

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCELO BRAUNER DOS SANTOS

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO  
BRASILEIRO: UMA PROPOSTA PARA A BACIA DO RIO JAGUARIBE - CEARÁ

FORTALEZA

2009

MARCELO BRAUNER DOS SANTOS

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO  
BRASILEIRO: UMA PROPOSTA PARA A BACIA DO RIO JAGUARIBE - CEARÁ

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ticianá Marinho de Carvalho Studart

FORTALEZA

2009

S236i Santos, Marcelo Brauner dos  
Indicadores de sustentabilidade de reservatórios no semi-árido brasileiro: uma proposta para a Bacia do Rio Jaguaribe-CE / Marcelo Brauner dos Santos, 2009.  
126 f.; il; enc.

Orientadora: Profa. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart  
Área de concentração: Recursos Hídricos  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2009.

1. Recursos Hídricos. 2. Hidrologia. 3. Desenvolvimento Sustentável. I. Studart, Ticiania Marinho de Carvalho (orient.) II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título

CDD 627

MARCELO BRAUNER DOS SANTOS

INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE DE RESERVATÓRIOS NO SEMI-ÁRIDO  
BRASILEIRO: UMA PROPOSTA PARA A BACIA DO RIO JAGUARIBE - CEARÁ

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos.

Aprovada em 02/09/2009.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ticiania Marinho de Carvalho Studart  
Universidade Federal do Ceará-UFC  
(Orientadora)

---

Prof. PhD Vicente de Paulo Pereira Barbosa Vieira  
Universidade Federal do Ceará-UFC  
(Examinador interno)

---

Prof. Dr. Wilson Fadlo Curi  
Universidade Federal de Campina Grande-UFCG  
(Examinador externo)

Aos meus pais que sempre investiram na minha formação.

Aos meus irmãos pelo carinho e companheirismo.

Aos meus verdadeiros amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

A Prof<sup>a</sup> Ticiania Marinho de Carvalho Studart pela orientação, não somente neste projeto, mas ao longo de quase cinco anos, desde a graduação. Pelo seu apoio e amizade, fundamentais para a realização deste trabalho. Enfim, por ter sido sempre presente.

A todas as pessoas que se disponibilizaram esforços para a concretização deste trabalho, especialmente aos Professores Vicente Vieira e Nilson Campos.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos concedida, fornecendo subsídios financeiros para a conclusão do meu mestrado.

Àqueles que aqui encontrei e se tornaram meus amigos, Francisco Alberto, Francisco Holanda, Mauro César e Roberto Galiza pela convivência, amizade e companheirismo que tivemos durante o curso.

## RESUMO

De todos os fenômenos naturais que afligem a região da Bacia do Rio Jaguaribe, com certeza, o mais danoso é o fenômeno da seca. A maneira encontrada, ao longo dos anos, para superar essa adversidade foi a construção de reservatórios de água superficiais, como forma de garantir a vazão dos mesmos nos períodos de estiagem. O problema é que construção de grande parte desses reservatórios foi executada sem um estudo detalhado de sua sustentabilidade hídrica, ocasionando a criação de um grande conjunto de reservatórios ineficientes. A solução desse problema está no gerenciamento responsável da rede de reservatórios já existentes e na realização de estudos aprofundados de sustentabilidade de projetos futuros. Para que isso seja possível, é necessário que existam ferramentas capazes de medir a sustentabilidade de reservatórios, tais como índices e indicadores. Foi realizada uma pesquisa sobre os indicadores e índices de sustentabilidade existentes na literatura, e, adequando-os a realidade da Bacia do Rio Jaguaribe, criou-se o conjunto de medidas formado pelos indicadores de confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade e o índice de sustentabilidade do Jaguaribe, que medem sustentabilidade hídrica do reservatório. Para realizar o estudo de caso, utilizaram-se 34 reservatórios localizados na Bacia do Rio Jaguaribe, os quais foram simulados para 12 cenários diferentes, variando-se as suas capacidades e retiradas, de modo que fossem obtidos fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4, além do  $f_K$  relativo a capacidade real do próprio reservatório, assim como fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) iguais a 0,25; 0,50 e 0,75. Os resultados obtidos para este conjunto de medidas se mostraram consistentes e revelaram que os reservatórios estudados, de forma generalizada, foram classificados como de baixa sustentabilidade hidrológica.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Indicadores, Rio Jaguaribe.

## ABSTRACT

From all the natural phenomena that afflict the region of Jaguaribe River Basin, the drought is certainly the most damaging. The manner found, with the passing of the years, to overcome this adversity is to build superficial water reservoirs, as a mean to assure their flow during the droughts. The problem is that the building of most of those reservoirs was executed without a detailed study of their hydrologic sustainability, resulting in the construction of a great number of inefficient reservoirs. The solution to this problem is based on the responsible management of the existing reservoir network and the realization of sustainability studies on future projects. To make this possible, tools capable of measuring the reservoir sustainability, as well as indexes and indicators, become necessary. We have searched the literature about Indicators and indexes of sustainability and adapted them to the situation of the Jaguaribe River Basin. From this research, a set of measurements formed by indicators of reliability, resiliency, vulnerability and the sustainability index of the Jaguaribe, that measures the hydrologic sustainability of the reservoir. To realize this case study, 34 reservoirs located in the Jaguaribe River Basin were used, which were simulated for 12 different scenarios, varying their capacities and outflows to obtain dimensionless capacity factors ( $f_K$ ) equal to 1, 2, 4 and the real one. Also to obtain release dimensionless factors ( $f_M$ ) equal to 0.25, 0.5 and 0.75. The results obtained for this set of measurements were consistent and revealed that the studied reservoirs, in general, were classified as reservoirs of low hydrologic sustainability.

Key words: Sustainability, Indicators, Jaguaribe River.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Modelo da Teoria dos Runs.....	29
Figura 2.	Exemplo de secas pequenas e secas mutuamente dependentes.....	30
Figura 3.	Pirâmide de informações do nível de agregação de dados.....	32
Figura 4.	Regiões hidrográficas da Bacia do Rio Jaguaribe.....	41
Figura 5.	Extrapolação da curva cota x volume do reservatório Trici utilizando uma linha de tendência polinomial de terceira ordem.....	50
Figura 6.	Exemplo do cálculo dos runs.....	57
Figura 7.	Gráficos dos valores do indicador de garantia (G) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores dimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4.....	91
Figura 8.	Histograma dos valores de garantia dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.....	93
Figura 9.	Gráficos dos valores do indicador de resiliência (R) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores dimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4.....	95
Figura 10.	Gráfico dos valores do indicador de resiliência (R) dos 33 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe (excluindo o Açude Patu) simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 4.....	96
Figura 11.	Histograma dos valores de resiliência dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.....	97
Figura 12.	Gráficos dos valores do indicador de vulnerabilidade ( $V_n$ ) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1 e 2.....	99
Figura 13.	Gráfico dos valores do indicador de vulnerabilidade ( $V_n$ ) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) igual a 4.....	100
Figura 14.	Histograma dos valores de vulnerabilidade dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.....	102
Figura 15 -	Gráfico dos valores do índice de sustentabilidade (IS) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1.....	103
Figura 16.	Gráficos dos valores do índice de sustentabilidade (IS) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 2 e 4.....	104

Figura 17. Gráficos dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4. ....	107
Figura 18. Histograma dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	109
Figura 19. Gráficos comparativos entre os valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe e os valores dos indicadores de garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade simulados com o fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) igual a 0,50 e o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 2. ....	111
Figura 20. Gráfico comparativo entre os valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe e os valores dos indicadores de garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade simulados com o fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) igual a 0,50 e o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 2. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Características gerais dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	43
Tabela 2.	Postos fluviométricos utilizados para a calibração do MODHAC. ....	44
Tabela 3.	Vazões médias e coeficientes de variação dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	45
Tabela 4.	Precipitação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ...	47
Tabela 5.	Evaporação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ...	48
Tabela 6.	Valores das capacidades e retiradas anuais dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	55
Tabela 7.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Canoas. ....	64
Tabela 8.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Favelas. ....	64
Tabela 9.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Orós. ....	65
Tabela 10.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Poço da Pedra. ....	66
Tabela 11.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Rivaldo de Carvalho. ....	67
Tabela 12.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Trici. ....	67
Tabela 13.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Trussu. ....	68
Tabela 14.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Várzea do Boi. ....	69
Tabela 15.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Canafístula. ....	70
Tabela 16.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Ema. ....	70
Tabela 17.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Joaquim Távora. ....	71
Tabela 18.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho do Sangue. ....	72
Tabela 19.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Santo Antônio de Russas. ....	73
Tabela 20.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Cedro. ....	74
Tabela 21.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Patu. ....	74
Tabela 22.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Pedras Brancas. ....	75
Tabela 23.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Poço do Barro. ....	76
Tabela 24.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Quixeramobim. ....	77
Tabela 25.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Boa Viagem. ....	78
Tabela 26.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Cipoda. ....	78
Tabela 27.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho dos Tanques. ....	79
Tabela 28.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho Verde. ....	80
Tabela 29.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Serafim Dias. ....	81
Tabela 30.	Indicadores de sustentabilidade do Açude São José II. ....	81
Tabela 31.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Fogareiro. ....	82
Tabela 32.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Trapiá II. ....	83
Tabela 33.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho dos Carneiros. ....	84
Tabela 34.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Prazeres. ....	84
Tabela 35.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Lima Campos. ....	85
Tabela 36.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Ingazeiro. ....	86
Tabela 37.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Quixabinha. ....	87
Tabela 38.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Atalho II. ....	88
Tabela 39.	Indicadores de sustentabilidade do Açude Thomas Osterne. ....	88

Tabela 40. Indicadores de sustentabilidade do Açude Olho D'Água. ....	89
Tabela 41. Tabela de frequências dos valores de garantia dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	92
Tabela 42. Níveis de Garantia da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	94
Tabela 43. Tabela de frequências dos valores de resiliência dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	97
Tabela 44. Níveis de Resiliência da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	98
Tabela 45. Tabela de frequências dos valores de vulnerabilidade dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	101
Tabela 46. Níveis de vulnerabilidade da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	102
Tabela 47. Valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) reais e iguais a 1, 2 e 4. ....	106
Tabela 48. Tabela de frequências dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	108
Tabela 46. Níveis de sustentabilidade da Bacia do Rio Jaguaribe. ....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_i$	Precipitação média do mês $i$
$E_i$	Evaporação média do mês $i$
$V_i$	Volumes de água estocados no reservatório no início do mês $i$
$A_i$	Áreas do lago do reservatório no início do mês $i$
$I_i$	Volumes afluentes ao reservatório durante o mês $i$
$S_i$	Volume sangrado pelo reservatório no mês $i$
$Q_i$	Vazão regularizada pelo reservatório no mês $i$
$H$	Horizonte de simulação
$r_i$	Iésimo run ocorrido durante a simulação de um reservatório
$CV$	Coefficiente de variação
$f_K$	Fator adimensional de capacidade
$f_M$	Fator adimensional de retirada
$K$	Capacidade do reservatório
$\mu$	Volume afluente médio anual
$d_i$	Duração do $i$ -ésimo run
$N$	Número total de runs obtidos durante a simulação
$D_{m\acute{a}x}$	Déficit hídrico máximo de um run ocorrido durante a simulação
$\phi$	Constante de vulnerabilidade para a região da Bacia do Rio Jaguaribe.
$\alpha$	Confiabilidade
$C_{vol}$	Confiabilidade volumétrica
$\rho$	Resiliência
$\eta'$	Vulnerabilidade
$\eta$	Vulnerabilidade relativa
$K_S$	Índice de Sustentabilidade
$DRI$	Índice de risco de Seca
$G$	Indicador de garantia
$R$	Indicador de resiliência
$V_n$	Indicador de vulnerabilidade
$IS$	Índice de sustentabilidade
$ISRSA$	Índice de sustentabilidade de reservatórios do Semi-Árido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Escopo .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do Trabalho .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	Desenvolvimento Sustentável.....	19
2.1.1	Definições de Sustentabilidade.....	20
<b>2.2</b>	<b>Fenômeno da Seca.....</b>	<b>21</b>
2.2.1	Natureza do Déficit Hídrico.....	23
2.2.2	Unidade de Tempo.....	24
2.2.3	Nível de Truncamento .....	25
2.2.4	Abrangência Espacial .....	27
<b>2.3</b>	<b>Teoria dos Runs .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4</b>	<b>Indicadores de Sustentabilidade.....</b>	<b>31</b>
2.4.1	Índices de Critério Ponderados .....	33
2.4.2	Índices Estatísticos Ponderados .....	34
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Dados Utilizados .....</b>	<b>42</b>
3.1.1	Vazões Afluentes .....	43
3.1.2	Precipitações .....	46
3.1.3	Evaporações .....	46
3.1.4	Curvas Cota x Volume.....	46
<b>3.2</b>	<b>Operação Simulada dos Reservatórios .....</b>	<b>50</b>
3.2.1	Equação do Balanço Hídrico .....	50
3.2.2	Geração das Séries Sintéticas .....	52
3.2.3	Desagregação das Vazões Anuais .....	53
3.2.4	Simulação do Reservatório Utilizando o Programa SIMRES .....	54
3.2.5	Cálculo do Runs.....	56
<b>3.3</b>	<b>Indicadores de Sustentabilidade de Reservatórios .....</b>	<b>58</b>
3.3.1	Garantia.....	58
3.3.2	Resiliência.....	59

