma água com condições químicas e microbiológicas melhores.

Neste segundo cenário, teríamos os LPI conforme apresentado na Figura 43. Aproximadamente 112 hectares seriam irrigados com água do reservatório de Sumé. Tais lotes são LPI devido ao fato de culturas como: tomate, cebola, alface e frutíferas, a exemplo da melancia, por situarem rente ao solo necessitam de uma água com níveis de Coliformes Termotolerantes e condutividade elétrica mais adequada para sua prática em relação a outros tipos de culturas.



**Figura 43** - Cenário II: tomada de decisão quanto ao gerenciamento da água superficial.

## 7.5 MODELAGEM MULTICRITÉRIO ESPACIAL – ÁGUA SUBTERRÂNEA

### 7.5.1 Aplicação do AHP

A construção da matriz de preferência quanto aos CT, CE e CA, para o uso das águas subterrâneas, fundamenta-se na realidade descrita no diagnóstico. A realidade apresentada demonstra um potencial hídrico quantitativo do aquífero aluvial. No entanto, a qualidade da água para este objetivo é fator preponderante para construção da matriz e o estabelecimento das escalas de intensidade de importância.

Para as águas subterrâneas, dois aspectos devem ser levados em consideração na construção do AHP: (i) a qualidade da água: as águas subterrâneas apresentam composição diferente da água superficial, conforme constatado no diagnóstico. A água subterrânea apesar de possuir condições de nitrato e microbiológica adequadas, elevadas concentrações de SDT e condutividade elétrica são encontradas na água, e em decorrência do uso sem o manejo adequado do solo, este tipo de situação pode ocasionar diversos problemas desde a salinização, e o mais grave, a desertificação; (ii)

não há enormes desafios técnicos para o uso da água subterrânea ao comparar com a água superficial. Pois os poços utilizados como fonte de irrigação estão localizados geralmente dentro das áreas irrigadas dos lotes, assim, não havendo necessidade de canais principais ou até mesmo de canais secundários para condução da água.

Neste contexto, o *raster* do CT compõe-se de dois atributos: proximidade das áreas irrigadas (PAI) (CT<sub>2</sub>) e da declividade do terreno (CT<sub>3</sub>), conforme apresenta Tabela 19:

**Tabela 19** - Comparação pareada dos atributos que compõe o CT, água subterrânea.

	CT <sub>2</sub>	CT <sub>3</sub>	Peso (%)	CR
CT <sub>2</sub>	1	0.333	25	
CT <sub>3</sub>	3	1	75	0,0

A Tabela 19 demonstra que a declividade do terreno exerce uma importância moderada em relação à proximidade das áreas irrigadas. Ou seja, não basta apenas as áreas irrigadas estarem próxima para compartilharem do mesmo poço, mas que, as áreas possuam declividades adequadas para favorecer a prática agrícola.

Para o CE, utilizou-se do mesmo *raster* CE da modelagem espacial da água superficial, ou seja, a mesma comparação entre os atributos: salinidade, fertilidade e sodicidade do solo.

Para o *raster* CA, realizou-se uma nova comparação tendo em vista a qualidade da água subterrânea. A Tabela 20, abaixo, apresenta a matriz de preferência para o CA, que considerou a qualidade da água (CA<sub>1,1</sub>) como um atributo extremamente importante em relação as classes do solo. A Tabela 20 apresenta a comparação dos atributos ambientais, evidenciada pela relevância da qualidade da água subterrânea quanto ao impacto ambiental de seu uso, tendo em vista observação dos parâmetros do diagnóstico realizado:

**Tabela 20** - Comparação pareada dos atributos que compõe o CA, água subterrânea.

	CA <sub>1,1</sub>	CA <sub>2</sub>	Peso (%)	CR
CA <sub>1,1</sub>	1	9	90	
CA <sub>2</sub>	0.111	1	10	0,0

Verdadeiramente, essa comparação fundamenta-se na importância da qualidade da água para irrigação, as condições microbiológicas e químicas da água permitem classificar o *raster* CA<sub>1.1</sub> como *marginalmente adequada*, devido aos níveis de SDT e condutividade elétrica presente na água dos poços contidos no aquífero aluvial, conforme mostra a Figura 44.



**Figura 44** - Classe de adequação da qualidade da água subterrânea para irrigação.

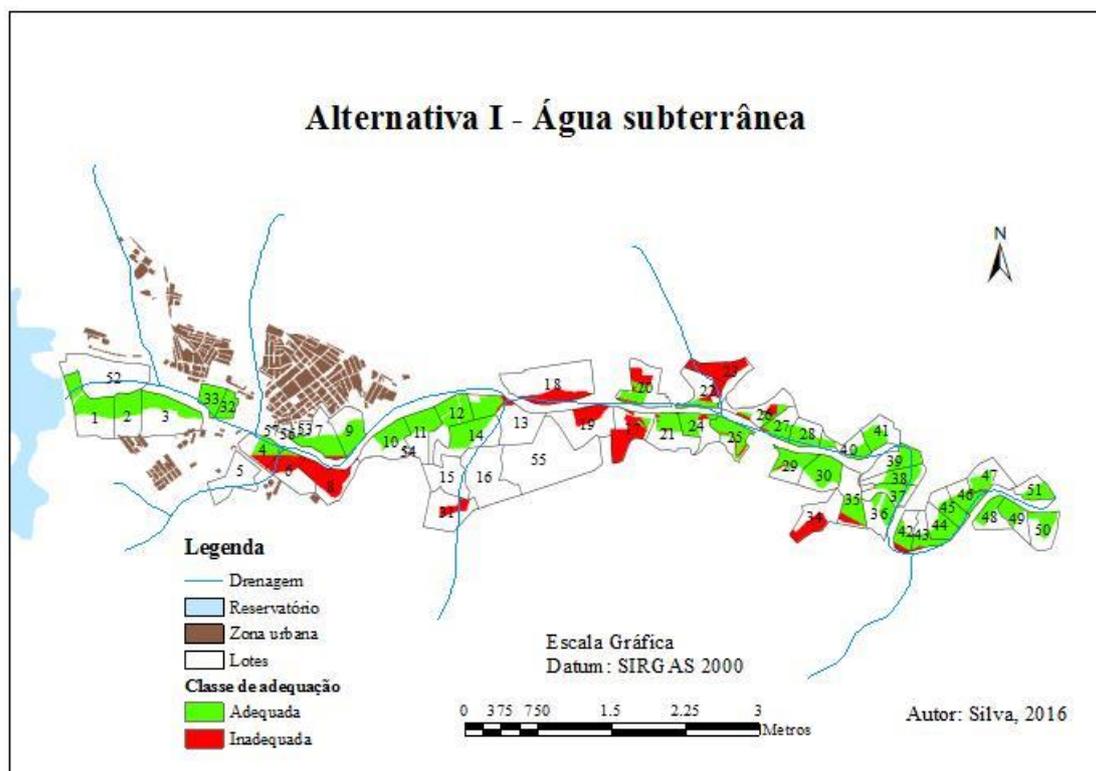
Após a construção dos *rasters* CT e CA, conforme a realidade das condições da água subterrânea, mediante a comparação dos CT, CE e CA, obteve-se a Alternativa I apresentada na Figura 45 a partir da comparação pareada apresentada na Tabela 21:

**Tabela 21** - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa I – Água subterrânea.

Alternativa I – Água subterrânea					
	CT	CE	CA	Peso (%)	CR
CT	1	0.111	0.143	5,49	
CE	9	1	3	65,536	0,077
CA	7	0.333	1	28,974	

A Alternativa I, Figura 45, apresenta uma preferência para o CE, seguido do CA, respectivamente, com estabelecimento de um peso de 65,536% e 28,974%. Essa comparação tem respaldo, ao entender que atributos como salinidade e fertilidade do solo desempenham papel fundamental no que diz respeito à irrigação e produção agrícola.

Neste contexto, a aplicação da *GIS-MCDA* indica que aproximadamente 68 hectares são inadequados para o uso da água subterrânea para esta preferência. Deve-se destacar a semelhança do resultado encontrado nesta alternativa, representado na Figura 45, com o resultado obtido pela Alternativa I da água superficial, representado na Figura 34. Verifica-se claramente uma semelhança entre os dois resultados, mesmo estabelecendo o CA como segundo mais valoroso para Alternativa I, água subterrânea, conforme Tabela 21. Para modelagem da água superficial, no que diz respeito ao estabelecimento da Alternativa I, o CA no modelo situa-se em terceiro lugar numa ordem de preferência, considerando a escala de intensidade de importância.



**Figura 45** - Alternativa I: modelagem espacial multicritério para água subterrânea.

As diferenças entre a Alternativa I, para água superficial, em relação à Figura 45 apresentada acima, demonstram que cerca de 6 hectares a mais foram considerados inadequados. Observa-se conforme figura acima, um maior crescimento da faixa de

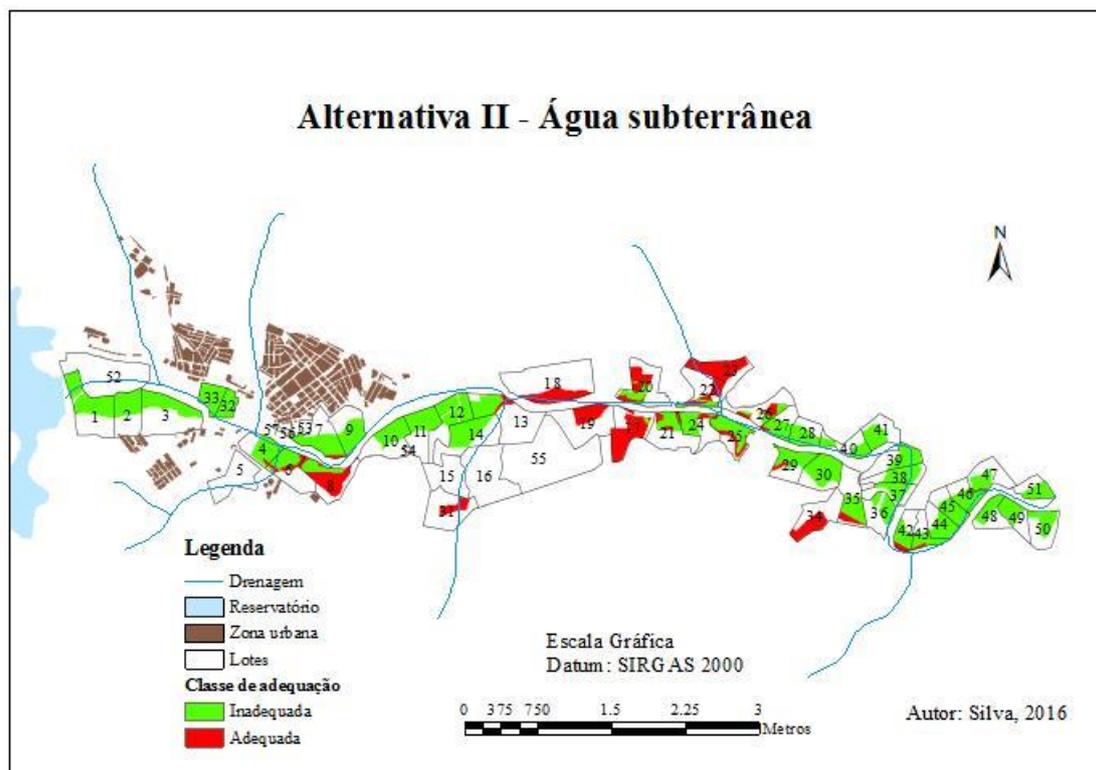
inadequação para a área irrigada do lote 20. Bem como a inadequação integral da área irrigada do lote 8, mais de 70% da área irrigada do lote 6 e parcialmente a área irrigada do lote 4. Nestes dois últimos lotes citados, as áreas irrigadas eram apresentadas como adequadas para Alternativa I da água superficial. Neste contexto, para Alternativa I em relação a água subterrânea, aproximadamente 218,33 hectares apresentaram-se como adequados para irrigação e 67,79 hectares inadequados.

Uma segunda alternativa foi criada para o uso da água subterrânea: Alternativa II, apresentada na Figura 46. Nesta, a comparação par a par evidenciou a importância do CA, seguido do CE. Utilizou-se dos mesmos *rasters*: CT, CE e CA, da Alternativa I da água subterrânea, mas com uma ordem de prioridade diferente, conforme pode ser observado na Tabela 22:

**Tabela 22** - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa II – Água subterrânea.

Alternativa II – Água subterrânea					
	CT	CE	CA	Peso (%)	CR
CT	1	0.143	0.111	5,49	
CE	7	1	0.333	28,974	0,077
CA	9	3	1	65,536	

A Alternativa II, apresentada na Figura 46, fundamentou-se no entendimento que o CA constituído do atributo qualidade da água é de suma importância, tendo em vista a os parâmetros analisados para esta fonte. Sendo assim, para o *raster* qualidade da água que compõe o CA, adotou-se como sendo marginalmente adequada, pois apesar de possuir níveis de coliformes termotolerantes adequados para cultivo de hortaliças e frutíferas, exige-se cuidados quanto ao uso deste recurso no perímetro, em decorrência da concentração de SDT e condutividade elétrica da água.



**Figura 46** - Alternativa II: modelagem espacial multicritério para água subterrânea.

Para esta ordem de prioridade estabelecida na Tabela 22, o modelo de *GIS-MCDA* aponta cerca de 65,80 hectares como inadequados e 220,32 hectares adequados para irrigação com água subterrânea. Ao comparar este resultado encontrado com a Alternativa I acima, da mesma fonte hídrica, observa-se uma redução de 2 hectares. Isto se justifica pelo fato do *raster* do CA não possuir faixas de inadequações, diferente do *raster* do CE, que possui faixas inadequadas; deste modo, quando aplicada às respectivas ponderações obtidas da comparação aos pares, estabelecendo o CA como mais valoroso seguido do CE, observa-se o resultado da Figura 46.

### 7.5.2 Cenário – Tomada de decisão: gerenciamento da demanda de água subterrânea para irrigação

A cenarização quanto ao uso da água subterrânea deve observar três aspectos valiosos:

- I. *A qualidade da água superficial em relação à água subterrânea*: conforme constatado no diagnóstico, a qualidade da água superficial é melhor que a da subterrânea. Dos dois recursos, irrigar com água do reservatório minimiza os

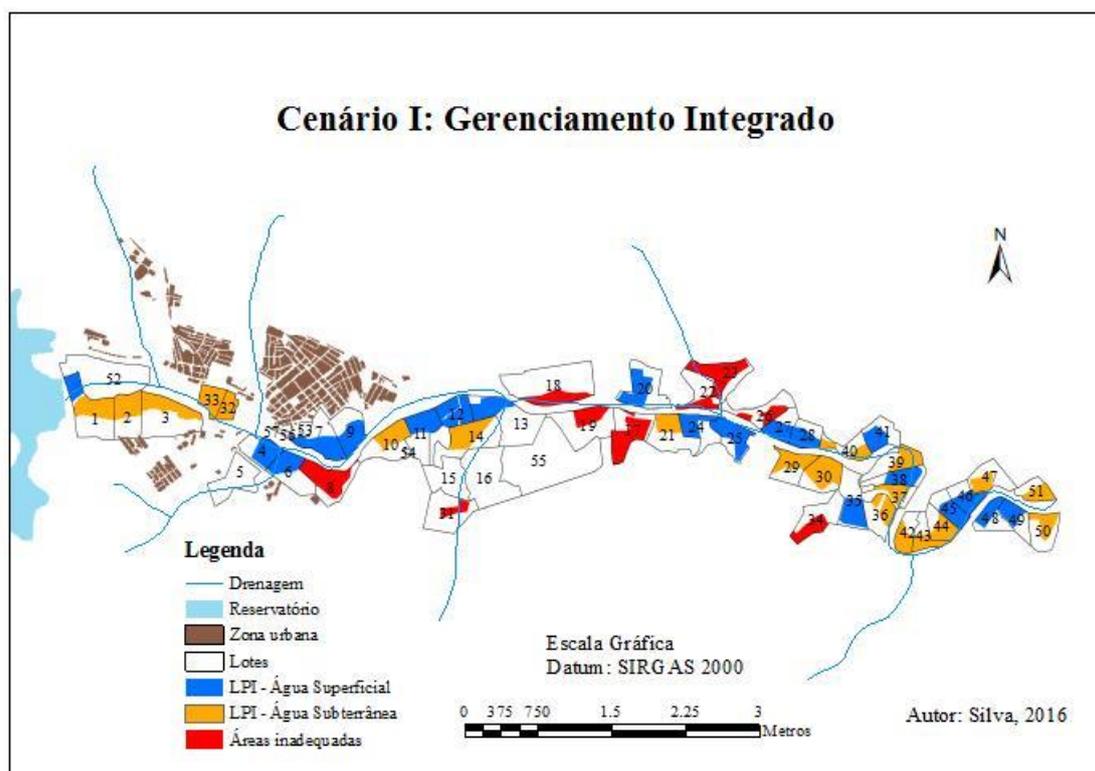
risco de salinização do solo em decorrência dos níveis adequados de SDT e condutividade elétrica;

- II. *As águas subterrâneas como reservas hídricas:* as águas subterrâneas correspondem a um recurso que deve ser utilizado de forma estratégica e em situações de escassez hídrica, principalmente, quando não houver disponibilidade de água superficial e residuária para irrigação. No entanto, para este caso de estudo, por considerando que a água do reservatório não é suficiente para abastecer o perímetro, faz-se necessário o uso da água subterrânea de forma integrada.
- III. *As atuais culturas praticadas no perímetro irrigado:* existe uma relação direta entre a cultura praticada e o recurso a ser utilizado. Neste contexto, considerando as práticas culturais utilizadas como hortaliças a exemplo do tomate, e frutíferas como melão, tais áreas devem a priori ser irrigadas com água proveniente do reservatório.