3.3.3	Vulnerabilidade.....	60
3.3.4	Índice de Sustentabilidade .....	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>4.1</b>	<b>Indicadores de Desempenho dos Reservatórios .....</b>	<b>63</b>
4.1.1	Açude Canoas .....	63
4.1.2	Açude Favelas.....	64
4.1.3	Açude Orós .....	65
4.1.4	Açude Poço da Pedra .....	66
4.1.5	Açude Rivaldo de Carvalho.....	66
4.1.6	Açude Trici .....	67
4.1.7	Açude Trussu .....	68
4.1.8	Açude Várzea do Boi.....	69
4.1.9	Açude Canafístula.....	69
4.1.10	Açude Ema.....	70
4.1.11	Açude Joaquim Távora .....	71
4.1.12	Açude Riacho do Sangue.....	72
4.1.13	Açude Santo Antônio de Russas.....	72
4.1.14	Açude Cedro .....	73
4.1.15	Açude Patu.....	74
4.1.16	Açude Pedras Brancas .....	75
4.1.17	Açude Poço do Barro.....	76
4.1.18	Açude Quixeramobim.....	76
4.1.19	Açude Boa Viagem.....	77
4.1.20	Açude Cipoada.....	78
4.1.21	Açude Riacho dos Tanques .....	79
4.1.22	Açude Riacho Verde.....	80
4.1.23	Açude Serafim Dias .....	80
4.1.24	Açude São José II .....	81
4.1.25	Açude Fogareiro .....	82
4.1.26	Açude Trapiá II.....	83
4.1.27	Açude Riacho dos Carneiros .....	83
4.1.28	Açude Prazeres .....	84
4.1.29	Açude Lima Campos .....	85

4.1.30	Açude Ingazeiro.....	86
4.1.31	Açude Quixabinha .....	87
4.1.32	Açude Atalho II .....	87
4.1.33	Açude Thomas Osterne.....	88
4.1.34	Açude Olho D'Água .....	89
<b>4.2</b>	<b>Indicadores de Desempenho da Bacia do Rio Jaguaribe .....</b>	<b>90</b>
4.2.1	Garantia.....	90
4.2.2	Resiliência.....	94
4.2.3	Vulnerabilidade.....	98
4.2.4	Índice de Sustentabilidade .....	103
4.2.5	Índice de Sustentabilidade de Reservatórios do Semi-Árido .....	105
<b>4.3</b>	<b>Análise Comparativa Entre os Indicadores de Sustentabilidade e o Índice de Sustentabilidade de Reservatórios do Semi-Árido.....</b>	<b>110</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>114</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXO .....</b>	<b>122</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A construção de reservatórios de água superficiais foi uma prática muito difundida no Nordeste Brasileiro, mais especificamente no Ceará, devido às características climáticas e edáficas desta região. Irregularidade na distribuição pluviométrica, tanto temporal como espacial, uma evapotranspiração média anual de cerca de 2.000 mm e a presença de um escudo cristalino que cobre cerca de 70% do território do estado, o que faz com que a perda de água por infiltração na base seja irrelevante, demonstram uma vocação natural para esta prática. A história da açudagem no Nordeste é tão antiga como a história de sua colonização pelos portugueses. Na realidade, o próprio nome - açude - derivado da palavra árabe as-Sadd (barragem) comprova origem ainda mais remota, se nos debruçarmos sobre a história do homem e de suas técnicas (Molle, 1994).

O Nordeste Brasileiro é uma das regiões do mundo que mais sofre com o fenômeno da seca (Molle, 1994), dessa forma, a construção de açudes visa o armazenamento da água e posterior uso na época de escassez, com a finalidade de garantir a sustentabilidade humana. As terríveis secas de 1825, 1827 e 1830 marcaram o início da política de açudagem no Nordeste semi-árido. Em 1909, foi criada a Inspetoria de Obras Contra as Secas (IFOCS), atual Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS), tendo como função primordial desenvolver uma acentuada e agressiva política de açudagem que possibilitasse o armazenamento de água, criando condições à conservação dos recursos naturais vivos.

Como resultado destas políticas, o século XX foi marcado pelo grande número de reservatórios construídos no Nordeste Brasileiro, chegando à marca de mais de 8.000 reservatórios catalogados somente no Estado do Ceará. O problema é que a construção da grande maioria desses reservatórios foi executada sem um estudo detalhado de seu desempenho hídrico, ocasionando a criação de um grande conjunto de reservatórios ineficientes. A mentalidade do Século XXI, no entanto, é diminuir o crescimento do número de novos reservatórios, priorizando a construção de reservatórios estratégicos mais eficientes, e, principalmente, a manutenção e o gerenciamento dos reservatórios existentes. Para tal propósito, se faz necessário a existência de ferramentas de gestão, como índices e indicadores, capazes de medir com maior precisão a eficiência desses reservatórios, para pautar as decisões tomadas pelos administradores dos recursos hídricos.

## 1.1 Escopo

Percebendo que a existência de ferramentas capazes de medir a sustentabilidade de reservatórios é um pré-requisito fundamental para o gerenciamento dos efeitos causados pela seca na região nordeste do Brasil, a presente pesquisa busca encontrar um conjunto de índices e indicadores capazes de descrever detalhadamente o comportamento das falhas na regularização de suas vazões. O objetivo é realizar um estudo específico desses índices e indicadores para a Bacia do Rio Jaguaribe, que é a bacia hidrográfica economicamente mais importante do Estado do Ceará, devido ao aproveitamento agrícola advindo dos perímetros de irrigação.

Para realizar este estudo foram escolhidos 34 reservatórios localizados na Bacia do Rio Jaguaribe, contendo reservatórios de pequeno, médio e grande porte, com o intuito de alcançar uma maior representatividade dos resultados. Serão utilizados para medir a sustentabilidade destes reservatórios os indicadores de garantia, resiliência e vulnerabilidade, além do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido.

A pesquisa procurará atingir os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar os indicadores de sustentabilidade já abordados pela literatura existente e verificar a sua aplicabilidade para os reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe;
2. Ajustar os indicadores e índices de sustentabilidade baseados na análise das falhas detectadas.

## 1.2 Organização do Trabalho

O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O presente capítulo trata da formulação do problema, do escopo do trabalho e discorre sobre a maneira como o documento foi organizado.

O Capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica sobre a definição de sustentabilidade, de secas e da teoria dos runs. Estas definições servem como base para a formulação dos indicadores e índices de sustentabilidade existentes, que também serão abordados neste capítulo.

O Capítulo III descreve o procedimento a ser seguido para o estudo dos indicadores de sustentabilidade dos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. Este capítulo faz ainda um levantamento dos dados necessários para a realização das simulações.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos pelos indicadores de sustentabilidade

e faz uma análise sobre a o seu comportamento, além das modificações que se apresentaram pertinentes.

Finalmente, o Capítulo V apresenta as conclusões desta pesquisa e faz algumas sugestões de estudos complementares.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes de elaborar qualquer metodologia para o estudo da sustentabilidade de reservatórios, é necessário fazer uma breve pesquisa sobre os diversos assuntos relacionados a este tema. Esta busca deve fornecer informações capazes de responder questões como o que é sustentabilidade, o que ela analisa e como medi-la.

O presente capítulo deste trabalho apresenta o resultado da pesquisa bibliográfica realizada através de diversas fontes a fim de responder tais questionamentos e criar uma base sólida para a elaboração de um conjunto de indicadores de sustentabilidade de reservatórios. Este capítulo será dividido em quatro tópicos e o primeiro discorrerá sobre o que é *desenvolvimento sustentável*. O segundo tópico aborda o *Fenômeno da Seca*, que é o foco principal do estudo da sustentabilidade de reservatórios de armazenamento de água. O terceiro tópico apresentará a *Teoria dos Runs*, que será utilizada como base para a formulação dos indicadores utilizados neste trabalho. Por último, será apresentado um conjunto de *indicadores e índices de sustentabilidade* criados por diversos autores que estudaram o tema.

### 2.1 Desenvolvimento Sustentável

No último quarto do século XX, com o aumento da taxa de crescimento populacional e da aceleração da industrialização por todo o Planeta, muitos recursos naturais, antes tidos como inesgotáveis ou renováveis, começaram a se tornar mais escassos tanto em quantidade quanto em qualidade. Devido a este fenômeno, a inclusão de questões ambientais na estruturação de políticas públicas começou a ser cada vez mais presente.

Segundo a American Society of Engineers (ASCE, 1998), foi durante este período que surgiu o termo “Sustentabilidade” que pode bem ser o maior conceito unificador do gerenciamento de recursos naturais que foi desenvolvido, discutido, promovido e aceito, até mesmo nos mais altos níveis do governo na maior parte do mundo. É importante ressaltar que, apesar do termo sustentabilidade ser amplamente utilizado nos dias de hoje, ainda não há um consenso sobre a sua definição e como medi-la, tendo em vista que seu uso não se restringe mais somente a área da ecologia, como na época de seu surgimento.

Conforme Adams (2001), a primeira utilização do termo “desenvolvimento sustentável” ocorreu no documento *The World Conservation Strategy* (IUCN et al., 1980). Entretanto, o termo sustentabilidade só recebeu uma conceituação mais completa dentro de um estudo realizado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente das Nações Unidas chamado

Our Common Future (WCED, 1987), mais conhecido como Relatório Brundtland. Uma das conclusões alcançadas neste documento foi a necessidade de mudar a maneira de se pensar o desenvolvimento, já que o Planeta e todos seus sistemas ecológicos estão sofrendo graves e irreversíveis impactos negativos.

A iniciativa de promover conferências como a realizada pelas Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) no Rio Janeiro em 1992, mais conhecida como Rio 92, não teve a intenção de levar a ações específicas para salvar nosso planeta, mas sim mudar a maneira como muitos viam o meio ambiente e ecossistemas enquanto trabalhavam para avançar o desenvolvimento econômico e a igualdade.

Uma conceituação filosófica de sistemas sustentáveis os define como aqueles designados e gerenciados para garantir as necessidades das gerações futuras sem comprometer as necessidades do presente. Porém, existe a necessidade de um conceito de sustentabilidade mais completo essa conceituação, segundo Lélé (1991), foi o maior paradigma do desenvolvimento da década de 1990.

A maior dificuldade é que o termo “sustentabilidade” pode significar coisas diferentes para diferentes pessoas. Isto nos mostra que uma definição clara deste termo depende principalmente do enfoque em interesse. Assim, é necessário conhecer as suas definições para saber qual a mais adequada para cada caso.

### 2.1.1 Definições de Sustentabilidade

Sustentabilidade vem do latim *sustentare* que significa sustentar, suportar, conservar em bom estado, manter, resistir. Nos dicionários de língua portuguesa, sustentar significa resistir, impedir a ruína, manter, conservar a mesma posição, sustentar-se, manter o nível apropriado. Sustentável é, de uma maneira simplória, tudo que é capaz de ser suportado, mantido.

Siche et al. (2007) disseram que a palavra sustentabilidade é usada frequentemente em muitas combinações diferentes: desenvolvimento sustentável, crescimento sustentável, comunidade sustentável, indústria sustentável, economia sustentável, agricultura sustentável, etc. Dessa forma, as definições de sustentabilidade são, na verdade, definições de suas combinações.

Uma definição geral de desenvolvimento sustentável foi apresentada no Relatório de Brundtland, a qual definiu desenvolvimento sustentável como o “desenvolvimento que garante as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras”.

Desde então, tem sido realizado um trabalho em torno de criar conceitos mais funcionais para o desenvolvimento sustentável (SERAGELDIN, 1994). Assim sendo, surgiram diversos conceitos de sustentabilidade específicos para diferentes áreas, pois cada objeto de estudo (economia, recursos naturais, sociedade, etc.) tem suas características próprias.

Dentre os diversos objetos já abordados no estudo da sustentabilidade, os recursos hídricos ocupam uma posição de destaque, pois se trata de um elemento vital para todos os ecossistemas e sociedades humanas, devendo ser compartilhado com as gerações atuais e futuras que habitam cada região. Sua demanda varia de região para região e inclui não somente os usos tradicionais das vazões e volumes de água, mas, também, a preservação e a melhoria social, cultural e ecológica dos sistemas que dependem do regime hidrológico da região.

Assim, surgiu a seguinte variação da definição geral de sustentabilidade focada nos sistemas de recursos hídricos:

Sistemas de recursos hídricos sustentáveis são aqueles designados e gerenciados para contribuir totalmente para os objetivos da sociedade, agora e no futuro, enquanto mantendo sua integridade ecológica, ambiental e hidrológica. (ASCE, 1998, p. 44).

A definição de sustentabilidade, por si só, é insuficiente para o andamento de qualquer estudo que deseje atingir efetivamente o desenvolvimento sustentável em qualquer área, servindo mais como um guia para nortear o prosseguimento dos estudos. Dessa forma, é necessário também se conhecer a fundo todos os assuntos abordados em cada estudo específico de sustentabilidade.

## 2.2 Fenômeno da Seca

O fenômeno da Seca é, certamente, um dos assuntos mais estudados na área de recursos hídricos, sendo o foco principal do seu gerenciamento, em regiões semi-áridas. A seca é um fenômeno meteorológico complexo, com influências sociais frequentemente agravadas pela ação humana, tornando-se um fator relevante para a sustentabilidade hídrica da região.

É necessário decidir exatamente o significado do termo Seca antes que qualquer proposta de análise seja desenvolvida ou utilizada. Entretanto, estabelecer uma definição universal desse evento tem se mostrado uma tarefa difícil. (DRACUP et al., 1980).

Segundo Campos e Studart (2001), os tipos mais comuns são a *seca climatológica* (causa primária ou elemento que desencadeia o processo), a *seca edáfica* (efeito da seca climatológica), a *seca social* (efeito da seca edáfica) e finalmente, a *seca hidrológica* (efeito dos baixos escoamentos nos cursos d'água e/ou do sobreuso das disponibilidades hídricas).

A *seca climatológica* é o resultado de um déficit de precipitação pluvial total, em um dado tempo e espaço, em relação aos padrões normais que determinaram as necessidades. Esse tipo de seca tem como causa natural a circulação global da atmosfera e pode se desenvolver rapidamente e "terminar abruptamente".

A *seca edáfica* é resultada pela insuficiência ou distribuição irregular das chuvas ocasionadas pela seca climatológica e tem como característica a deficiência de umidade no solo, não permitindo que as culturas completem seus ciclos vegetativos. No Nordeste Semi-Árido Brasileiro, este tipo de seca afeta predominantemente as atividades econômicas da agricultura de sequeiro, as quais resultam no flagelo e na migração dos *retirantes* para a área urbana ou para as frentes de serviço, gerando a seca social (CARVALHO & SANTOS, 2003).