Diante o que foi exposto, considerou-se a necessidade da construção de um cenário que possibilitasse o uso integrado dos dois recursos (água superficial e subterrânea). Para este cenário integrado, adotou-se o Cenário I da água superficial apresentado na Figura 42 com seus respectivos Lotes Potencialmente Irrigáveis (LPI). Bem como a convergência na distribuição das áreas inadequadas entre os resultados obtidos para as Alternativas I das águas superficial e subterrânea.

Para obtenção de um novo cenário em que se evidencia o uso da água subterrânea no perímetro irrigado, fez-se necessária a sobreposição do Cenário I da água superficial (devida sua prioridade já mencionada) na Alternativa I da água subterrânea, conseqüentemente, admitindo as áreas irrigadas adequadas da Alternativa I, criou-se o cenário integrado apresentado na Figura 47:

Neste contexto, além de considerar os aspectos enumerados acima, que dizem respeito à qualidade da água superficial e subterrânea e às culturas praticadas, merece destaque a disponibilidade hídrica do aquífero, pois conforme destacado no diagnóstico, são passíveis de irrigação mensalmente cerca 150 hectares. A Figura 47 abaixo demonstra os Lotes Potencialmente Irrigáveis com a Água Superficial (LPI – Água Superficial), e especialmente, os Lotes Potencialmente Irrigáveis com Água Subterrânea (LPI – Água Subterrânea) advindo da sobreposição do plano de informações:



**Figura 47** - Cenário I: tomada de decisão quanto ao gerenciamento integrado da água superficial e subterrânea.

Como observado na Figura 47, para promover a *meta* que corresponde ao gerenciamento integrado dos recursos hídricos no perímetro irrigado, foram fundamentais informações quanto à qualidade e quantidade do recurso disponível para irrigação. Neste sentido, conforme ressalvas mencionadas nos aspectos citados acima, e considerando (i) as faixas de inadequação em comum encontradas nas Alternativas I das águas superficial e subterrânea, (ii) partindo do princípio da quantidade possível de irrigar com os respectivos recursos mencionados, logo, aproximadamente 118 hectares foram destinados para irrigação com água superficial, 112 hectares para água subterrânea e 58 hectares inadequados para uso seja de água superficial ou subterrânea, o que corresponde aos lotes: 8, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 31 e 34.

## 7.6 MODELAGEM MULTICRITÉRIO ESPACIAL – ÁGUA RESIDUÁRIA

Para formulação desta alternativa, que diz respeito ao uso das águas residuárias vindas da ETE de Sumé, tomaram-se por base os oito atributos já apresentados nos itens 7.1, 7.2 e 7.3 que dispõem sobre os critérios que influenciam diretamente no gerenciamento dos recursos hídricos no perímetro irrigado. No entanto, os atributos de

proximidade da ETE às áreas irrigadas (critério técnico) e qualidade da água (critério ambiental) foram adaptados para o objetivo, conforme modelagem espacial vista na Figura 11.

Para este objetivo, foi adicionado, por se julgar útil ao se tratar do gerenciamento das águas residuárias no perímetro, a presença do aquífero aluvial; entendendo três aspectos pertinentes para construção do referido *raster*: (i) a possível contaminação do aquífero aluvial em decorrência da irrigação com efluentes nas áreas irrigadas com as devidas concentrações apresentadas nas Figuras 20, 21, 22 e 23; este aspecto mencionado pode ser agravado devido às (ii) baixas profundidades característica de um aquífero aluvial; além do fato que os (iii) solos aluviais apresentam características de solos flúvico com textura argila-arenoso com maior teor arenoso, o que de certa forma possibilita uma maior velocidade de percolação chegando a atingir o manancial subterrâneo em relação aos solos de caráter textural argiloso que retêm a velocidade de percolação. Nesse sentido, com base em consulta de especialistas e visita a campo foi possível construir o seguinte *buffer* tomando como base o aquífero aluvial, conforme a Figura 48:



**Figura 48** - Classe de adequação para irrigação com água residuária nas áreas irrigadas (CA<sub>PAIAA</sub>).

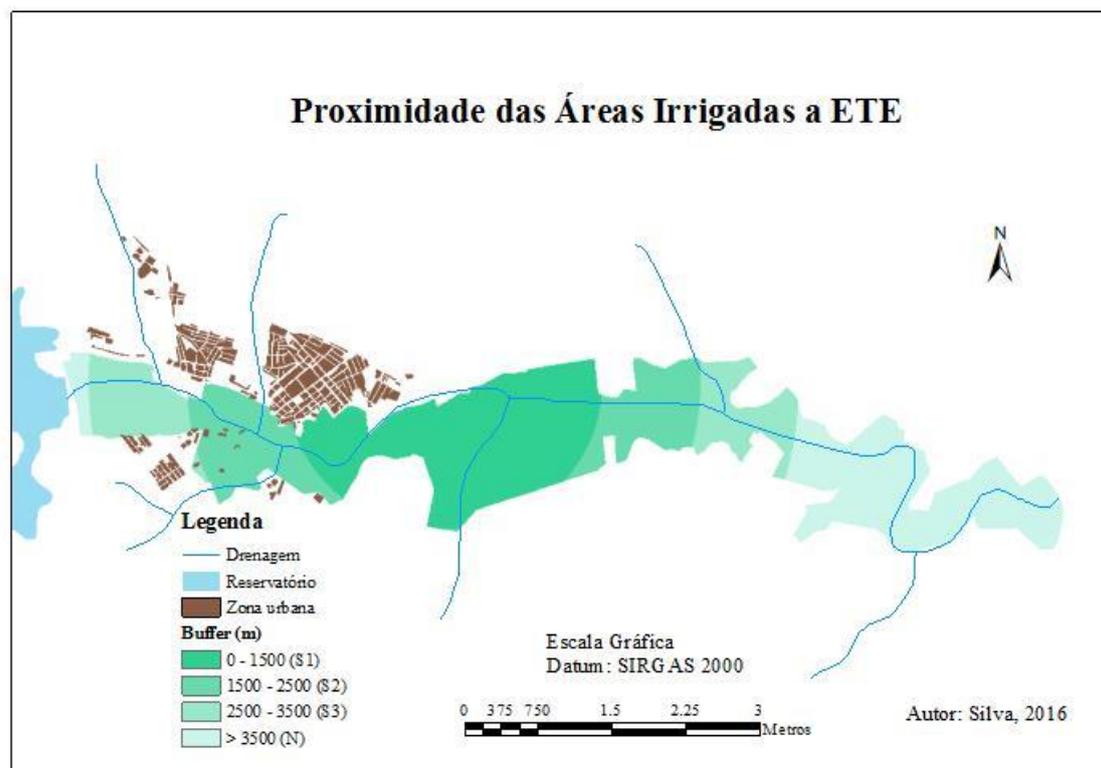
Observa-se acima que quanto mais distantes as áreas irrigadas do aquífero aluvial, mais adequada torna-se a área irrigada.

Outro atributo que sofreu alterações, como já mencionado, de acordo com o objetivo de estudo, refere-se à proximidade das áreas irrigadas à ETE. Este atributo é de suma importância, sendo apresentado por diversos autores como Pedrero *et al.* (2011), Anane *et al.* (2012) e Brahim-Neji e Turki (2015) ao discutirem local de recarga de aquíferos e irrigação com águas residuárias tratadas em áreas irrigadas.

Sendo assim, neste caso de estudo, tal critério partiu do ponto de vista dos desafios técnicos existentes para irrigação com águas residuárias; são desafios devidos à necessidade de manutenção da infraestrutura tendo vista uma possível implementação de projeto de irrigação com tubulações e condutos que levariam águas residuárias as áreas irrigadas do perímetro irrigado de Sumé. Na verdade, esta situação ocorre em áreas irrigadas presentes em lugares como na Tunísia. A distância de tais áreas à fonte hídrica influencia diretamente na manutenção e desfavorece áreas irrigadas mais distante da ETE (ANANE *et al.*, 2012; BRAHIM-NEJI e TURKI, 2015). Pedrero *et al.* (2011) em estudos de recarga de aquíferos destaca que quando o comprimento da tubulação de transporte da água residuária da ETE aos locais de infiltração superam 8 km de distância, tais áreas tornam-se inadequadas para recarga.

Os desafios técnicos são agravados ainda mais devido ao fato da qualidade da água residuária tratada influenciar na eficiência de condução da água nos condutos. Neste sentido, faz-se necessário também considerar a qualidade química e microbiológica na tomada de decisão quanto à abrangência das classes de adequações para tal atributo, de modo que quanto mais distante a área irrigada da ETE maior torna-se as dificuldades do gerenciamento da água. Fatores como elevada presença de substâncias químicas dissolvidas na água de irrigação como carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e sulfeto de cálcio ( $\text{CaS}$ ) podem precipitar e eventualmente formar incrustações nas paredes das tubulações e emissores, retendo a passagem de água (RIBEIRO *et al.*, 2005). Para água residuária tratada com pH superiores a 8, como é o caso de informações da ETE de Sumé, conforme observado em algumas amostras (Figura 23) torna-se mais susceptível a ocorrência de obstrução de emissores (BUCKS e NAKAYAMA, 1986). Elevada presença de microrganismos como as bactérias ferruginosas presentes em águas residuárias também podem levar a criação da ferrugem (limo ferroso) (MATSURA *et al.*, 1989).