A *seca hidrológica* está relacionada ao volume de água disponível, incluindo lençol freático, reservatórios e rios. Este tipo de seca persiste por mais tempo que a climatológica e pode ser causada por uma seqüência de anos com deficiência no escoamento superficial ou, também, por um mau gerenciamento dos recursos hídricos acumulados nos reservatórios. A seca hidrológica ocasiona a falha dos sistemas de abastecimento e armazenamento d'água das regiões afetadas por ela. A concorrência pela água nesses sistemas de armazenamento aumenta durante a seca e conflitos entre usuários da água crescem significativamente. Como as regiões estão interconectadas por sistemas hidrológicos, uma seca à montante pode produzir graves impactos à jusante a medida que as reservas de água superficial e subterrânea são afetadas, mesmo que as áreas à jusante não estejam sujeitas à seca meteorológica.

A fim de realizar uma análise mais profunda do fenômeno da seca, ainda é necessário considerar um conjunto de particularidades, além dos conceitos anteriores, para definir corretamente o tipo de seca a ser estudado, que são:

- A natureza do déficit hídrico;
- Unidade de tempo da série histórica;
- Os níveis de truncamentos para classificar a severidade de uma seca em um ponto;
- A abrangência espacial da seca.

Estas questões serão mais bem explicadas nos itens seguintes, lembrando que uma definição clara e concisa do evento depende principalmente do enfoque em interesse, bem como do objetivo das análises.

### 2.2.1 Natureza do Déficit Hídrico

O primeiro passo a ser dado na determinação de uma definição particular de seca, está na escolha da natureza do déficit hídrico, que é consequência do enfoque principal do estudo. Este déficit, como foi visto anteriormente, pode estar relacionado à precipitação, à vazão, à umidade do solo, às condições sócio-econômicas ou alguma combinação dentre os mesmos. Para a realização de uma análise completa da seca é necessário incluir todos os tipos de déficits juntos. Porém, a maior parte dos estudos tem focado apenas um aspecto do fenômeno da seca selecionando a “natureza do déficit hídrico” para determinar uma definição a ser estudada.

Dentre os diversos tipos de déficit hídricos, os mais freqüentemente estudados, no âmbito da engenharia de recursos hídricos, foram os déficits relativos à vazão e a precipitação. A precipitação tem sido comumente utilizada para a análise de seca meteorológica (CHANG, 1990), enquanto dados de vazões tem sido amplamente usados para a análise das secas hidrológicas (DRACUP et al., 1980; ZELENHASIC; SALVAI, 1987, CHANG, 1990, CLAUSEN; PEARSON, 1995). Esta constatação pode ser justificada pelo fato destes dois tipos de seca serem os estágios iniciais para todos os demais tipos de seca.

Apesar da seca climatológica dar início a todos os tipos de seca, os gestores de recursos hídricos costumam dar mais relevância à seca hidrológica, pois um período de escassez de chuva pode muito bem ser contornado se houver um sistema de águas, fixas ou móveis, com capacidade de satisfazer todas as necessidades de demanda da região. Ainda assim, o monitoramento da seca climatológica é fundamental, pois é a diminuição da pluviosidade a principal causa das baixas vazões, que normalmente iniciam a seca hidrológica.

Beran e Rodier (1985) fizeram uma distinção entre a seca hidrológica e baixas vazões. A principal característica de uma seca é a ocorrência de um déficit hídrico por algum objetivo específico. Baixas vazões são normalmente observadas durante um período de estiagem, mas é apenas um elemento característico da seca, ou seja, a magnitude da seca. Estudos sobre baixas vazões são descritos como análises que visam a compreensão do desenvolvimento físico nos fluxos de um ponto ao longo de um rio em um curto prazo. Análises hidrológicas da seca, em termos de estudos de déficits de vazão estão sempre relacionadas a um ou mais períodos de tempo em um dado contexto regional.

A definição de seca hidrológica centra a sua atenção sobre o processo de diminuição das vazões de córregos e rios, esgotamento de água armazenada nos reservatórios superficiais e lagos, e na diminuição dos níveis dos lençóis subterrâneos. Este conceito de seca



é frequentemente utilizado pelos planejadores que estão preocupados com suprimento de água dos municipais e/ou irrigação, abastecimento de água, geração de energia hidroelétrica, e de oportunidades recreativas (THOMAS L. T.; CHARLES A. T., 1999).

De acordo com Paixão (2003), outra definição típica de seca hidrológica é a de que a seca é o período durante o qual as vazões são insuficientes para suprir os usos estabelecidos de água. Outras secas, como a agrícola, são usualmente descritas em termos de falhas de outras variáveis, como na safra devido à diminuição na umidade do solo, sem qualquer referência à vazão. Mesmo assim, é compreensível que a seca seja geralmente definida como uma escassez de água com referência a uma necessidade específica.

### 2.2.2 Unidade de Tempo

Outro fator determinante no estudo da seca é a escolha da unidade de tempo que será usada para descrever as variáveis – vazão, precipitação, perda de safra, etc – do fenômeno, as quais são decorrência da natureza do déficit hídrico analisado. A seca é um evento temporário, com início e fim, dessa forma, suas variáveis devem ser apresentadas, quantitativamente, através de séries temporais, de modo que seja possível analisar a sua evolução.

Segundo Fleig et al. (2006), a escolha de uma unidade de tempo da série histórica adequada para um estudo específico da seca depende da hidrometeorologia da região, do tipo de seca, da vulnerabilidade da sociedade e da natureza naquela região, do objetivo do estudo e dos dados disponíveis.

Devido à falta de uma única definição padrão, essa escolha dessa unidade de tempo é subjetiva. Hudson e Hazen (1964) exemplificam o fato: na Indonésia uma seca é definida como um período de 6 dias consecutivos sem chuva, enquanto no outro extremo, em partes da Líbia uma seca é identificada somente depois de 2 anos consecutivos sem chuva .

A natureza do déficit hídrico analisado também é um fator determinante para a escolha unidade de tempo apropriada, visto que a seca climatológica pode se desenvolver rapidamente e "acabar abruptamente" enquanto a hidrológica necessita de um período prolongado de déficit de precipitação pluvial, entretanto persistirá por mais tempo que a primeira (HEIM, 2002). A seleção do período médio para um estudo particular da seca é dependente quase que exclusivamente, do propósito para o qual o estudo é pretendido (Dracup et al., 1980).

Clausen e Pearson (1995) afirmam que uma abordagem mais tradicional do estudo

temporal da seca analisando as pequenas vazões usando a vazão média mínima anual de uma duração fixa: são usados frequentemente um dia, sete dias ou 10 dias de duração. Zelenhasic e Salvai (1987) e Chang e Stenson (1990) usaram dados diários de vazão para os seus estudos, enquanto o método de Bonacci (1993) usa as vazões médias anuais.

A escolha da unidade de tempo afeta sensivelmente a análise das secas, pois, para uma dada duração do registro hidrológico, um período médio longo resulta em um número pequeno de secas e um período médio curto resulta em um número grande de falhas (secas). Por exemplo, a vazão média anual para um dado ano pode estar abaixo do normal a longo prazo e, deste modo, constituir um ano de seca, mas é muito provável que meses particulares dentro deste ano experimentem vazões acima do normal (PAIXÃO, 2003).

Desta forma, a série histórica utilizada no estudo das secas tem que ser descrita por uma unidade de que lhe forneça a precisão adequada para cada finalidade. A amostra deve ser grande o suficiente para garantir que suas estatísticas representem razoavelmente os parâmetros da população correspondente.

### 2.2.3 Nível de Truncamento

Após definir qual variável será utilizada para representar a *natureza do déficit hídrico* e qual a *unidade de tempo* que descreverá a sua série temporal, temos que encontrar o valor limite a partir do qual um dado evento pode, ou não, ser considerado um evento de seca. A este componente damos o nome de “nível de truncamento”, o qual serve para dividir uma série histórica em seções acima ou abaixo do normal. Um grande número de estudos tem utilizado a abordagem do nível truncamento advinda da Teoria dos Runs (YEVJEVICH, 1967) pela qual as secas são definidos como o períodos hidrológicos em que a variável é inferior a um determinado limiar. A Teoria dos Runs é útil na análise de séries históricas sequenciais de variáveis estocásticas ou determinísticas e, portanto, é bem apropriado para o estudo de eventos hidrológicos ou meteorológicos.

O nível de truncamento usado na análise de séries temporais de vazão pode ser selecionado de forma a refletir necessidades operacionais, tais como vazão, restrições ecológicas, de navegação e recreação (ZAIDMAN et al., 2001), embora seja mais usual a utilização de algum dado estatístico que represente o regime local de vazões. Os parâmetros estatísticos comumente usados como níveis de truncamento são as chamadas medidas de tendência central, dentre as quais encontramos a média, a mediana, a moda e os percentis.

A média aritmética representa o valor médio de uma amostra, de modo que obtenha

o mínimo desvio quadrático médio. A média é também a medida de tendência central mais sensível aos valores extremos. Os percentis são as medidas que dividem a amostra em 100 partes iguais, sendo o mais utilizado o percentil P50, mais conhecido como mediana, que é o elemento que ocupa a posição central da distribuição. Assim, ao se utilizar a mediana como nível de truncamento, metade dos valores de uma amostra serão classificados como baixos valores e a outra metade como altos valores. Por último, a moda é o parâmetro estatístico que representa o valor mais freqüente da amostra, sendo útil apenas quando um grupo de valores, ocorrem com muito maior freqüência que outros.

O uso da média ou da mediana como nível de truncamento de uma série histórica depende de diversos fatores, pois cada parâmetro apresenta vantagens diferentes. A média, utilizada por Bonacci (1993), é sensível a cada valor do conjunto, inclusive os extremos. Por outro lado, a mediana, utilizada por Griffiths (1990), é relativamente insensível aos valores extremos. Entretanto, de modo geral, a média possui certas propriedades matemáticas que a tornam mais atraente (PAIXÃO, 2003).

A escolha de um nível de truncamento deve ser baseada nas características de cada regime de vazões. Indicadores de baixa vazão, tais como percentis da curva de duração da vazão (FDC), são freqüentemente aplicados tanto para córregos perenes quanto para intermitentes (FLEIG et al., 2006). Para os córregos perenes, níveis de truncamento entre o percentil 70 (Q70) e o percentil 95 (Q95), a partir do FDC são freqüentemente aplicados, ou seja, vazões que sejam ultrapassadas durante 70-95% do tempo. Para vazões intermitentes tem que se adotar percentis de menor valor, como por exemplo os 20% sugeridos por Tate e Freeman (2000).

Outra abordagem sugerida por Tallaksen (2000) foi a utilização de um nível de truncamento variável que acompanhe a variabilidade sazonal de uma dada série de vazões, ao invés de utilizar o tradicional nível de truncamento fixo. Dessa forma, o nível de truncamento seria mais elevado no período do ano de maior vazão (inverno) e, conseqüentemente, mais baixo durante o período de baixas vazões (verão), traçando um retrato mais fiel do regime de vazões da região.

É interessante observar que assim como existe um alto grau de subjetividade na definição de seca, devido ao diversos fatores citados anteriormente, esta incerteza é transportada também para a escolha do nível de truncamento, pois é a partir deste que se pode caracterizar um evento como um período de seca ou não. Dessa forma, a escolha do nível de truncamento é uma função não somente do regime de vazões e das necessidades operacionais em questão, mas também de questões culturais da região e de preferências pessoais do

pesquisador.

#### 2.2.4 Abrangência Espacial

O último aspecto da seca a ser estudado é a sua abrangência espacial, que irá descrever *onde* e como a seca se distribuirá no espaço. A abrangência espacial pode ser dividida em dois tipos básicos distintos: a abordagem pontual e a abordagem regional.

Na abordagem pontual, o estudo se restringe a um único medidor de vazão, precipitação ou umidade do solo. Esta opção de regionalização muitas vezes não é viável para a análise da seca, pois os dados disponíveis são escassos e por vezes inconsistentes, sobretudo em pequenas bacias (SILVEIRA et al., 1998). Este fato pode impossibilitar uma análise mais profunda, enquanto a regionalização pode oferecer meios para aumentar este espaço amostral.

A segunda opção – a abordagem regional – define uma região de acordo com a similaridade espacial de funções, variáveis e parâmetros de cunho climatológico geomorfológico, geográfico, hidrológicos ou meteorológicos, independente da localização. Esta opção de regionalização engloba mais características e enriquece a análise (PAIXÃO, 2003). Neste tipo de regionalização pode-se agrupar os dados por possuírem característica homogêneas entre si ou baseando-se em meios estatísticos. Este método de regionalização de dados pode render resultados mais precisos que o método pontual, porém demanda mais esforço computacional e analítico devido ao maior número de dados utilizados.

Ambos os tipos de regionalização são amplamente utilizados, e sua escolha dependerá, principalmente, da consistência dos dados disponíveis e do tipo de estudo realizado. Estudos de seca em regiões pequenas (como micro-bacias, municípios, etc.) costumam utilizar uma abrangência pontual, pois uma única fonte de dados consegue descrever satisfatoriamente toda a região estudada. Em contrapartida, estudos de regiões maiores (como grandes bacias hidrográficas, países, etc.) necessitam de um grande número de fontes de dados para descrever a ocorrência de eventos de seca por toda a sua extensão. Zelhenasic e Salvai (1987) realizaram um estudo pontual dos rios Tisa e Sava da antiga Jugoslávia, pois os dois rios apresentavam características diferentes e utilizaram-se dados originados de um único medidor de vazão para cada rio.

Piechota et al. (2004) utilizaram dados de duas estações fluviométricas (uma no Rio Colorado, perto de Cisco, e outra no Rio Verde, perto de Rio Verde) para realizar um estudo regionalizado sobre a ocorrência de secas na Bacia do Rio Colorado no oeste dos EUA. Kucharski et al. (2008) utilizaram uma rede de estações climatológica no Pacífico equatorial e

no Atlântico para estudar a ocorrência de secas climatológicas no Nordeste Brasileiro, devido a alterações da circulação geral da atmosfera.