Assim, com base na consideração de tais informações e com a consulta a especialistas, construiu-se o seguinte *raster* com o critério da proximidade das áreas irrigadas a ETE, apresentado na Figura 49:



**Figura 49** - Proximidade das Áreas Irrigadas a ETE (CT<sub>PAIETE</sub>).

Além deste último atributo citado (PAIETE), outro atributo que também sofreu ajustes quanto à classe de adequação para aplicação do *GIS-MCDA*, corresponde ao *raster* que representa a espacialização da qualidade da água residuária. Para este atributo foram consideradas as informações de uso do solo no perímetro quanto ao tipo de cultura praticada apresentada no Quadro 1, bem como as condições químicas e microbiológicas apresentadas para águas residuárias. Assim, com base numa relação que envolve qualidade de água residuária e as culturas praticadas no perímetro irrigado, considerou-se, a princípio, que as águas residuárias tratadas pela ETE irrigariam as culturas tendo em vista a qualidade microbiológica quanto à presença de Coliformes Termotolerantes. Neste contexto, a WHO (2006) estabelece padrões de uso de águas residuárias tratadas para irrigação quanto ao tipo de cultura.

Tomando por base a informação referente ao nível de Coliformes Termotolerantes presentes na água tratada pela ETE de Sumé conforme Figura 16, na qual é visto que os níveis de tal parâmetro situam-se em geral acima de  $10^3$  e com

valores que não superam  $10^4$  UFC/100 mL, as indicações propostas pela WHO (2006) para irrigação irrestrita são neste caso de cultivo de culturas altas utilizando irrigação por gotejamento, ou seja, excluem-se o cultivo de raízes, e hortaliças como tomate, pois suas partes são consumidas cruas; bem como frutíferas como melancia na qual suas partes colhidas se desenvolvem rente ao solo.

Com uma concentração de patógenos superior a  $10^3$  UFC/100 mL, torna-se mais adequado quanto aos parâmetros sanitários a prática de culturas como: milho, feijão e capim. Para o caso de estudo apenas os lotes que atualmente praticam ou praticaram em 2015, essencialmente, tais culturas, receberiam águas residuárias tratadas em decorrência do elevado nível de Coliformes Termotolerantes nas amostras de água. Assim, reduzindo o grau do risco de contaminação ao consumidor devido à presença de patógenos acima do limite permissível pela WHO.

Assim, construiu-se o seguinte *raster*/atributo (qualidade da água residuária) que considerou como *Inadequadas* dentro processo *GIS-MCDA* as áreas irrigadas onde costumeiramente têm sido cultivada hortaliças ou frutíferas que se desenvolvem rente ao solo em maiores quantidades de área. Em relação a outros tipos de culturas como: milho e feijão, ou áreas que estão atualmente sem cultivo, foram tomadas como *Marginalmente adequadas*, pois por mais que possam receber água em decorrência da cultura praticada (milho e feijão) isto com base no parâmetro microbiológico, os níveis elevados de SDT e condutividade elétrica deveram ser considerados nesta análise. As restrições consideradas para a Figura 50 fundamentou-se, portanto, no risco de possível contaminação de tais culturas consumidas cruas com patógenos quando irrigadas com água residuária tratada, bem como da avaliação dos níveis de SDT e condutividade elétrica observados.



**Figura 50** - Classe de adequação da qualidade da água residuária para irrigação (CA<sub>1.2</sub>).

Após a adequação dos critérios ao objetivo, construiu-se a matriz de comparação aos pares mediante consulta a especialistas, bem como mediante constatação de informações com visita de campo.

### 7.6.1 Aplicação da AHP

A aplicação da AHP nesta alternativa sustenta-se na necessidade de encontrar o melhor gerenciamento considerando a comparação dos critérios técnicos, econômicos e ambientais para uso da água residuária. A depender do recurso hídrico é que verdadeiramente se formulam tais comparações. Neste sentido, por se tratar de água residuária, as ponderações são valiosas, pois devem considerar um peso maior para a qualidade da água devida aos parâmetros microbiológico e químico que compõem o CA, além de compreender a relação entre SDT, condutividade elétrica da água e o solo do perímetro.

Portanto, na primeira comparação, os critérios ambientais (CA) deve apresentar maior relevância em relação aos demais, pois existe uma correlação direta entre a cultura praticada, o solo e qualidade do recurso hídrico. Diante tais afirmações formulou-se a matriz de comparação apresentada na Tabela 23:

**Tabela 23** - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa I - Água residuária.

	CT	CE	CA	Peso (%)	CR
CT	1	0.333	0.2	10,473	
CE	3	1	3	25,828	0,037
CA	5	3	1	63,699	

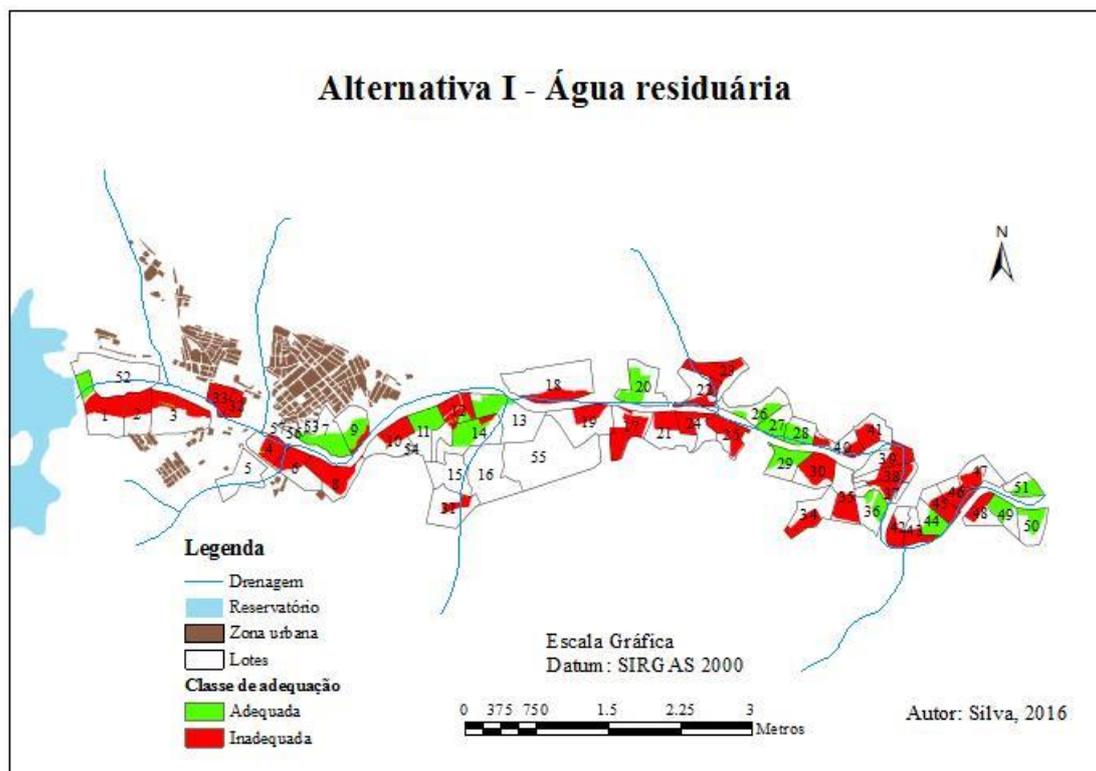
Conforme observado na Tabela 23, a comparação entre os critérios permitiu a construção de um maior peso (63,699%) para o critério ambiental em relação ao econômico (25,828%). Esta comparação representa uma realidade que favorece a observação em especial da qualidade da água para irrigação. Foram utilizadas as mesmas ponderações na construção do *raster* CE referente ao objetivo da água superficial; bem como, houve a mesma comparação adotada para água superficial na obtenção do *raster* CT, com alteração apenas do *raster* que compõe a proximidade das áreas irrigadas a ETE.

A construção da matriz referente ao *raster* CA apresentada na Tabela 24, para Alternativa I, envolveu três *rasters*/atributos: o *raster* que corresponde a qualidade da água residuária (efluente) (CA<sub>1.2</sub>) apresentado na Figura 50, a proximidade das áreas irrigadas ao aquífero aluvial (CA<sub>PAIAA</sub>) (Figura 48) e a classe do solo (CA<sub>2</sub>).

**Tabela 24** - Comparação pareada dos atributos do CA referente à água residuária.

	CA <sub>1.2</sub>	CA <sub>PAIAA</sub>	CA <sub>2</sub>	Peso (%)	CR
CA <sub>1.2</sub>	1	7	9	78,539	
CA <sub>PAIAA</sub>	0.143	1	3	14,882	0,077
CA <sub>2</sub>	0.111	0.333	1	6,579	

Portanto, com base na comparação aos pares estabelecidas a princípio da Tabela 24 e, posteriormente, na Tabela 23 conforme modelagem *GIS-MCDA* proposta, obteve-se a Alternativa I conforme apresentada Figura 51:



**Figura 51** - Alternativa I: modelagem espacial multicritério da água residuária.

Para esta alternativa apresentada da Figura 51, uma área de 88,35 hectares apresentou-se adequada, e 197,77 hectares inadequados. Como mencionado, para tais áreas tidas como adequadas, deve-se enfatizar a prática de culturas como: milho, feijão e capim, tendo em vista a importância da qualidade da água representada por um peso de 78,539% dentro do CA que compõe o objetivo proposto, irrigação com água residuária.

Ao comparar os CE, CT e CA, as relações de escala de intensidade de importância possibilitou o estabelecimento de maior peso ao CA (63,699%). Obtendo-se claramente um resultado semelhante ao *raster* representado pela qualidade da água residuária da Figura 50, com um acréscimo da faixa de adequação nos lotes 9 e 14. Para os referidos acréscimos apontados pelo modelo, é fundamental observar as melhores culturas para esta fonte hídrica.

Por outro lado, ao estabelecer uma maior escala de intensidade de importância na comparação aos pares para o CE, composto pelo atributo salinidade do solo, este quadro quanto à classe de adequação é modificado, conforme mostra Alternativa II na Figura 52. Tal fato configura-se devido a *GIS-MCDA* apontar em específico para áreas em que a condutividade elétrica do solo situa-se como altamente adequada, (entre 0 e 2

dS/m), além de considerar as áreas adequadas quanto ao parâmetro referente à adequação aos Coliformes Termotolerantes (que é um dos fatores de maior importância na construção do *raster* de qualidade da água). Observa-se também, neste caso, uma evidência para a relação qualidade da água e o solo. Em relação à condutividade elétrica da água residuária, os níveis situam-se superior a 0,70 dS/m, segundo Ayers e Westcot (1985) este nível corresponde a um grau de restrição de uso de ligeiro a moderado impacto, bem como uma água com SDT, superior a 1000 mg/L encontra-se também neste grau de restrição de uso.

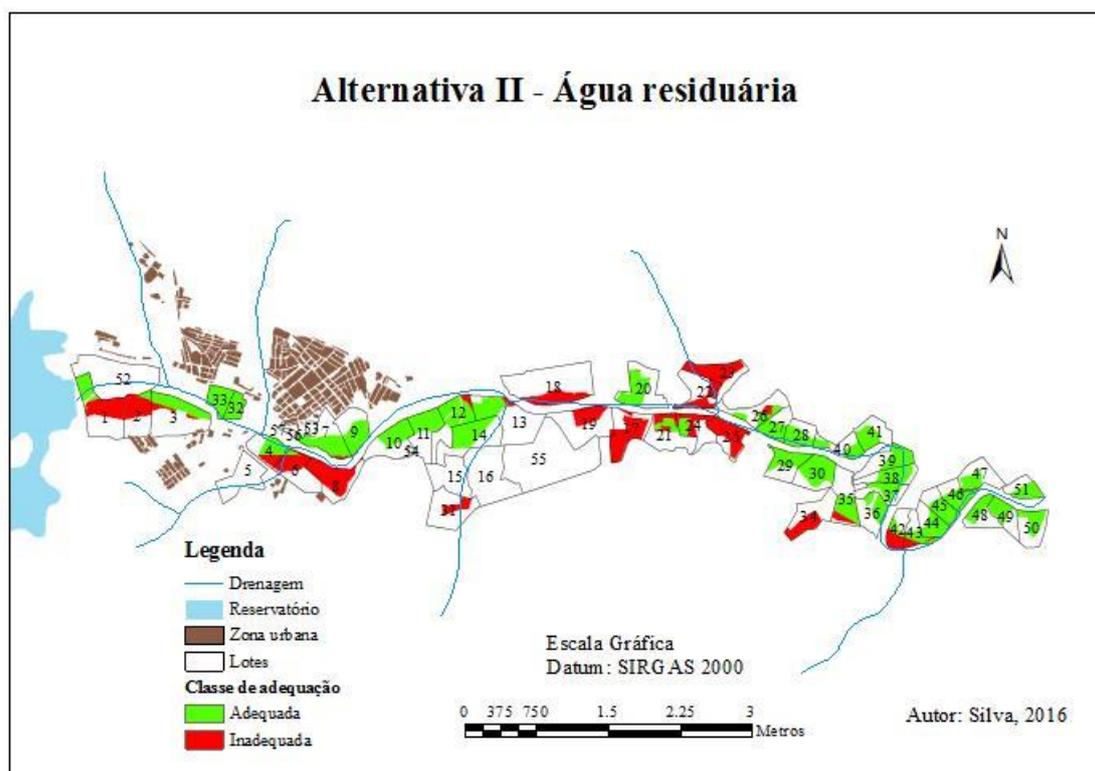
Sendo assim, ao definir uma relação de escala de intensidade de importância apresentada na Tabela 25 que favorece os critérios CE: fertilidade, salinidade e sodicidade do solo, abre-se margem para um maior número de áreas adequadas possíveis de serem irrigadas, devido ao fato de haver uma considerável quantidade de área irrigável classificada como altamente adequada convergente entre os três atributos/critérios mencionados.

**Tabela 25** - Comparação pareada dos CT, CE e CA, Alternativa II - Água residuária.

	CT	CE	CA	Peso (%)	CR
CT	1	0.2	0.333	10,473	
CE	5	1	3	63,699	0,037
CA	3	0.333	1	25,828	

Portanto, tomando como base a comparação expressa na Tabela 25, surge então a já mencionada Alternativa II, Figura 52, ao comparar novamente os critérios em busca de uma nova realidade.

Nesta alternativa, observa-se um aumento real na quantidade de áreas ditas adequadas (em relação à Alternativa I), cerca de aproximadamente 188 hectares, reflexo este característico do critério econômico. Pois quanto maior o número de áreas adequadas em relação ao critério econômico, há uma possibilidade real de maior produtividade agrícola, pois o critério ambiental é bem mais restritivo em relação aos CE e CT para uso desta fonte.



**Figura 52** - Alternativa II: modelagem espacial multicritério da água residuária.

Para Alternativa II, uma área de aproximadamente 98 hectares foi apresentada como inadequada. Número esse bem maior que as áreas inadequadas encontradas ao modelar os recursos hídricos: superficial e subterrâneo com a preferência dada ao CE. Essa comparação entre esses resultados é de suma importância pelo fato do peso para o critério econômico das águas superficial, subterrânea e residuária serem próximos, respectivamente, 65,536%, 65,536% e 63,699%, o que ressalva de forma clara a importância do modelo quanto ao cuidado no uso das águas residuárias da ETE de Sumé no perímetro.

Como observado, a Alternativa II para este objetivo apresentou novas áreas adequadas, além das já apresentadas na Alternativa I. Na Alternativa I como supracitado, apenas as áreas irrigadas que cultivam ou cultivaram em 2015, milho, feijão ou capim, foram indicadas como adequadas, além dos lotes 9 e 14. No entanto, na Alternativa II, novas áreas foram apresentadas como adequadas além das já existentes da Alternativa I. Nesse sentido, lotes como, por exemplo, 32 e 33 que atualmente estão sem cultivo e que no início do projeto era cultivado essencialmente com hortaliças, poderiam receber água residuária da ETE, porém, com uma possível irrigação e cultivo

de culturas altas, sejam milho, capim e/ou frutíferas como: mamão, banana e goiaba que não se desenvolvem rente ao solo, isto por gotejamento como preconiza a WHO (2006).

Para este objetivo, devido não haver informações suficientes, como a vazão de água tratada pela ETE de Sumé, não houve a cenarização para as duas alternativas modeladas e apresentadas neste objetivo.

## 8.0 CONCLUSÕES

- A aplicação do AHP em SIG possibilitou a construção de alternativas e cenários que auxiliam na tomada de decisão quanto ao manejo da água no perímetro irrigado.
- O diagnóstico qualiquantitativo dos recursos hídricos, aliado a análise multicritério espacial, demonstrou que para o desenvolvimento integral do perímetro é fundamental no mínimo o uso de duas fontes hídricas.
- A qualidade da água é fator preponderante no gerenciamento dos recursos hídricos do perímetro, a depender da fonte hídrica há uma menor ou maior faixa de inadequação.
- Algumas áreas irrigadas independente do tipo de recurso hídrico permanecem inadequadas, devido principalmente aos níveis salinidade do solo.
- O gerenciamento integrado qualiquantitativo do perímetro pode ser realizado com irrigação de 118 ha de água superficial e 112 ha de água subterrânea; e 58 ha são inadequados para uso dessas duas fontes.
- A irrigação com água residuária apresenta alternativas com maior faixa de inadequação em relação aos três recursos modelados.