### 2.3 Teoria dos Runs

Há muito tempo, os hidrólogos acreditam que a Teoria dos Runs com base em ensaios de Bernoulli pode ser uma base adequada para prever o comportamento de seqüências de eventos hidrológicos (MOYÉ e KAPADIA, 1995). Este método criado por Yevjevich (1967) foi originalmente baseado na teoria estatística de séries seqüenciais temporais para analisar uma série com uma resolução temporal de um mês (ou mais). Propriedades estatísticas das distribuições como o *déficit hídrico*, *comprimento do run* (duração do fenômeno) e *somatório do run* (déficit volumétrico) são parâmetros característicos deste método, o que o torna muito atraente para o estudo das secas.

Classicamente, um *run* é definido como uma seqüência de observações do mesmo tipo, precedido e sucedido por uma ou mais observações de um tipo diferente. Os runs podem ser definidos de várias maneiras, sejam de uma seqüência contínua de uma variável estocástica ou de uma combinação de componentes estocásticos e determinísticos, tornando-a uma seqüência composta (PAIXÃO, 2003).

A Teoria dos Runs, inicialmente, definia as secas como períodos durante os quais a oferta de água não atendia a demanda atual de água. Segundo Fleig et al. (2006), tanto a oferta de água ( $S(t)$ ), assim como a demanda de água ( $D(t)$ ), estão expressos em séries temporais, e um evento de seca é definido como uma seqüência ininterrupta de valores negativos da série oferta menos demanda (Eq. 1):

$$Y(t) = S(t) - D(t). \quad (1)$$

Posteriormente, Yevjevich (1983) simplificou o conceito aplicando uma demanda constante. A demanda é representada por um nível de truncamento ( $Q_z$ ) e as secas são definidas como períodos em que a retirada seja inferior ao limite estabelecido. São características comuns deste método o início do déficit da seca ( $t_i$ ), a duração da seca ( $d_i$ ) o volume do déficit ou gravidade ( $v_i$ ) e o fluxo mínimo que ocorre durante o evento de seca ( $Q_{min,i}$ ) (Figura 1).

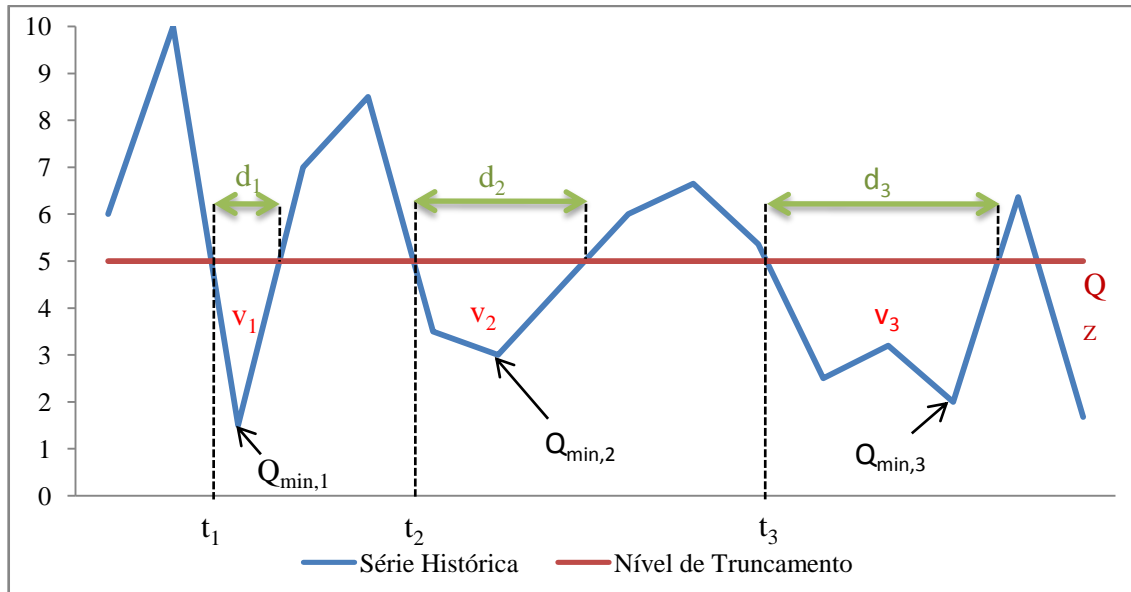


Figura 1 – Modelo da Teoria dos Runs

Características adicionais do déficit podem ser definidas, como a *intensidade da seca*, que é a razão do volume do déficit pela sua duração, e o *tempo de recuperação*. Esta última é definida como o tempo necessário para compensar certa fração do déficit pelos volumes decorrentes de eventos de superávit posteriores.

Os runs que representam eventos de seca também são chamados de *runs negativos*, pois representam a parcela da série histórica que se encontra abaixo do nível de truncamento. Por conseguinte, existem também os desvios positivos da série com relação ao nível de truncamento, chamados de *runs positivos*, que representam períodos durante os quais a oferta de água é igual ou superior a demanda. Assim, estes runs positivos não são de interesse para o presente estudo, visto que não caracteriza uma falha ou seca.

É importante ressaltar que um evento de seca é representado, neste método, pela seqüência ininterrupta de valores abaixo do nível de truncamento, ou seja, pelo run. Desta forma, um valor negativo da série temporal isoladamente não será considerado uma seca, mas sim o run do qual faz parte o será, seja ele composto por um ou mais eventos negativos.

O método foi originalmente introduzido por Yevjevich (1967) utilizando séries de vazões com unidade de tempo mensal ou superior mas, posteriormente, Zelenhasic & Salvai (1987) aplicaram o método a séries diárias. Ao se aplicar o método dos runs a séries diárias é possível obter informações mais detalhadas sobre o regime de vazões. Porém, o surgimento de dois problemas precisa ser considerado: o surgimento de pequenas vazões e de secas mutuamente dependentes (Figura 2).

Secas pequenas são eventos de curta duração e pequeno volume deficitário, e um

número muito elevado desse tipo de eventos na amostra pode mascarar a análise dos valores extremos. Já as secas mutuamente dependentes ocorrem durante um período prolongado de baixas vazões onde curtos períodos de vazões acima do nível de truncamento (desvios positivos) dividem o evento de seca em mais de um evento. Estes pequenos desvios positivos podem ser causados por chuvas eventuais ou influenciadas artificialmente. As secas mutuamente dependentes não podem ser consideradas eventos independentes uma da outra e, para análises de valores extremos, é recomendado combinar estes acontecimentos e transformá-lo em um evento só (FLEIG et al., 2006).

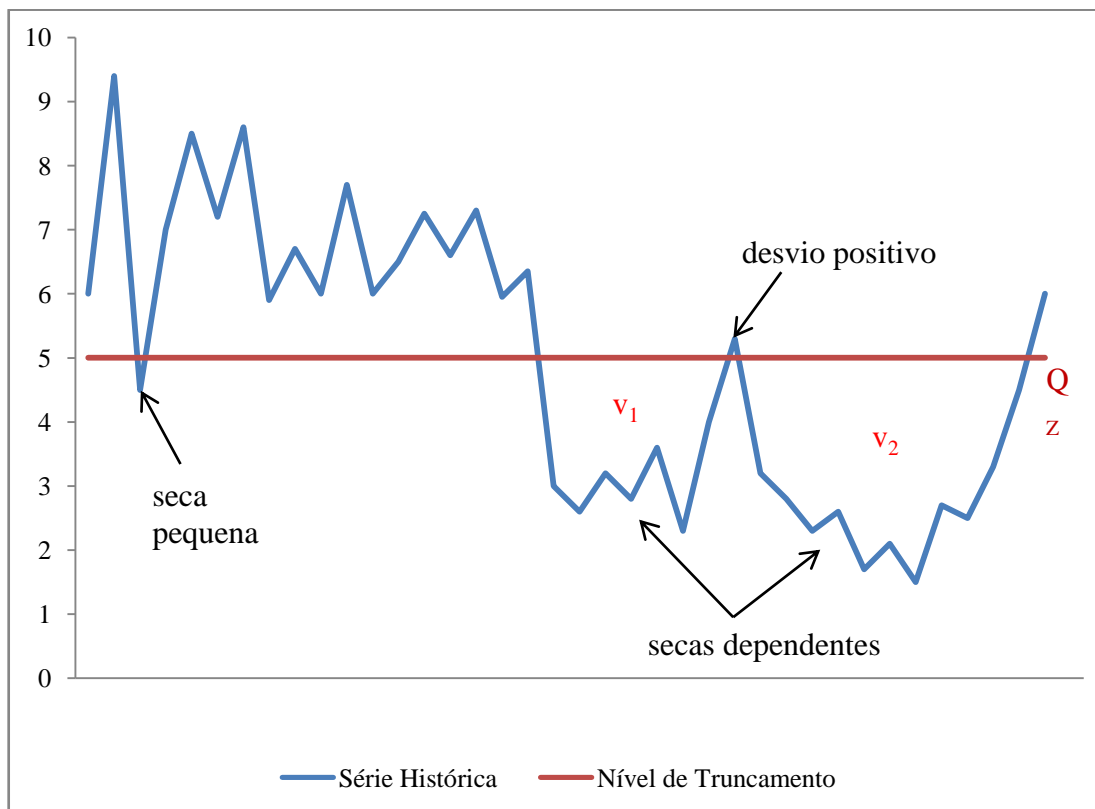


Figura 2 – Exemplo de secas pequenas e secas mutuamente dependentes.

O uso mais freqüente da Teoria dos Runs tem se baseado na identificação, caracterização e gerenciamento das secas hidrológicas anuais e multianuais (Dracup et al., 1980; Chang e Stenson, 1990; 1991; Clausen e Pearson, 1995; Moye e Kapadia, 1995). Dentre os diversos propósitos aos quais se destinam estas análises, pode-se destacar o fornecimento de água para uso doméstico, irrigação, geração de energia, diluição de poluentes industriais, recreação e migração de peixes, os quais são todos dependentes da disponibilidade contínua das descargas previstas nos rios. A Teoria dos Runs também é extensivamente utilizada para avaliar a capacidade de armazenamento de reservatórios que se destinam a fornecer água com uma dada garantia (PAIXÃO, 2003).

## 2.4 Indicadores de Sustentabilidade

Atualmente, existe um consenso de que a sustentabilidade deve estar presente na elaboração e no controle de qualquer sistema de gestão; porém, há uma grande dificuldade em implementá-la. A maneira mais utilizada para este processo é a utilização de índices e indicadores de desempenho como ferramentas para medir o nível de sustentabilidade alcançado por cada ação. O maior desafio encontrado por esta metodologia reside na criação e na escolha dos indicadores apropriados para cada estudo.

O termo indicador é originário do latim *indicare*, que significa descobrir, apontar, anunciar, estimar (HAMMOND et al., 1995). Segundo Mitchell (1996), indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade. Para McQueen e Noak (1988), um indicador é uma medida que resume informações relevantes de um fenômeno particular ou um substituto dessa medida. Gallopin (1996) diz ainda que os indicadores mais desejados são aqueles que resumam ou simplifiquem as informações relevantes, fazendo com que certos fenômenos que ocorrem na realidade se tornem mais aparentes. Dessa forma, o objetivo dos indicadores é agrupar e quantificar as informações de modo que sua significância fique mais aparente.

Tunstall (1992), fez uma análise dos indicadores a partir das funções que estes podem desempenhar, que são:

- Avaliação de condições e tendências;
- Comparação entre lugares e situações;
- Avaliação de condições e tendências em relação às metas e aos objetivos;
- Prover informações de advertência;
- Antecipar futuras condições e tendências.

É muito comum a confusão sobre o significado de *índice* e *indicador*, muitas vezes são utilizados erroneamente como sinônimos. Segundo Shields et al. (2002), um *índice* revela o estado de um sistema ou fenômeno. Aparentemente, índice e indicador possuem o mesmo significado, porém, para muitos pesquisadores, a diferença está no *nível de agregação* onde um índice é o valor agregado final de todo um procedimento de cálculo onde se utilizam, inclusive, indicadores como variáveis que o compõem (SICHE et al., 2007). Desta forma, podemos concluir que um índice é simplesmente um indicador de alta categoria (KHANNA, 2000).

Esta diferenciação de classificação decorrente do nível de agregação entre índice e



indicador pode ser melhor visualizada a partir da chamada pirâmide de informações (Figura 3).



Figura 3 – Pirâmide de informações do nível de agregação de dados.  
Fonte: adaptado de Shields et al. (2002).

Nesta pirâmide, observamos que o topo corresponde ao grau máximo de agregação de dados, enquanto a base representa os dados primários desagregados. Cada metodologia de avaliação possui suas necessidades, sendo que a maior parte deles não trabalha com índices ou indicadores intermediários, utilizando somente os dados primários e agregados para obter o índice final.

Wall et al. (1995) alertam que, muito embora indicadores altamente agregados sejam necessários para aumentar o grau de conhecimento e consciência a respeito de um dado problema, indicadores desagregados são, ainda assim, essenciais para que se possa tomar iniciativas específicas de ação. Um problema fundamental que existe nos indicadores agregados é a perda de informações que ameaça a visualização da saúde efetiva do sistema, mascarando alguns setores e realçando outros.

Todos os sistemas de indicadores existentes e utilizados foram desenvolvidos para razões específicas. Podem ser classificados em ambientais, econômicos, de saúde e sociais, cada um destes sistemas de indicadores têm características próprias em função de seu propósito. Os sistemas de indicadores e índices de sustentabilidade, muitas vezes, englobam mais de um destes fatores (sociais, econômicos e ambientais), tornando-os muito mais complexos que os demais. Dessa forma, os problemas do desenvolvimento sustentável requerem sistemas interligados, indicadores inter-relacionados ou agregação de diferentes indicadores.

Bogardi e Kundzewicz (2002) dividem os medidores de sustentabilidade em dois tipos distintos:

- Os Índices de Critérios Ponderados: consiste no preenchimento de uma lista de critérios, muitos dos quais subjetivos;
- Os Índices Estatísticos Ponderados: são índices numéricos aplicados a variáveis estocásticas.

A escolha do tipo de medidores utilizados dependerá do tipo de estudo realizado e das características de cada método. Assim, é necessário conhecer os dois tipos de medidas para saber qual deles é o mais indicado para o estudo de um caso particular.

#### 2.4.1 Índices de Critério Ponderados

Este procedimento foi proposto pelo Laboratório de Hidráulica de Delft, na Holanda, com a finalidade de medir ou quantificar em que medida os projetos podem contribuir para o desenvolvimento sustentável. Este processo consiste em dar resposta a uma lista de critérios, as quais podem ser muito subjetivas. Trata-se de um modelo multi-critério que analisa os impactos em diferentes âmbitos (econômico, social, ambiental,...).

Foram identificados cinco critérios principais, sendo cada um destes divididos em quatro sub-critérios. Os cinco critérios principais e seus respectivos sub-critérios são:

- a) Aspectos socioeconômicos e impactos no crescimento, resiliência e estabilidade.
  - Efeitos sobre o rendimento das distribuições
  - Efeitos sobre o patrimônio cultural
  - Viabilidade na estrutura socioeconômica
- b) O uso dos recursos naturais e ambientais, incluindo matérias-prima e despejo de resíduos dentro da capacidade de carga de sistemas naturais.
  - Matérias-prima e energia
  - Descarga de resíduos (ciclos fechados de material)
  - Uso dos recursos naturais (água)
  - Efeitos sobre a resiliência e vulnerabilidade da natureza.
- c) Valorização e conservação dos recursos naturais e ambientais, e a melhoria da capacidade de carga dos recursos naturais e ambientais.
  - Conservação da água
  - Acréscimo de terras ou costas

- Melhoria e conservação da fertilidade do solo
  - Desenvolvimento da natureza e conservação dos valores naturais
- d) Saúde pública, segurança e bem-estar.
- Efeitos sobre a saúde pública
  - Efeitos na segurança (riscos)
  - Efeitos sobre o incomodo/estorvo (cheiro, poeira, ruído, congestionamento)
  - Efeitos sobre as condições de vida e trabalho
- e) Flexibilidade e sustentabilidade das obras de infra-estrutura, gestão de oportunidades para utilização multifuncional e oportunidades de se adaptar as mudanças circunstanciais.
- Oportunidades para a fase de desenvolvimento
  - Oportunidades para a utilização multifuncional, gestão e responder a novas condições
  - Qualidade sustentável das estruturas (corrosão, desgaste)
  - Oportunidades de reabilitação da situação original (regenerações autônomas, reconstrução e restauração ativa)

É dado o mesmo peso a cada critério. O somatório dos valores numéricos dados a cada sub-critério é o *índice de sustentabilidade*. Quanto maior for o valor do índice, maior será a contribuição do projeto para o desenvolvimento sustentável. Este modelo permite visualizar qual aspecto mais contribui ou não para o desenvolvimento sustentável.

#### 2.4.2 Índices Estatísticos Ponderados

Os índices de sustentabilidade podem ser definidos também como a separação ou a combinação ponderada de medidas estatísticas de vários critérios econômicos, ambientais, ecológicos e sociais que contribuem para a sustentabilidade. Os valores desses critérios podem ser expressos tanto quantitativamente quanto qualitativamente (fraco, mediano, bom, excelente) e são determinados a partir de séries temporais de sistemas de variáveis (ASCE, 1998).

Dentre todos os índices estatísticos ponderados existentes, podemos destacar os indicadores definidos por Hashimoto et al. (1982), como *confiabilidade*, *resiliência* e *vulnerabilidade*. São critérios, desenvolvidos inicialmente para o estudo de recursos hídricos, que podem medir o desempenho de um sistema, especialmente em períodos críticos como

eventos de seca, além de possibilitar a previsão de cenários futuros. Posteriormente, Ganoulis (1994) definiu tais indicadores como *índices de desempenho*, medidas que indicam o comportamento do sistema devido à influência de fatores externos que podem causar efeitos indesejáveis. Em outras palavras, os *índices de desempenho* monitoram a saúde do sistema, indicando ou prevendo alguma situação de falha do mesmo, para que seja possível remediar este problema de maneira eficaz.

Segundo Zongxue et al. (1998), os índices de desempenho são ferramentas utilizadas para quantificar critérios de risco e incorporá-los em modelos matemáticos de planejamento e operação que possam resultar na melhoria das políticas de sistemas de recursos hídricos. Estes riscos podem estar relacionados ao perigo de inundações, baixas vazões dos rios, diminuição do volume armazenado em reservatórios, etc.

Peters et al. (2005) utilizaram os índices de desempenho para estudar o comportamento das águas subterrâneas durante eventos de seca, já McMahon et al. (2006) utilizaram estes índices como ferramenta para dimensionar a capacidade de reservatórios de água.

A seguir, serão apresentados alguns dos indicadores e índices de desempenho mais utilizados ao longo do tempo, principalmente no estudo de desempenho de sistemas hídricos.

#### 2.4.2.1 Confiabilidade

Confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema descrito por uma variável aleatória  $X_t$  no tempo  $t$  ( $t = 1, 2, 3, \dots, n$ ) se encontrar em um estado satisfatório, ou seja, é a probabilidade do sistema não estar em falha (VOGEL; BOLOGNESE, 1995). É um conceito que tem sido amplamente utilizado em técnicas de dimensionamento de reservatórios de armazenamento de água, onde é mais conhecido como *garantia*. Uma expressão geral para se estimar esta medida é dada pela Eq. 2:

$$\alpha = \text{Prob}[X_t \in S]; \quad (2)$$

onde a frequência ou probabilidade  $\alpha$  representa a confiabilidade e  $S$  representa o conjunto de todos os valores satisfatórios.

Nos sistemas de recursos hídricos, a confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um sistema atender a uma da demanda de água (Eq. 3):

$$\alpha = \frac{N_s}{N}; \quad 0 < \alpha \leq 1 \quad (3)$$

onde  $N_s$  é o número de intervalos em que a demanda foi plenamente atingida, e  $N$  é o número total de intervalos que abrange o período de análise histórica ou simulação. Quando o intervalo de tempo é mensal ou anual, chama-se confiabilidade mensal ou anual, respectivamente. Deve notar-se que uma falha anual (ou seja, a oferta não consegue suprir a demanda pelo menos alguma vez durante o ano) pode resultar de um ou mais meses de insucesso no ano, e assim a confiabilidade anual será sempre inferior a confiabilidade mensal, exceto quando o sistema tiver falhado em cada um dos 12 meses do ano hidrológico.

McMahon et al. (2006), em seu estudo de reservatórios de armazenamento de água, chama esta medida de *confiabilidade temporal*, isto para diferenciar de outra modalidade de confiabilidade, a *confiabilidade volumétrica*.

Confiabilidade volumétrica é definida por ele como o volume de água fornecida para um determinado uso, dividido pelo total durante todo o período estudado (Eq. 4):

$$C_{vol} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (D_i - D'_i)}{\sum_{i=1}^N D_i}; \quad 0 < C_{vol} \leq 1; \quad D'_i \leq D_i; \quad (4)$$

onde  $C_{vol}$  é confiabilidade volumétrica,  $D_i$  é demanda durante o  $i$ ésimo período,  $D'_i$  é o volume efetivamente fornecido durante o  $i$ ésimo período e  $N$  é o número de intervalos de tempo da simulação, de forma que  $C_{vol} = 1$  somente se  $D_i$  for totalmente satisfeita. É interessante notar que  $C_{vol}$  será sempre igual ou superior a  $\alpha$ , porque mesmo durante um evento de seca o reservatório pode não estar completamente vazio e, dessa forma, o sistema ainda poderia oferecer alguma quantidade de água, embora menor do que a esperada.

#### 2.4.2.2 Resiliência

Resiliência é um indicador da velocidade de recuperação de uma condição insatisfatória de um sistema que foi introduzido por Matalas e Fiering (1977). É a probabilidade de que o valor  $X_{t+1}$  satisfatório de uma variável aleatória suceda um valor  $X_t$  insatisfatório. De acordo com esta definição, um sistema resiliente é aquele capaz retornar a um estado satisfatório a partir de um estado de falha, em um curto espaço de tempo. Dessa forma, a

resiliência pode ser definida como a probabilidade condicional (Eq. 5):

$$\rho = \text{Prob}\{X_t \in S, X_{t+1} \in F\}; \quad (5)$$

onde  $\rho$  representa a resiliência e  $F$  o conjunto de todos os valores insatisfatórios, ou de falha, do período analisado.

Hashimoto et al. (1982) utilizaram uma expressão matemática mais simples para medir a resiliência de sistemas de recursos hídricos, (Eq. 6):

$$\rho = \frac{f_s}{f_d}; \quad f_d \neq 0 \quad (6)$$

onde  $f_s$  é o número de seqüência contínuas de falhas e  $f_d$  é o número total de falhas individuais da série analisada, em outras palavras, a resiliência é o inverso da média da duração das falhas contínuas. É importante notar que com esta definição, para o  $f_s = 0$  e para a condição de apenas um fracasso,  $\rho$  será igual a unidade em ambos os casos (Eq. 7). Assim tem-se:

$$\begin{cases} \rho = \frac{f_s}{f_d}, & f_s \neq 0, \\ \rho = 1, & f_s = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Outra medida de resiliência de reservatórios foi introduzida por Hazen (1914), definida pela Eq. (8):

$$m = \frac{(1 - \alpha_m)\mu}{\sigma} = \frac{1 - \alpha_m}{CV}; \quad (8)$$

onde  $\alpha = D/\mu$  e representa a demanda relativa anual (expressa pela razão da demanda anual  $D$  pela vazão afluente média anual  $\mu$ ) e  $CV = \mu/\sigma$  é o coeficiente de variação (expresso pela razão da vazão afluente média anual  $\mu$  pelo seu desvio padrão  $\sigma$ ).

Vogel e Bolognese (1995) argumentam que  $m$  está relacionado com a probabilidade de um reservatório de armazenamento se recuperar depois de uma falha, portanto, é uma medida da resiliência do sistema. Em geral, sistemas com regime de armazenamento interanual

exibem um valor no intervalo  $0 < m < 1$ , enquanto que sistemas com regimes predominantemente sazonais exibem um valor de  $m > 1$  (PAIXÃO, 2003). Como o indicador  $m$  é maior para sistemas mais resilientes, ou seja, que tendem a se reabastecer mais rapidamente depois de esvaziados, o que é exatamente o que acontece em sistemas dominados por requerimentos de armazenagem sazonal ( $m > 1$ ), esta medida pode ser considerada uma medida indireta de resiliência. Contudo,  $m$  não é uma função direta de armazenamento e como ele é insensível as características do reservatório, a sua utilização como um índice de recuperação é questionável (MCMAHON et al., 2006)

#### 2.4.2.3 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade é a medida estatística da gravidade de uma falha, quando esta ocorre (ASCE, 1998). A vulnerabilidade está relacionada com a magnitude volumétrica dos eventos de seca e se propõe medir quão danosos são estes eventos para o sistema. Apesar de este indicador ser utilizado com frequência no estudo da seca, a sua definição ainda é inconsistente. Alguns autores definem vulnerabilidade como o déficit hídrico médio da seca enquanto outros a definem como o valor máximo da seca (PETERS et al., 2005). Uma das definições matemáticas de vulnerabilidade mais aceitas para o estudo das secas, foi proposta por Hashimoto et al. (1982), e é expressa pela Eq. (9) como:

$$\eta' = \frac{\sum_{j=1}^{f_s} \text{máx}(s_j)}{f_s}; \quad (9)$$

onde  $\eta'$  representa a vulnerabilidade,  $s_j$  é o volume do déficit durante o  $j$ -ésimo período de falhas contínuas e  $f_s$  é o número total de seqüências de falhas contínuas. Este indicador calcula uma espécie de média dos eventos mais desfavoráveis de cada seqüência de falhas contínuas.

Um problema existente na Eq. (9) é que, ao contrário dos outros indicadores de desempenho, ele não é uma medida adimensional. Assim, no estudo de reservatórios de armazenagem, o valor da vulnerabilidade irá variar proporcionalmente a variação de sua capacidade, o que altamente indesejável, pois prejudica a análise comparativa entre diferentes sistemas e também uma possível combinação deste indicador com os demais. Uma forma de evitar esta anomalia é transformar esta expressão de vulnerabilidade em uma forma adimensional dada pela Eq. (10):

$$\eta = \frac{\eta'}{D_f}; \quad 0 < \eta \leq 1 \quad (10)$$

onde  $\eta$  é a *vulnerabilidade adimensional*, ou vulnerabilidade relativa, e  $D_f$  é a demanda durante o período da falha (que será igual a  $D$  se ela não se alterar com o tempo).

#### 2.4.2.4 Índice de Sustentabilidade

É natural que, com o andamento dos estudos dos indicadores de desempenho, os pesquisadores desenvolvam índices combinando critérios de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade, com o objetivo de conseguir uma visão mais abrangente do funcionamento do sistema. Loucks (1997) desenvolveu uma medida na qual combinou este três indicadores e a denominou *índice de sustentabilidade*, matematicamente expresso pela Eq. (11):

$$K_s = \alpha \times \rho \times (1 - \eta); \quad 0 < K_s \leq 1 \quad (11)$$

onde  $K_s$  é o índice de sustentabilidade.

É interessante notar que a vulnerabilidade relativa nesta equação está expressa pelo seu complemento, isso porque é o único dos três indicadores de desempenho que é inversamente proporcional à sustentabilidade.

Uma das desvantagens desse índice é que ele é o resultado do simples produto entre os três indicadores, o que pode torná-lo muito sensível a um indicador específico, diminuindo a influência dos demais. Visando eliminar este problema, Zongxue et al. (1998) combinaram os conceitos de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade para produzir uma medida para mensurar a sustentabilidade de reservatórios denominada **índice de risco de seca** (DRI), definido pela Eq.(12):

$$DRI = \xi_1(1 - \alpha) + \xi_2(1 - \rho) + \xi_3(\eta); \quad 0 < DRI \leq 1 \quad (12)$$

onde as constantes  $\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1$ .