## 9.0 RECOMENDAÇÕES

- Utilização de dados mais recentes quanto aos parâmetros que compõem os atributos como: fertilidade do solo, salinidade e sodicidade, uma vez que, tais parâmetros utilizados nesta modelagem foram de Brasil (2007), bem como, há necessidade da coleta de um número maior de amostras em relação aos parâmetros para uma melhor precisão nos resultados dos mapas critérios;
- Criação de novos cenários que configurem o uso integrado no perímetro: água superficial e água residuária; água residuária e água subterrânea; e água superficial, subterrânea e residuária;
- A construção do mapa critério consiste numa atividade complexa dentro do AHP, tendo em vista que depende da importância dada aos atributos pelo tomador de decisão ou especialista, assim, pode haver a diferença nas classes de adequação obtidas das alternativas encontradas, nesse sentido, faz-se necessário comparar as alternativas encontradas considerando a realidade do problema.
- Utilização de um mapa critério de solo, que represente a heterogeneidade da textura solo contido no perímetro irrigado, tendo em vista que a classificação utilizada apresenta condições gerais.
- A condutividade elétrica da água subterrânea representa uma informação valiosa no gerenciamento dos recursos hídricos para irrigação. Nesse sentido, faz-se necessário um número maior de poços monitorados quanto à qualidade físico-química para construir um mapa critério de condutividade elétrica da água subterrânea com resultados confiáveis, possíveis de serem utilizados no *GIS-MCDA*.

## 10.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA (AESAs). **Recursos Hídricos** – Monitoramento da Qualidade da Água dos Açudes. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Encarte Especial sobre Crise Hídrica – Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Informe 2014. Brasília: Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR), 2015. 30p.

AHRENDs, H.; MAST, M.; RODGERS, CH.; KUNSTMANN, H. Coupled hydrological-economic modelling for optimised irrigated cultivation in a semi-arid catchment of West Africa. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 385-395, 2008.

AKINCI, H. OZALP, A. Y.; TURGUT, B. Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP technique. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 71-82, 2013.

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S. E SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 136-141, 2002.

ALBUQUERQUE, C. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; JÚNIOR, R. V. P. F. Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 1, p. 60-71, 2015.

AMORIM, J. R. A.; CRUZ, M. A. S.; RESENDE, R. S.; BASSOI, L. H.; FILHO, J. G. S. **Espacialização da Porcentagem de Sódio Trocável do Solo no Perímetro Irrigado Califórnia, em Canindé de São Francisco, Sergipe**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. n. 61. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. 17p.

ANANE, M.; BOUZIRI, L.; LIMAM, A.; JELLALI, S. Ranking suitable sites for irrigation with reclaimed water in the Nabeul Hammamet region (Tunisia) using GIS and AHP-multicriteria decision analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 65, p. 36-46, 2012.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.; Water quality for agriculture. **Irrigation and Drainage Paper**, n. 29, Rev 1, FAO, Rome, 1985. 174p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture. **Irrigation and Drainage Paper**, n. 29, FAO, Rome, 1976. 97p.

AZIZUR, R. M.; RUSTEBERG, B.; GOGU, R. C.; FERREIRA, J. P. L.; SAUTER, M. A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. **Journal of Environmental Management**, v. 99, p. 61-75, 2012.

BAKOPOULOU, S., POLYZOS, S., KUNGOLOS, A. **Investigation of farmers' willing-ness to pay for using recycled water for irrigation in Thessaly region, Greece.** *Desalination* 250, p 329–334, 2010.

BARROS, S. V. A. **Otimização dos usos múltiplos em pequenos açudes na bacia do açude de Sumé - PB.** 2010. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

BASTOS, R. K. X.; KIPERSTOK, A.; CHERNICHARO, C. A. L.; FLORENCIO, L.; MONTEGGIA, L. O. SPERLING, M. V.; AISSE, M. M.; BEVILACQUA, P. D.; PIVELI, R. P. **Subsídios à regulamentação do reuso da água no Brasil.** Artigos técnicos. DAE, p. 50-62, 2008.

BOROUSHAKI, S.; MALCZEWSKI, J. Implementing an extension of the analytical hierarchy process using ordered weighted averaging operators with fuzzy quantifiers in ArcGIS. **Computers & Geosciences**, v. 34, p. 399-410, 2008.

BOROUSHAKI, S.; MALCZEWSKI, J. Using the fuzzy majority approach for GIS-based multicriteria group decision-making. **Computers & Geosciences**. v. 36, p. 302-312, 2010.

BRAGA, C. F. C.; RIBEIRO, M. M. R. Avaliação por Múltiplos Critérios e Decisores de Alternativas de Gerenciamento da Demanda de Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 11. n.1, p. 37-49, 2006.

BRAHIM-NEJI, H. B.; RUIZ-VILLAVERDE, A.; GONZÁLEZ-GÓMEZ. Decision aid supports for evaluating agricultural water reuse practices in Tunisia: The Cebala perimeter. **Agricultural Water Management**, v. 143, p. 113–121, 2014.

BRAHIM-NEJI, H. B.; TURKI, S. Y. GIS – based multicriteria decision analysis for the delimitation of an agricultural perimeter irrigated with treated wastewater. **Agricultural Water Management**, v. 162, p. 78-86, 2015.

BRAMAR. **Relatório de Análise físico-química e microbiológica da água dos poços do aquífero aluvial de Sumé e das Práticas culturais no Perímetro Irrigado.** UFCG. Projeto Bramar, 2016.

BRASIL. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **A Questão da Água no Nordeste.** Agência Nacional de Águas. Brasília, DF: CGEE, 2012. 431p.

BRASIL. **Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Diário Oficial da União, Brasília, 9 de jan. 1997. Seção 1, p.470.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Elaboração de diagnóstico e plano de desenvolvimento do perímetro irrigado Sumé.** v. 1. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2007. 206p.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S. **Trickle irrigation for crop Production: design, operation and management.** Amsterdam: Elsevier, 1986, 163p.

CADIER, E. **Hidrologia das pequenas bacias do Nordeste semiárido: transposição hidrológica.** SUDENE, Recife, 1994. 373p.

CANTALICE, L. R. **Gestão hídrica do reservatório Sumé-PB: potencialidades e fragilidades**. 2009. 81f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. *In*: FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (eds). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. *In*: \_\_\_\_\_. **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CARVALHO, J. R. M.; CURI, W.F. **Índice de sustentabilidade para municípios: Uma abordagem utilizando a análise multicriterial**. XV Seminário em Administração (SEMEAD), São Paulo, out. 2012.

CEBALLOS-SILVA, A.; LÓPEZ-BLANCO, J. Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico. **Agricultural Systems**. v. 77, p. 117–136, 2003.

CHEN, Y.; YUA, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, p. 1582-1591, 2010.

CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. The spatial framework for weight sensitivity analysis in AHP-based multi-criteria decision making. **Environmental Modelling & Software**, v. 48, p. 129-140, 2013.

COLACECI, F.; LOMBARDO, C. MINCIARDI, R.; ROBBA, M.; SACILE, R. Filling the information gap between water systems and decision makers in the sustainable development of a territory. *In*: MEIRE, P.; COENEN, M.; LOMBARDO, C.; ROBBA, M.; SACILE, R. (eds.). **Integrated Water Management: Practical Experiences and Case Studies**. **Earth and Environmental Sciences**. v. 80, p. 11-21, 2008.

CONCEIÇÃO, F. T.; MAZZINI, F.; MORUZZI, R. B.; NAVARRO, G. R. B. Influências Naturais e Antrópicas na Qualidade da Água Subterrânea de Poços de Abastecimento Público na Área Urbana de Marília (SP). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 227-238, 2014.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 357 de 17 de março de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005, n. 053, p. 58-63.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 54 de 28 de Novembro de 2005**. Diário Oficial da União, Brasília, 9 set. 2005.

COSTA, R. S. **Avaliação multiobjetiva de cenários para usos múltiplos nos pequenos açudes da bacia hidrográfica do Açude de Sumé-PB**. 2012. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

COWEN, D. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1551-1555, 1998.

D'ALMEIDA, D. M. B. A.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; NESS, R. L. L. Importância relativa dos íons na salinidade de um Cambissolo na Chapada do Apodi, Ceará. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.3, p.615- 621, 2005.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Tolerância das plantas à salinidade – Efeitos dos sais no solo e na planta. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura**: estudo básico e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.

DNOCS. **Perímetro Irrigado Sumé**. Disponível em: [www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros\\_irrigados/pb/sume.htm](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/pb/sume.htm). Acesso em: 27 de agosto de 2015.

DNOCS. **Projeto Sumé Paraíba**: aproveitamento hidro agrícola do açude público Sumé. Ministério do Interior. 3º Diretoria Regional, Recife: DNOCS, 1968. 203p.

DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; ALVAREZ V. V. H.; KER, J. C.; FONTES, M. P. F. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 32, p. 1785-1791, 2008.

EISSA, A. **Spatial Decision Support System for Infrastructure Resource allocation**. 2013. 66 f. Specialization (Master of Science in Geo-information Science and Earth Observation). University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2013.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006. 306p.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2005. 186f. Monografia (Especialização em Solos e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

FERNANDES, C.; RODRIGUEZ, F. A.; CASTILLA, H. R.; VALÉRIO, M. A. **A irrigação no Brasil**: situação e diretrizes. Ministério da Integração Nacional. Brasília, 2008. 132p.

FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. Landslide Risk Assessment Based on GIS Multi-Criteria Evaluation: A Case Study in Bostan-Abad County, Iran. **Journal of Earth Science and Engineering**, n. 1, p. 66-71, 2011.

FEIZIZADEH, B.; JANKOWSKI, P.; BLASCHKE, T. A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. **Computers & Geosciences**, n. 64, p. 81–95, 2014.

FEIZIZADEH, B.; ROODPOSHTI, M. S.; JANKOWSKI, P.; BLASCHKE, T. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. **Computers & Geosciences**, n. 73, p. 208–221, 2014.

GHEYI, H. R.; SILVA PAZ, V. P.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. **Recursos Hídricos em Regiões Semiáridas**: estudos e aplicação. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012. 258p.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: EMBRAPA, 2006. 8p

GUERRA, P. B. **A civilização da seca**. DNOCS: Fortaleza, 1981. 324p.

GUERRA, P. B. **Açudes Públicos do Nordeste**: relação dos reservatórios construídos até 1988. 3 ed. rev. e aum. DNOCS: Fortaleza, 1990. 24p.

HOENKE, K. M.; KUMAR, M.; BATT, L. A GIS based approach for prioritizing dams for potential removal. **Ecological Engineering**, v. 64, p. 27-36, 2014.

HOSSAINA, M. S.; CHOWDHURYA, S. R.; DASA, N. G.; SHARIFUZZAMANB, S. M.; SULTANAA, A. Integration of GIS and multicriteria decision analysis for urban aquaculture development in Bangladesh. **Landscape and Urban Planning**, v. 90, p. 119-133, 2009.

HOUSHYAR, E.; SHEIKHDAVOODI, M. J.; ALMASSI, M.; BAHRAMI, H.; AZADI, H.; OMIDI, M.; SAYYAD, G.; WITLOX, F. Silage corn production in conventional and conservation tillage systems. Part I: Sustainability analysis using combination of GIS/AHP and multi-fuzzy modeling. **Ecological Indicators**, v. 39, p. 102–114, 2014.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. **Expert Systems with Applications**. v. 38, p. 14336-14345, 2011.

JIMÉNEZ, B. Treatment technology and standards for agricultural wastewater reuse: a case study in Mexico. **Irrigation Drainage**. v. 54, p. 22-33, 2005.

JÚNIOR, V. A. L.; PORTO, R. Q.; SILANS, A.M. B. P.; ALMEIDA, C. N; SILVA, G. S.; SANTOS, F. A. Estimativa do volume anual escoado de pequenos açudes no semiárido nordestino: um estudo de caso na bacia hidrográfica do açude de Sumé-PB. *In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009. Campo Grande, MS. Anais...* Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: RBRH, 2009.

KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K. S. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 13–25, 2015.

KHEMIRI, S.; KHNISSI, A.; ALAYA, M. B.; SAIDI, S.; ZARGOUNI, F. Using GIS for the Comparison of Intrinsic Parametric Methods Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution in Scenarios of Semi-Arid Climate. The Case of Foussana Groundwater in the Central of Tunisia. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 5, n. 8, p. 835-845, 2013.

LEE, Y. W.; BOGARDI, I.; KIM, J. H. Decision of water supply line under uncertainty. **Water Resources**, v. 34, n. 13, p. 3371-3379, 2000.

MACHIWAL, D.; JHA, M. K.; MAL, B. C. Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. **Water Resources Management**, v. 25, n. 5, p. 1359-1386, 2011.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*. v. 20, n. 7, p. 703-726, 2006.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. *Advances in Geographic Information Science*. Springer, 2015. 331p.

MARINONI, O. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. *Computers & Geosciences*, v. 30, p. 637–646, 2004.

MARINONI, O.; LANG, S.; LERCH, C.; HOPPE, A. **Sustainable land-use decision making from the geological point of view: an example for the use of geo-resources in a metropolitan área**. ISAHP, Honolulu, Hawaii, 2005.

MASSEI, G.; ROCCHI, L.; PAOLOTTI, L.; GRECO, S.; BAGGIA, A. Decision Support Systems for environmental management: A case study on wastewater from agriculture. *Journal of Environmental Management*, v. 146, p. 491-504, 2014.

MASSOUD, F.I. A note on the need for accped definitions and methods of chacarctrization of salt affects soil. IRYDA: Imformations. **Interntional society soil science**. Reunion de la subcomicion de suelos salinos, Servilha, Espana. 1971.

MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R.; ALMEIDA NETO, J. A. **Perda de carga nos filtros de areia e tela do sistema de irrigação por gotejamento**. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 18, Recife. Anais... Recife: SBEA, p.584-607, 1989.

MATZENAUER, H. B. **Uma metodologia multicritério construtivista de avaliação de alternativas para o planejamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas**. 2003. 636f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MBÛGWA, G. WA.; PRAGER, S.; KRALL, J. M. Utilization of spatial decision support systems decision-making in dryland agriculture: a tifton burclover case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 118, p. 215-224, 2015.

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. GIS para estudos ambientais. *In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (eds). Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos: INPE, 2004.

MEDEIROS, S. S.; LIMA, R. C. C.; LIMA, J. P. **Monitoramento dos Reservatórios da Região Semiárida**. v. 2, n. 12. SIGSAB. Campina Grande: INSA, 2015. 26p.

MEDEIROS, S. S.; REIS, C. F.; SALCEDO, I. H.; MARIN, A. M. P.; SANTOS, D. B.; JÚNIOR, J. A. S. **Abastecimento Urbano de Água: panorama para o semiárido brasileiro**. Campina Grande: INSA, 2014a. 93p.

MEDEIROS, S. S.; SALCEDO, I. H.; SANTOS, D. B.; BATISTA, R. O.; JÚNIOR, J. A. S.; LIMA, R. C. C. MARIN, A. M. P. **Esgotamento Sanitário: panorama para o semiárido brasileiro**. Campina Grande: INSA, 2014b. 63p

MENDONÇA, J. R. N. **DO OÁSIS À MIRAGEM: uma análise da trajetória do Perímetro Irrigado de Sumé - PB no contexto das políticas de desenvolvimento para o Nordeste.** 2010. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Sociais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

MENDONÇA, L. C.; PINTO, A. S.; SAMPAIO, L. F. S.; CARDOZO, L. R. Caracterização e avaliação da ETE Rosa Elze para reúso do efluente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p. 143-145, 2005.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse.** 3.ed. New York: McGraw – Hill Book, 1991. 1334p

MISHRA, A. K.; DEEP, S.; CHOUDHARY, A. Identification of suitable sites for organic farming using AHP & GIS. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 2, p. 181-193, 2015.

MONTE, F. P. **Análise comparativa da importância de vinte açudes na bacia de Sumé – PB com o emprego de métodos multicriterial e multidecisor.** 2013. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MACKAY, R.; OLIVEIRA, A. S. C. Dinâmica Hidrosalina em Aquífero Aluvial Utilizado para Agricultura Irrigada Familiar em Região Semiárida. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 8, n. 2, p. 85-92, 2003.

MOSADEGHI, R.; WARNKEN, J.; TOMLINSON, R. Comparison of Fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 49, p. 54-65, 2015.

NETO, S. P. S.; SANTOS, A. C.; LEITE, R. L. L.; DIM, V. P.; CRUZ, R. S.; PEDRICO, A.; NETO, D. N. N. Análise espacial de parâmetros da fertilidade do solo em região de ecótono sob diferentes usos e manejos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 541-552, 2011.

NUNES, T. H. C.; GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C. Curva-guia para incremento sazonal da outorga em reservatórios com baixas vazões de regularização. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 493-501, 2016.

PARAÍBA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos.** AESA: 2006.

PATRIKAKI, O.; KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K. Vulnerability map: A useful tool for groundwater protection: An example from Mouriki basin, North Greece. **Fresenius Environmental Bulletin**, n. 21, v. 8, p. 2516-2521, 2012.

PEDRERO, F.; ALBUQUERQUE, A.; CAVALEIRO, V.; ALARCÓN, J. J. Application of GIS-based multi-criteria analysis for site selection of aquifer recharge with reclaimed water. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 56, n. 1, p. 105-116, 2011.

RESENDE, A.; V. **Agricultura e Qualidade da Água: Contaminação da Água por Nitrato.** 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 29p.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação.** CFSEMG: Minas Gerais, 1999. 359p.

RIBEIRO, T. A. P.; AIROLDI, R. P. S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.3, p.295-301, 2005.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington D.C., U.S. Salinity Laboratory, 1954. 160p. (USDA Agriculture Handbook, 60).

RIKALOVIC, A.; COSIC, I.; LAZAREVIC, D. GIS Based Multi-Criteria Analysis for Industrial Site Selection. **Procedia Engineering**, v. 69, p. 1054-1063, 2014.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26p.