O uso das constantes proporciona uma ponderação de cada indicador de desempenho, mas torna o uso desse indicador mais complexo, pois a escolha destes valores



deve ser criterioso. Em seu estudo, Zongxue deu o mesmo peso para as três constantes, obtendo  $\xi_1, \xi_2, \xi_3 = 1/3$ .

### 3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho descreve as etapas do processo experimental realizado para o estudo dos indicadores de sustentabilidade de reservatórios para a Bacia do Rio Jaguaribe. Este processo foi subdividido em 3 etapas distintas: a obtenção de dados, a operação simulada dos reservatórios e a escolha e formulação dos seus indicadores de sustentabilidade; as quais serão detalhadamente descritas a seguir.

Com o objetivo de analisar a evolução das secas hidrológicas em reservatórios, sob diferentes cenários, selecionou-se 34 reservatórios localizados na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe. Trata-se de uma bacia hidrográfica típica do Nordeste Brasileiro semi-árido (ocupando cerca de 48 % da área total do Estado do Ceará). A área total da bacia é de aproximadamente 72.645 km<sup>2</sup>, abrange 81 municípios, e as cabeceiras de suas sub-bacias servem de limite entre o Estado Ceará e os estados do Piauí, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Pela sua grande dimensão a bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe foi subdividida, dentro do Plano Estadual dos Recursos Hídricos, em 5 regiões hidrográficas: Bacia do Alto Jaguaribe, Bacia do Médio Jaguaribe, Bacia do Baixo Jaguaribe, Bacia do Rio Salgado e Bacia do Rio Banabuiú (Figura 4).

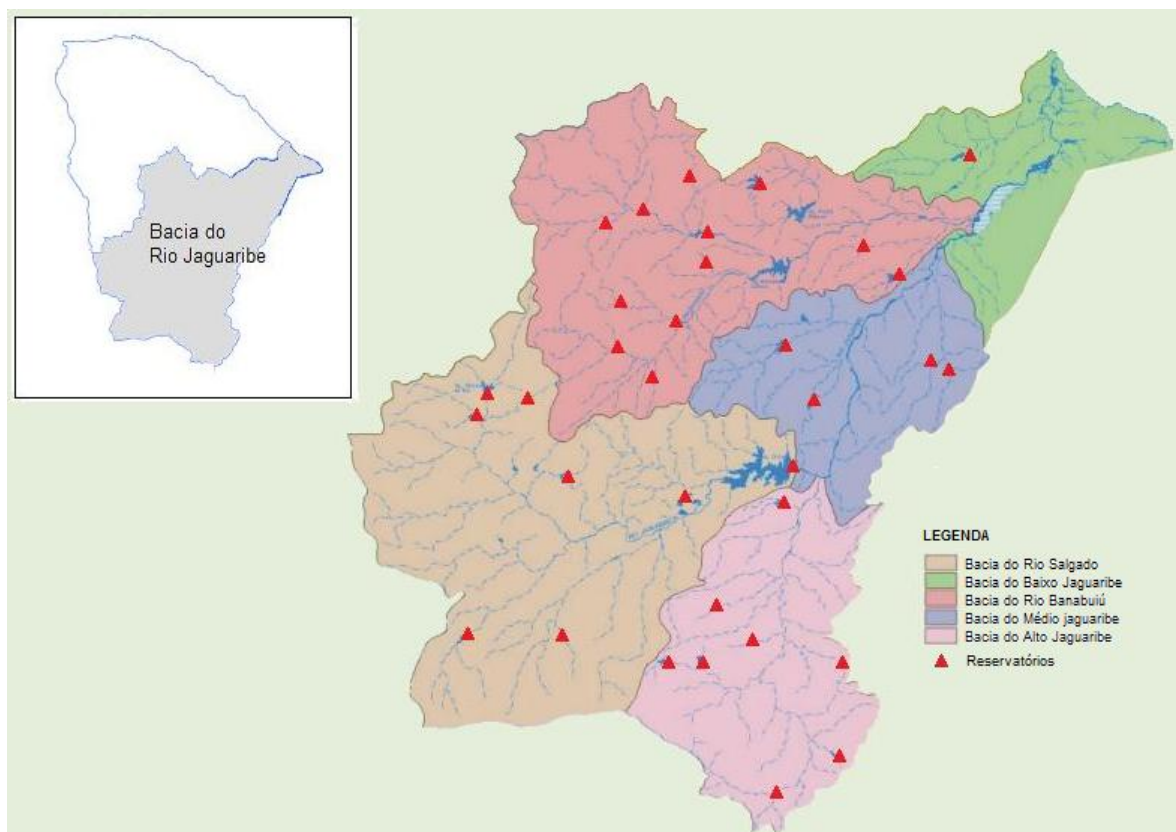


Figura 4 – Regiões hidrográficas da Bacia do Rio Jaguaribe.

A Bacia do Rio Jaguaribe é constituída de quatro tipos climáticos: úmido, sub-úmido, semi-árido e árido, sendo que 60% da bacia é abrangida pelo clima semi-árido, que ocorre no sentido NE-SO, desde as proximidades do litoral até o extremo sudoeste. Este clima predominantemente semi-árido pode ser atribuído à alta variação sazonal da precipitação, caracterizada pela concentração da pluviosidade em poucos meses, e pela elevada evaporação potencial média anual, próxima a 2,00 m na maior parte do Estado do Ceará.

### **3.1 Dados Utilizados**

Um dos motivos pelo qual se escolheu esta bacia para os estudos do presente trabalho foi a facilidade de obtenção dos dados dos reservatórios localizados nela, através do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe (CEARÁ, 1999). O fato de todos os dados serem extraídos da mesma fonte garante uma maior confiabilidade e homogeneidade nos resultados. Precisava-se, para cada reservatório analisado, de um conjunto de:

- série histórica de vazão média mensal;
- precipitação média mensal;
- evaporação média mensal;
- curva cota x volume;
- capacidade máxima.

Sendo que os dados de precipitação e evaporação deveriam estar contidos na bacia hidrográfica do reservatório ou, pelo menos, nas proximidades do mesmo. Deveriam ser obtidas as curvas cota x volume e as capacidades máximas reais de cada reservatório estudado, permitindo a extrapolação das curvas cota x volume para a simulação de capacidades fictícias maiores que a real.

Todos os dados de entrada usados na realização deste trabalho estão dispostos nos itens subseqüentes deste capítulo. A Tabela 1 mostra algumas características gerais dos 34 reservatórios estudados.

Tabela 1 – Características gerais dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Sub-Bacia	Reservatório	Município	Rio ou Riacho	Capacidade (hm <sup>3</sup> )
Alto Jaguaribe	Canoas	Assaré	Riacho São Miguel	169,25
	Favelas	Tauá	Das Favelas	30,00
	Orós	Orós	Orós	1956,26
	Poço da Pedra	Campos Sales	Conceição	50,00
	Rivaldo de Carvalho	Catarina	Condado	6,43
	Trici	Tauá	Trici	16,50
	Trussu	Iguatu	Trussu	263,00
	Várzea do Boi	Tauá	Carrapateira	51,82
Médio Jaguaribe	Canafistula	Iracema	Foice	13,12
	Ema	Iracema	Bom Sucesso	10,39
	Joaquim Távora	Jaguaribe	Feiticeiro	23,66
	Riacho do Sangue	Solonópole	Do Sangue	61,42
Baixo Jaguaribe	Santo Antônio de Russas	Russas	Carnaúba	29,72
Banabuiú	Boa Viagem	Boa Viagem	Boa Viagem	47,00
	Cedro	Quixadá	Sitiá	126,00
	Cipoada	Morada Nova	Santa Rosa	17,25
	Fogareiro	Quixeramobim	Quixeramobim	118,81
	Patu	Senador Pompeu	Patu	71,83
	Pedras Brancas	Banabuiú	Sitiá	434,00
	Poço do Barro	Morada Nova	Livramento	52,00
	Quixeramobim	Quixeramobim	Quixeramobim	54,00
	Riacho dos Tanques	Senador Pompeu	Muxuré	12,78
	Riacho Verde	Quixeramobim	Pirabiú	14,67
	São José II	Piquet Carneiro	São Gonçalo	29,15
	Serafim Dias	Mombaça	Banabuiú	43,00
	Trapiá II	Pedra Branca	Riacho Cachoeira	18,19
	Salgado	Atalho II	Juazeiro do Norte	Dos Carneiros
Ingazeiro		Jati	Dos Porcos	108,25
Lima Campos		Granjeiro	Rosário	11,32
Olho d'água		Icó	São João	63,65
Prazeres		Várzea Alegre	Machado	21,30
Quixabinha		Barro	Das Cuncas	32,50
Riacho dos Carneiros		Mauriti	Do Boi	32,51
Thomas Osterne		Crato	Carás	28,79

### 3.1.1 Vazões Afluentes

As séries históricas de vazões mensais obtidas do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe são, na verdade, séries sintéticas obtidas por um modelo chuva-deflúvio. Este tipo de modelo busca reconstituir séries históricas de vazões fluviais a

partir de séries históricas de precipitações, que são geralmente mais extensas que as séries históricas de vazão. Em resumo, esse procedimento pode ser entendido como uma medida indireta da vazão que ocorreu em determinado curso de água.

Para a geração de séries de vazões mensais afluentes a cada reservatório contido neste Plano, fez-se uso do modelo computacional de chuva-deflúvio MODHAC, que utiliza 12 parâmetros dos quais oito descrevem as características físicas das bacias e dois funcionam como coeficientes de precipitação e evaporação. Foram utilizados também dados de 14 postos fluviométricos para a calibração dos resultados obtidos pelo programa (Tabela 2). Para a geração de cada série de vazões afluentes foram utilizados os parâmetros do posto fluviométrico, no qual, na maior parte das vezes, a bacia do açude estava inserida.

Tabela 2 – Postos fluviométricos utilizados para a calibração do MODHAC.

<b>nº</b>	<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Rio ou Riacho</b>	<b>Área da Bacia Controlada (Km<sup>2</sup>)</b>
01	36020000	Arneiroz	Jaguaribe	5853,05
02	36045000	Malhada	Conceição	3358,55
03	36125000	Sítio Poço Dantas	Bastiões	3490,96
04	36128000	Poço dos Paus	Cariús	5781,18
05	36160000	Iguatu	Jaguaribe	20312,33
06	36180000	Suassurana	Trussu	2010,29
07	36210000	Sítio Lapinha	Salgado	1847,52
08	36230000	Sítio Oitis	Rch. Dos Porcos	2229,11
09	36250000	Podimirim	Porcos	4489,97
10	36270000	Lavras da Mangabeira	Salgado	9402,22
11	36280000	St. Antônio/Icó	Salgado	11177,26
12	36290000	Icó	Salgado	12416,62
13	36460000	Boqueirão do Patu	Patu	959,80
14	36470000	Senador Pompeu	Banabuiú	4507,08
15	36520000	Quixeramobim	Quixeramobim	6958,96
16	36550000	Boq. Pedras Brancas	Sitiá	2072,47

Uma ressalva deve ser feita para os açudes pertencentes às sub-bacias do Médio e Baixo Jaguaribe, pois estas não possuem nenhuma estação fluviométrica. Neste caso, foi feita uma análise comparativa entre o uso do solo das bacias hidrográficas dos açudes e das estações fluviométricas de Quixeramobim, Boqueirão do Patu, Suassurana e Pedras Brancas, com o objetivo de identificar as bacias que apresentassem categorias de uso do solo predominantes semelhantes, o que representa uma proximidade no escoamento superficial.

Além disso, infelizmente, alguns açudes dispunham de séries de precipitações médias com extensão insuficientemente longa que não permitiam a geração de vazões afluentes

num período médio de 85 anos, indo de 1912 a 1996, período estabelecido como ideal para os estudos de vazão regularizada dos grandes açudes para o Plano. A Tabela 3 mostra as vazões médias e os coeficientes de variação (CV) característicos das séries de vazões afluentes a cada reservatório.

Tabela 3 – Vazões médias e coeficientes de variação dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Reservatório</b>	<b>Rio ou Riacho</b>	<b>Vazão Média (hm<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>CV</b>
Atalho II	Dos Porcos	98,24	2,08
Boa Viagem	Boa Viagem	28,65	1,38
Canafistula	Foice	5,97	1,86
Canoas	Riacho São Miguel	19,35	1,47
Cedro	Sitiá	25,67	1,38
Cipoada	Santa Rosa	31,99	1,55
Ema	Bom Sucesso	9,63	1,89
Favelas	Das Favelas	31,96	1,61
Fogareiro	Quixeramobim	242,01	1,26
Ingazeiro	Rosário	15,30	2,37
Joaquim Távora	Feiticeiro	12,86	2,76
Lima Campos	São João	25,05	1,09
Olho d'água	Machado	5,49	1,45
Orós	Orós	880,22	1,32
Patu	Patu	81,05	1,29
Pedras Brancas	Sitiá	157,21	1,55
Poço da Pedra	Conceição	45,10	1,53
Poço do Barro	Livramento	29,33	1,55
Prazeres	Das Cuncas	6,30	1,22
Quixabinha	Do Boi	3,54	1,94
Quixeramobim	Quixeramobim	133,55	1,32
Riacho do Sangue	Do Sangue	76,81	1,24
Riacho dos Carneiros	Dos Carneiros	3,91	1,38
Riacho dos Tanques	Muxuré	3,09	1,35
Riacho Verde	Pirabiú	2,21	1,93
Rivaldo de Carvalho	Condado	12,60	1,27
Santo Antônio de Russas	Carnaúba	90,41	1,04
São José II	São Gonçalo	13,88	1,52
Serafim Dias	Banabuiú	99,92	1,53
Thomas Osterne	Carás	6,34	1,32
Trapiá II	Riacho Cachoeira	15,03	1,20
Trici	Trici	25,74	1,58
Trussu	Trussu	73,28	1,29
Várzea do Boi	Carrapateira	55,34	1,61

### 3.1.2 Precipitações

Devido ao tipo de simulação hidrológica de reservatórios empregada neste trabalho, como será descrita no Item 3.2, foi necessária somente a obtenção dos valores médios de precipitação mensal para cada localidade analisada. Os dados obtidos do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe são originários do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) e foi escolhido um posto diferente para representar a evaporação em cada reservatório. A Tabela 4 mostra os valores médios mensais de precipitação encontrados e suas respectivas estações pluviométricas.

### 3.1.3 Evaporações

Assim como os dados de precipitação, foi necessária somente a obtenção dos valores médios mensais para a evaporação de cada localidade. Apesar disso, diferentemente dos dados de precipitação, foram utilizadas dados de apenas quatro postos – Barbalha, Iguatu, Quixeramobim e Tauá – devido a pouca variação espacial da evaporação potencial e da menor quantidade de séries históricas desse tipo de medida. Estes dados também são originários do PERH e foram coletados a partir de tanques classe A com fator de tanque de 0,70. A Tabela 5 mostra os valores médios mensais de evaporação e o posto utilizado em cada reservatório.

### 3.1.4 Curvas Cota x Volume

Foram obtidas, também através do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe, as curvas cota volume de projeto dos 34 reservatórios analisados. Entretanto, no presente trabalho, os reservatórios foram simulados com outras capacidades além das reais que, muitas vezes, não eram suportadas pelas curvas cota x volume adquiridas. A solução para este impasse foi a extrapolação das curvas de modo que estas abrangessem todas as capacidades desejadas.

A extrapolação foi realizada ajustando uma linha de tendência polinomial de terceira ordem ao gráfico da curva cota x volume utilizando o programa Excel 2007 e obtendo pontos adicionais desta linha até que a curva alcance o tamanho desejado. A Figura 5 mostra, como exemplo, o gráfico da extrapolação da curva do reservatório Trici. Todas as curvas cota x volume já extrapoladas estão contidas no Anexo A.

Tabela 4 – Precipitação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Estação	P <sub>i</sub> (mm)												Total
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Atalho II	3852033 - Poço	140,90	169,30	191,90	174,00	25,80	22,40	12,90	0,90	6,60	24,10	28,10	61,30	858,20
Boa Viagem	3800256 - Boa Viagem	53,70	110,10	170,70	180,60	96,30	41,60	19,80	5,10	4,40	2,00	4,40	23,50	712,20
Canafístula	3813532 - Ema aç.	60,80	116,70	217,90	198,20	116,70	47,20	22,10	4,30	2,20	3,40	5,50	19,10	814,10
Canoas	3830728 - Assaré	93,00	131,50	185,20	131,80	39,60	13,60	4,70	5,10	6,10	13,60	22,50	49,80	696,50
Cedro	2891988 - Cedro aç.	70,40	127,10	197,30	179,60	116,80	57,20	34,30	6,40	2,50	2,90	7,20	23,20	824,90
Cipoada	3802583 - Carnaúbas	55,30	115,20	174,70	164,40	106,50	48,70	21,10	5,00	1,70	2,30	7,60	14,00	716,50
Ema	3813532 - Ema aç.	60,80	122,20	223,20	204,90	118,10	47,20	22,10	4,30	2,20	3,40	5,50	21,60	835,50
Favelas	3729075 - São Martinho	64,60	76,30	146,60	124,10	24,20	25,00	12,10	8,50	5,80	5,60	4,30	30,80	527,90
Fogareiro	3800488 - Manitiba	55,90	87,30	152,50	157,00	103,20	59,50	30,00	5,90	4,60	4,30	8,80	18,80	687,80
Ingazeiro	3841046 - Caririaçu	140,10	245,30	308,30	223,90	72,60	32,10	16,90	6,90	9,60	18,60	38,40	68,70	1181,40
Joaquim Távora	3812917 - Nova floresta aç.	65,90	119,70	217,70	184,50	97,80	41,10	18,70	4,50	6,30	5,00	8,30	20,90	790,40
Lima Campos	3822808 - Lima Campos aç.	84,60	142,40	219,40	164,70	71,40	25,70	9,00	4,20	5,80	9,20	14,40	20,90	771,70
Olho d'água	3831543 - Várzea Alegre	122,60	229,50	248,60	177,90	65,10	29,30	8,50	5,00	9,80	18,20	27,50	55,40	997,40
Orós	3822518 - Assaré	84,90	118,10	220,90	192,30	89,90	29,60	15,40	4,00	5,30	10,20	9,00	39,20	818,80
Patu	3811119 - Boqueirão do Patu	69,20	165,20	189,60	195,40	113,40	59,80	26,70	13,00	8,60	4,20	9,40	20,00	874,50
Pedras Brancas	3802328 - Boqueirão Pedra Branca	66,30	117,00	190,00	186,80	108,70	48,80	25,20	3,40	0,80	1,80	5,00	16,70	770,50
Poço da Pedra	3739935 - Poço da Pedra aç.	83,00	95,80	139,10	108,70	30,10	11,10	2,90	3,50	2,00	8,70	23,90	47,60	556,40
Poço do Barro	3803513 - Livramento	53,20	113,30	158,40	180,80	89,50	41,50	15,80	3,30	1,50	3,20	1,90	9,50	671,90
Prazeres	3842254 - Cuncas	88,20	155,10	217,00	148,80	51,60	26,70	10,20	3,50	4,40	10,90	19,50	39,40	775,30
Quixabinha	3842859 - Quixabinha aç.	140,70	184,00	200,20	167,60	31,70	20,70	12,50	3,70	5,70	13,90	29,90	60,50	871,10
Quixeramobim	3801441 - Quixeramobim	61,90	101,50	186,40	188,80	124,90	56,60	30,40	10,80	3,50	1,90	5,00	20,90	792,60
Riacho do Sangue	3812309 - Riacho do sangue aç.	49,80	100,20	153,60	156,40	89,60	40,30	17,10	7,20	5,10	2,00	5,90	15,10	642,30
Riacho dos Carneiros	3841046 - Caririaçu	140,10	245,30	308,30	223,90	72,60	32,10	16,90	6,90	9,60	18,60	38,40	68,70	1181,40
Riacho dos Tanques	3801737 - Prudente de Moraes	48,00	104,60	180,60	185,60	106,10	51,70	24,70	7,10	1,70	1,20	7,10	17,90	736,30
Riacho Verde	2891726 - Monte Alegre	48,30	79,10	169,80	160,10	114,10	61,40	34,40	6,30	1,90	0,80	1,70	18,30	696,20
Rivaldo de Carvalho	3820421 - Catarina	74,10	111,20	178,40	143,90	67,60	25,90	11,40	4,40	5,70	6,10	10,10	29,10	667,90



Tabela 4 – Precipitação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Estação	P <sub>i</sub> (mm)												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Santo Antônio de Russas	2893669 - Santo Antônio de Russas	62,30	114,00	191,90	181,40	110,40	47,70	21,70	6,30	1,80	1,70	3,00	14,80	757,00
São José II	3811615 - Piquet Carneiro	69,00	108,20	189,60	179,70	104,60	57,40	23,80	13,20	11,10	2,90	7,80	42,20	809,50
Serafim Dias	3810574 - Mombaça	68,50	115,70	184,30	179,40	107,20	53,30	29,90	13,70	12,20	4,30	10,80	27,00	806,30
Thomas Osterne	3841006 - Dom Quintino	154,00	180,70	230,90	179,50	35,50	21,80	10,90	3,80	7,30	12,20	30,50	57,00	924,10
Trapiá II	3800957 - Pedra Branca	67,20	123,50	181,70	186,10	109,90	71,10	46,30	20,80	6,50	3,70	10,60	23,50	850,90
Trici	3719832 - Várzea do Boi aç.	46,60	96,20	152,80	126,10	44,20	21,30	8,60	3,80	4,90	5,40	3,60	29,10	542,60
Trussu	3821618 - Suassurana	80,40	144,50	203,80	167,50	84,10	39,00	11,20	4,80	6,20	9,80	11,00	40,10	802,40
Várzea do Boi	3719648 - Boa Esperança	47,60	83,20	126,50	114,80	68,10	16,60	12,90	6,50	7,10	4,30	5,50	22,60	515,70

Tabela 5 – Evaporação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Posto	E <sub>i</sub> (mm)												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Atalho II	Barbalha	152,60	123,20	121,80	121,80	130,20	130,20	152,60	189,70	201,60	196,70	191,80	180,60	1892,80
Boa Viagem	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Canafístula	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Canoas	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Cedro	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Cipoada	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Ema	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Favelas	Tauá	186,20	164,50	165,20	149,80	145,60	154,00	176,40	193,90	207,20	228,20	214,20	217,70	2202,90
Fogareiro	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Ingazeiro	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Joaquim Távora	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Lima Campos	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Olho d'água	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61

Tabela 5 – Evaporação média mensal dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Posto	E <sub>i</sub> (mm)												Total
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Orós	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Patu	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Pedras Brancas	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Poço da Pedra	Tauá	186,20	164,50	165,20	149,80	145,60	154,00	176,40	193,90	207,20	228,20	214,20	217,70	2202,90
Poço do Barro	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Prazeres	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Quixabinha	Barbalha	152,60	123,20	121,80	121,80	130,20	130,20	152,60	189,70	201,60	196,70	191,80	180,60	1892,80
Quixeramobim	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Riacho do Sangue	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Riacho dos Carneiros	Barbalha	152,60	123,20	121,80	121,80	130,20	130,20	152,60	189,70	201,60	196,70	191,80	180,60	1892,80
Riacho dos Tanques	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Riacho Verde	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Rivaldo de Carvalho	Tauá	186,20	164,50	165,20	149,80	145,60	154,00	176,40	193,90	207,20	228,20	214,20	217,70	2202,90
Santo Antônio de Russas	Quixeramobim	188,18	135,72	79,46	81,63	101,83	116,60	162,72	220,88	223,51	253,05	235,47	226,05	2025,10
São José II	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Serafim Dias	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Thomas Osterne	Barbalha	152,60	123,20	121,80	121,80	130,20	130,20	152,60	189,70	201,60	196,70	191,80	180,60	1892,80
Trapiá II	Quixeramobim	172,99	125,30	94,18	74,87	76,52	99,03	136,38	189,28	225,07	258,39	220,86	221,32	1894,19
Trici	Tauá	186,20	164,50	165,20	149,80	145,60	154,00	176,40	193,90	207,20	228,20	214,20	217,70	2202,90
Trussu	Iguatu	139,12	97,92	77,15	74,47	86,97	126,80	162,14	187,74	188,69	203,94	185,24	183,43	1713,61
Várzea do Boi	Tauá	186,20	164,50	165,20	149,80	145,60	154,00	176,40	193,90	207,20	228,20	214,20	217,70	2202,90

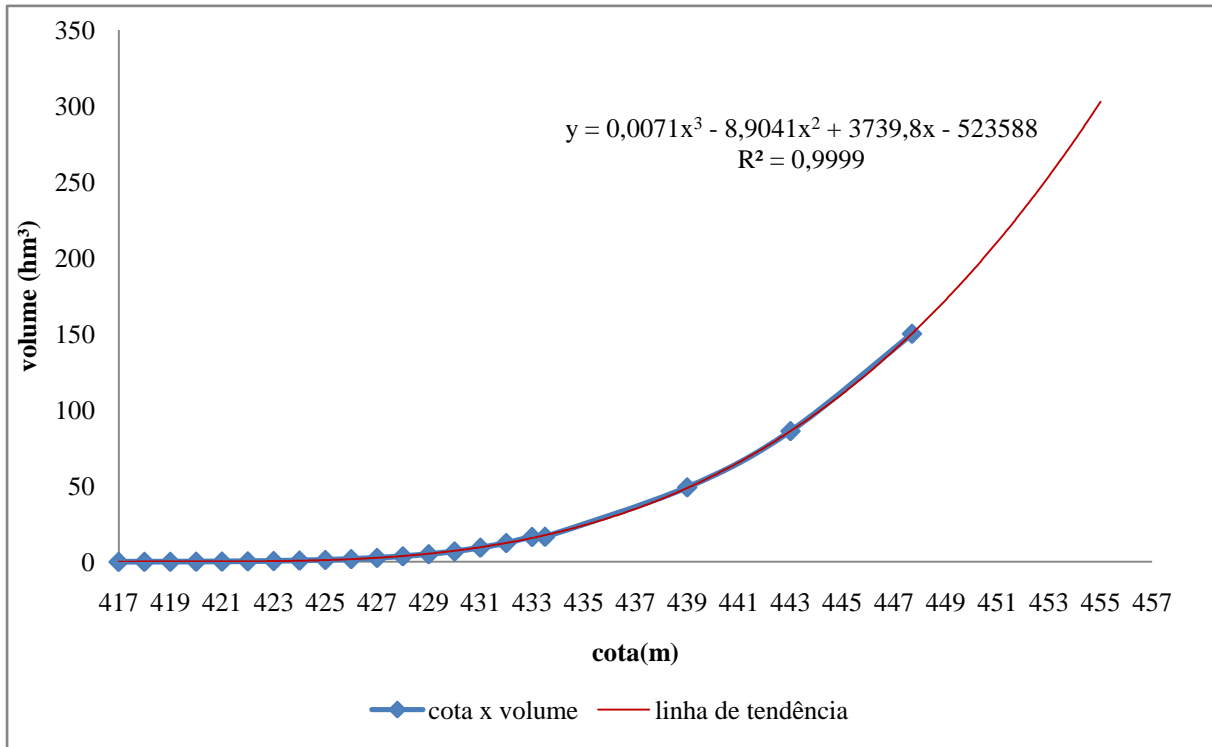


Figura 5 – Extrapolação da curva cota x volume do reservatório Trici utilizando uma linha de tendência polinomial de terceira ordem.

### 3.2 Operação Simulada dos Reservatórios

A ocorrência dos eventos de seca de cada reservatório foi analisada a partir da sua operação simulada, utilizando séries históricas de vazões afluentes aos mesmos.

Os estudos foram desenvolvidos através da equação do balanço hídrico, tomando por base as seguintes premissas:

- unidade de tempo é um mês;
- retirada do reservatório é constante ao longo dos anos e ao longo dos meses;
- contribuição líquida sobre o lago - precipitação menos evaporação - é admitida constante ao longo dos anos, mas variável ao longo dos meses.