RUFINO, I. A. A. **Gestão de recursos hídricos em ambientes urbanos costeiros: modelagem e representação do conhecimento em sistema de informação geográfica.** 2004. 166f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2004.

SAATY, T. L. Scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, n. 15, v. 3, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L., **Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process**, 1988; Revised and published by the author; Original version published by McGraw-Hill, New York, 1980.

SAATY, T. L. **Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World**, RWS Publications, Pittsburgh, PA, 1986; Original version published by Lifetime Learning Publications, 1982.

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.

SENER, S.; SENER, E.; NAS, B.; KARAGUZEL, R. Combining AHP with GIS for landfill site selection: A case study in the Lake Beysehir catchment area (Konya, Turkey). **Waste Management**, v. 30, p. 2037-2046, 2010.

SHARIFI, M. A. **Integrated Planning and Decision Support Systems For Sustainable Watershed Development.** Department of Urban-Regional Planning and Geo-Information Infrastructure. International Institute for Geo-information and Earth Observation, ITC, 2002. 35p.

SILVA, L. F. D. **Avaliação de Unidades Produtivas da Agricultura Familiar no Perímetro Irrigado de Sumé-PB.** 2006. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.

SILVA, A. C. S.; SILANS, A. M. B. P.; SILVA NETO, A. F.; PORTO, R. Q. Considerações sobre aspectos sociais e físicos da açudagem na bacia do açude Sumé – PB. *In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2009. Campo Grande, MS. *Anais...* Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: RBRH, 2009.

SILVA, P. H. P. **Uso de cadeia causal na gestão de recursos hídricos do reservatório Epitácio Pessoa-PB (1998-2014)**. 2015. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SIMON, H. A. **The New Science of Management Decision**. Harper and Brothers, New York, 1960.

SUSTAINABLE AGRICULTURE AND SOIL CONSERVATION (SOCO). **Salinização e sodificação**. Projeto SoCo. Ficha informativa n. 4, 2009.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. *Scientia Agraria*, v.11, n.1, p.073-081, 2010.

SRDJEVIC, B.; BAJCETIC, R. V.; BLAGOJEVIC, B. **Combining GIS and Analytic hierarchy process for evaluating land suitability for irrigation: A case study from Serbiaase study from Serbia**. 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering, p. 247-250, 2010.

TAK, H. I.; BAKHTIYAR, Y.; AHMAD, F.; INAM, A. Effluent Quality Parameters for Safe use in Agriculture. **Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops**. InTech, p.25-36, 2012.

THIRUMALAIVASAN, D.; KARMEGAM, M.; VENUGOPAL, K. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, n. 7, p. 645-656, 2003.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Conflict Resolution and Negotiation Skills for Integrated Water Resources Management**. Cap-Net. Training Manual. International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Management, July 2008.

VARELA-ORTEGA, C.; BLANCO-GUTIÉRREZ, I.; ESTEVE, P.; BHARWANI, S.; FRONZEK, S.; DO WNING, T. E. How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana Basin in Spain. **Regional Environmental Change**, v. 16, n. 1, p. 59-70, 2014.

VIEIRA, L. J. S. **Emprego de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exportação de um aquífero aluvial**. 2002. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

VIEIRA, J. B. A.; RÊGO, J. C. **Aplicação de um modelo matemático para simulação de cenários de manejo do aquífero aluvial do Rio Sucuru em Sumé-PB**. Pró-Reitoria de Pesquisa e Extensão (PROPEX). Relatório PIBIC/CNPq-UFCG, 2016. 19p.

XU, J. **Mathematical Methods in Contemporary Geography**. Higher Education Press, Beijing, 2002.

WALKE, N.; OBI REDDY, G. P.; MAJI, A. K.; THAYALAN, S. GIS-based multicriteria overlay analysis in soil-suitability evaluation for cotton (*Gossypium* spp.): A case study in the black soil region of Central India. **Computers & Geosciences**. v. 41, p. 108-118, 2012.

WANG, J.; HE, J.; CHEN, H. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. **Science of the Total Environment**, v. 432, p. 216-226, 2012.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater**. v.1-2. Geneva: WHO, 2006.

## APÊNDICE

**Quadro 1** – Culturas praticadas.

<b>Lotes</b>	<b>Anos 2015 e/ou 2016</b>	<b>Início do projeto</b>
1	Capim e coco	Hortaliças
2	Sem cultivo	Hortaliças
3	Sem cultivo	Hortaliças
4	Hortaliça, milho, feijão e capim.	Hortaliças, milho e feijão.
5	Sequeiro	Sequeiro
6	Hortaliça, frutíferas, milho e feijão.	Tomate, frutíferas, milho e feijão.
7	Milho e capim	Hortaliça
8	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
9	Capim	Hortaliça
10	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
11	Milho	Hortaliça e frutífera
12	Hortaliça, frutífera, milho e capim.	Hortaliça, frutífera, milho e capim.
13	Capim	Hortaliça
14	Sem cultivo	Hortaliça
15	Sequeiro	Sequeiro
16	Sequeiro	Sequeiro
17	Frutífera, milho e capim.	Hortaliça e frutífera
18	Sem cultivo	Hortaliça
19	Sem cultivo	Hortaliça
20	Milho, feijão e capim.	Hortaliça
21	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
22	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
23	Capim	Hortaliça
24	Hortaliça, capim e palma.	Hortaliça
25	Hortaliça, frutífera, milho, feijão, capim e palma.	Hortaliça e frutífera
26	Palma e capim	Hortaliça e milho
27	Milho, feijão e capim.	Hortaliça, frutífera, milho e feijão.
28	Milho	Hortaliça e frutífera.
29	Sem cultivo	Hortaliça, milho e feijão.
30	Sem cultivo	Hortaliça, frutífera, milho e algodão.
31	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
32	Sem cultivo	Hortaliça
33	Sem cultivo	Hortaliça
34	Sem cultivo	Hortaliça, frutífera, milho e feijão.
35	Hortaliça	Hortaliça, milho e feijão.
36	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
37	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
38	Hortaliça e feijão	Hortaliça
39	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
40	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
41	Hortaliça e feijão	Hortaliça
42	Sem cultivo	Hortaliça

43	Hortaliça, frutífera, feijão e milho.	Hortaliça, melancia, frutífera, feijão e milho.
44	Sem cultivo	Hortaliça
45	Melancia, frutífera, milho e feijão.	Hortaliça, milho e feijão.
46	Frutífera, milho e capim.	Hortaliça, frutífera, milho, feijão e raízes.
47	Sem cultivo	Hortaliça e frutífera
48	Frutífera e capim	Hortaliça e frutífera
49	Milho, feijão e capim.	Hortaliça e frutífera
50	Capim	Hortaliça
51	Sem cultivo	Hortaliça
52	Sequeiro	Sequeiro
53	Sequeiro	Sequeiro
54	Sequeiro	Sequeiro
55	Sequeiro	Sequeiro
56	Sequeiro	Sequeiro
57	Sequeiro	Sequeiro

**Observação:** há alguns lotes sem cultivo atualmente, mas que apresentaram cultivo no decorrer de anos anteriores em pequenas quantidades sejam de milho, feijão, frutíferas ou até mesmo hortaliças.

## ANEXO

**Tabela 26** - Resultados das análises físico-químicas e microbiológicas (BRAMAR, 2016).

<b>Julho</b>						
<b>Poços</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>pH</b>	<b>SDT (mg/L)</b>	<b>Nitrato (mg/L)</b>	<b>CTT (UFC/100mL)</b>	<b>E. Coli</b>
<b>P03</b>	3,41	8,12	2409	0,47	1	Presente
<b>P06</b>	1,58	8,1	1004	0,01	10	Ausente
<b>P10</b>	1,71	7,77	1054	0,52	8	Ausente
<b>P11</b>	1,38	7,51	892	4,97	1	Ausente
<b>P14</b>	1,27	7,37	842	8,59	208	Ausente
<b>P21</b>	0,79	7,85	522	0,63	2	Ausente
<b>P25</b>	0,81	7,58	528	14,3	10	Ausente
<b>P28</b>	0,8	7,47	512	1,18	1	Presente
<b>P33</b>	10,45	8,11	7534	0,14	3	Presente
<b>Agosto</b>						
<b>Poços</b>	<b>CE (dS/m)</b>	<b>pH</b>	<b>SDT (mg/L)</b>	<b>Nitrato (mg/L)</b>	<b>CTT (UFC/100mL)</b>	<b>E. Coli</b>
<b>P03</b>	3,74	8,07	2594	0,52	150	Presente
<b>P06</b>	1,78	8,07	1099	10,54	18	Presente
<b>P10</b>	2,6	7,71	1724	1,13	2	Ausente
<b>P11</b>	1,59	7,65	1037	7,2	1	Presente
<b>P14</b>	1,49	7,43	949	11,13	18	Ausente
<b>P21</b>	0,81	7,88	554	0,63	Ausente	Ausente
<b>P25</b>	0,9	7,5	597	15,35	21	Presente
<b>P28</b>	0,82	7,61	519	0,35	14	Presente
<b>P33</b>	11,11	8,09	8123	0,34	9	Presente