#### 3.2.1 Equação do Balanço Hídrico

A determinação do comportamento do reservatório é feita pela equação de seu balanço hídrico, que consiste em igualar as entradas e saídas do reservatório como se segue:

$$dV/dt = E - S; \quad (13)$$

onde  $dV/dt$  é a variação do volume ao longo do tempo,  $E$  o resultado de todas as entradas no sistema, e  $S$  o resultado de todas as saídas.

As entradas são compostas dos deflúvios afluentes e das precipitações diretas sobre o espelho d'água do reservatório; as retiradas, por sua vez, são formadas pelas evaporações e pelas retiradas. A equação do balanço hídrico usada neste modelo é dada por:

$$V_{i+1} = V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) + I_i - Q_i - S_i; \quad (14)$$

em que:

$V_{i+1}$  e  $V_i$ : Volumes de água estocados no reservatório no início dos meses  $i+1$  e  $i$  respectivamente;

$P_i$ : Precipitação média sobre o espelho de água do açude durante o mês  $i$ ;

$E_i$ : Lâmina média evaporada da superfície do lago durante o mês  $i$ ;

$A_{i+1}$  e  $A_i$ : Áreas do lago do reservatório no início dos meses  $i+1$  e  $i$  respectivamente;

$I_i$ : Volumes afluentes ao reservatório durante o mês  $i$ ;

$Q_i$ : Retirada do reservatório durante o mês  $i$ ;

$S_i$ : Volume sangrado pelo reservatório no mês  $i$ .

Considerando-se que o reservatório está com um volume inicial  $V_0$ , simular-se-á, para uma garantia  $G$ , o reservatório a nível mensal para a respectiva série de vazões durante  $H$  anos, onde  $H$  é a extensão da série. Inicialmente considera-se a retirada  $Q = \text{mín}(K/2, \mu/2)$ , onde  $K$  é a capacidade do reservatório e  $\mu$  é a vazão afluente média durante o período analisado. Ao final de cada ano é calculado se o volume anual armazenado é suficiente para atender a demanda (a retirada  $Q$ ); se não for, é considerado que naquele ano ocorreu uma falha ou, no caso deste trabalho, uma seca.

A regra de operação é definida por:

$$V_{i+1} = 0, \text{ se } (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - Q_i + I_i) \leq 0 \quad (15)$$

$$V_{i+1} = (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) + I_i), \text{ se:}$$

$$0 < (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - Q_i + I_i) < K \quad (16)$$

$$V_{i+1} = K, \text{ se } (V_i + (P_i - E_i) \times \frac{1}{2} (A_{i+1} + A_i) - Q_i + I_i) \geq K \quad (17)$$

No final dos H anos é verificado se a retirada Q assumida inicialmente (mín  $(K/2, \mu/2)$ ) corresponde à frequência de falhas pretendida. Caso seja superior, diminui-se a retirada, caso contrário, eleva-se a retirada e simula-se novamente o comportamento do reservatório para H anos e assim sucessivamente até que a retirada correspondente a uma frequência de falhas pretendida seja encontrada.

### 3.2.2 Geração das Séries Sintéticas

As séries históricas de vazões, muitas vezes, são muito curtas e não conseguem descrever fielmente o comportamento do curso de água, dificultando uma previsão ou simulação hidrológica do funcionamento de reservatórios. Para solucionar este problema, é comum o uso de métodos de simulação de vazões para se aumentar as informações contidas na série histórica e assim obter um maior êxito na tomada de decisão.

Os rios do Nordeste Brasileiro apresentam deflúvios anuais serialmente independentes devido à característica intermitente destes rios, que tem uma longa estação de vazões nulas após a curta estação úmida. Dessa forma, as séries de vazões anuais podem ser obtidas a partir da geração de números aleatórios seguindo uma função densidade de probabilidade (CAMPOS, 1996). Segundo o mesmo autor, as distribuições mais indicadas para descrever as vazões anuais são a Gama e a Log-normal, sem que se possa afirmar qual das duas dá melhores resultados. Neste trabalho foi utilizada a distribuição Gamma II, pois tem larga aplicação na matemática estatística e tem sido usada veemente nos estudos hidrológicos, principalmente com as facilidades computacionais de se avaliar este tipo de função. A função é dada por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^{\alpha_s} \Gamma(\alpha_s)} x^{\alpha_s-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, & x > 0 \\ 0, & \text{outros valores} \end{cases} \quad (18)$$

onde:

$$\mu = \alpha_s \times \beta;$$

$$\sigma^2 = \alpha_s \times \beta^2.$$

Para a geração de séries sintéticas de 5000 vazões afluentes anuais através da distribuição Gama II, utilizou-se, como dados de entrada, a média e o desvio padrão das séries históricas originais de cada reservatório. A utilização de séries sintéticas tão grandes é feita para assegurar que os reservatórios atingirão o estado de equilíbrio durante as simulações, eliminando a influência dos volumes iniciais armazenados nos reservatórios nos resultados das simulações.

### 3.2.3 Desagregação das Vazões Anuais

Para atingir o objetivo de se trabalhar com as vazões sintéticas a nível mensal é necessária a utilização de um método de simulação de séries de vazões classificado como modelos de desagregação, cuja função é desagregar as vazões anuais nas diversas estações do ano. Neste trabalho, seguiu-se metodologia proposta por SVANIDZE (1980), o Método dos Fragmentos, o qual consiste de uma simulação da série hidrológica, na qual as vazões anuais são distribuídas nos diversos meses.

Este método consiste na desagregação da série de vazões anuais a partir de uma série histórica de vazões mensais. No caso deste trabalho, as séries sintéticas de vazões anuais de 5000 anos geradas através da distribuição Gama II serão desagregadas tomando como base as séries de vazões mensais históricas que as originou. Primeiro calculam-se os fragmentos ( $f_{i,j}$ ) para o mês  $j$  e ano  $i$  da série de vazões mensais históricas, utilizando a expressão:

$$f_{i,j} = \frac{Q_{i,j}}{\sum_{j=1}^{12} Q_{i,j}}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

onde  $Q_{i,j}$  é a vazão mensal histórica no mês  $j$  e ano  $i$ .

Depois de calculado os fragmentos, a série anual histórica em ordem crescente de seus valores de modo a formar intervalos de classes. Esses intervalos variam conforme o tamanho de série histórica. Na formação dos intervalos de classe o primeiro termo terá o valor zero como limite inferior e como limite superior o valor da média da vazão de ordem 1 (menor valor das vazões da série anual) e a vazão de ordem 2. O segundo fragmento tem como limite inferior o limite superior do fragmento antecedente e como limite superior a média das vazões de ordem 2 e de ordem 3. O processo se repete até o fragmento  $N$  o qual tem o infinito como limite superior. Isso significa que qualquer valor de vazão anual da série sintética superior ao

maior valor da série histórica recebe os fragmentos de maior ordem da série histórica.

Para o cálculo das vazões mensais sintéticas, têm-se:

$$Q'_{i,j} = f_{i,k} \times Q_{i,k} \quad (20)$$

onde:

$Q'_{i,j}$  = vazão mensal sintética para o mês j e ano i;

$Q_{i,k}$  = vazão anual “gerada” e classificada no intervalo de classe k;

$f_{j,k}$  = fragmento de desagregação no mês j associado ao intervalo de classe k.

### 3.2.4 Simulação do Reservatório Utilizando o Programa SIMRES

As simulações dos reservatórios foram realizadas utilizando o programa computacional SIMRES, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Como entrada, este programa utiliza dois arquivos de dados:

- a) Série de vazões sazonais – este arquivo é apresentado em um formato denominado TAPE3.DAT e apresenta a série de vazões afluentes ao reservatório simulado;
- b) Arquivo de dados gerais – este arquivo, cujo formato é denominado de TAPE2.DAT informa as características gerais do reservatório e os procedimentos da simulação.

Tais procedimentos dizem respeito ao tipo de simulação a ser adotada (garantia fixa mensal, garantia fixa anual, retirada fixa), em quantas estações será dividido o ano, ao volume inicial adotado, ao volume de reserva de segurança e ao volume que será retirado quando o reservatório atingir tal cota. Dependendo do tipo de simulação escolhida, definem-se quantas garantias (ou retiradas) deseja-se simular, bem como o valor de cada garantia (ou retirada).

Ainda no arquivo TAPE2.DAT, entra-se com as características gerais do reservatório: capacidade (pode-se escolher mais de uma capacidade), curva cota volume e o volume mínimo do reservatório. São moduladas as retiradas e as perdas por evaporação, bem como se informa a evaporação líquida anual (evaporação menos precipitação).

Neste trabalho, cada reservatório foi simulado separadamente para 12 cenários distintos. Em todos os cenários, para cada reservatório, foram mantidos a curva cota x volume,

a evaporação, a precipitação e as vazões afluentes sintéticas mensais originais fixos, variando-se somente o *fator adimensional de capacidade* ( $f_K$ ) e o *fator adimensional de retirada* ( $f_M$ ), propostos por Campos (1987). O fator adimensional de capacidade representa a razão entre a capacidade do reservatório ( $K$ ) e o volume afluente médio anual ( $\mu$ ), conforme a Eq. (21):

$$f_K = \frac{K}{\mu} \quad (21)$$

Portanto, para um dado reservatório com  $\mu = 20 \text{ hm}^3/\text{ano}$  um  $f_K = 2$  irá resultar em uma capacidade  $K = 40 \text{ hm}^3$  enquanto um  $f_K = 4$  irá resultar em uma capacidade  $K = 80 \text{ hm}^3$ .

Já o fator adimensional de retirada representa a razão entre o volume regularizado ( $M$ ) e o volume afluente médio anual ( $\mu$ ), conforme a Eq. (22):

$$f_M = \frac{M}{\mu} \quad (22)$$

Dessa forma, os reservatórios serão simulados na modalidade de retirada fixa com 4 capacidades distintas, relativas aos  $f_K = 1, 2$  e  $4$  mais a capacidade real do reservatório, e 3 retiradas anuais, relativas aos  $f_M = 0,25, 0,50$  e  $0,75$  (Tabela 6), totalizando um total de 12 cenários diferentes para cada reservatório.

Tabela 6 – Valores das capacidades e retiradas anuais dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Capacidades ( $\text{hm}^3$ )				Retiradas Anuais ( $\text{hm}^3$ )		
	Real	$f_K = 1$	$f_K = 2$	$f_K = 4$	$f_M = 0,25$	$f_M = 0,50$	$f_M = 0,75$
Canoas	169,25	19,35	38,70	77,40	4,84	9,68	14,51
Favelas	30,00	31,96	63,92	127,84	7,99	15,98	23,97
Orós	1956,26	880,22	1760,44	3520,88	220,06	440,11	660,17
Poço da Pedra	50,00	45,10	90,20	180,40	11,28	22,55	33,83
Rivaldo de Carvalho	6,43	12,60	25,20	50,40	3,15	6,30	9,45
Trici	16,50	25,74	51,48	102,96	6,44	12,87	19,31
Trussu	263,00	73,28	146,56	293,12	18,32	36,64	54,96
Várzea do Boi	51,82	55,34	110,68	221,36	13,84	27,67	41,51
Santo Antônio de Russas	29,72	90,41	180,82	361,64	22,60	45,21	67,81
Boa Viagem	47,00	28,65	57,30	114,60	7,16	14,33	21,49
Cedro	126,00	25,67	51,34	102,68	6,42	12,84	19,25



Tabela 6 – Valores das capacidades e retiradas anuais dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Reservatório	Capacidades (hm <sup>3</sup> )				Retiradas Anuais (hm <sup>3</sup> )		
	Real	f <sub>K</sub> = 1	f <sub>K</sub> = 2	f <sub>K</sub> = 4	f <sub>M</sub> = 0,25	f <sub>M</sub> = 0,50	f <sub>M</sub> = 0,75
Cipoada	17,25	31,99	63,98	127,96	8,00	16,00	23,99
Fogareiro	118,81	242,01	484,02	968,04	60,50	121,01	181,51
Patu	71,83	81,05	162,10	324,20	20,26	40,53	60,79
Pedras Brancas	434,00	157,21	314,42	628,84	39,30	78,61	117,91
Poço do Barro	52,00	29,33	58,66	117,32	7,33	14,67	22,00
Quixeramobim	54,00	133,55	267,10	534,20	33,39	66,78	100,16
Riacho dos Tanques	12,78	3,09	6,18	12,36	0,77	1,55	2,32
Riacho Verde	14,67	2,21	4,42	8,84	0,55	1,11	1,66
São José II	29,15	13,88	27,76	55,52	3,47	6,94	10,41
Serafim Dias	43,00	99,92	199,84	399,68	24,98	49,96	74,94
Trapiá II	18,19	15,03	30,06	60,12	3,76	7,52	11,27
Atalho II	108,25	98,24	196,48	392,96	24,56	49,12	73,68
Ingazeiro	11,32	15,30	30,60	61,20	3,83	7,65	11,48
Lima Campos	63,65	25,05	50,10	100,20	6,26	12,53	18,79
Olho d'água	21,30	5,49	10,98	21,96	1,37	2,75	4,12
Prazeres	32,50	6,30	12,60	25,20	1,58	3,15	4,73
Quixabinha	32,51	3,54	7,08	14,16	0,89	1,77	2,66
Riacho dos Carneiros	37,18	3,91	7,82	15,64	0,98	1,96	2,93
Thomas Osterne	28,79	6,34	12,68	25,36	1,59	3,17	4,76
Canafistula	13,12	5,97	11,94	23,88	1,49	2,99	4,48
Ema	10,39	9,63	19,26	38,52	2,41	4,82	7,22
Joaquim Távora	23,66	12,86	25,72	51,44	3,22	6,43	9,65
Riacho do Sangue	61,42	76,81	153,62	307,24	19,20	38,41	57,61

### 3.2.5 Cálculo do Runs

O cálculo dos runs, e conseqüentemente das falhas expressas por ele, serão efetuadas através do arquivo de saída TAPE5.DAT do SIMRES. Este arquivo contém os valores de volume armazenado, cota do nível d'água, volume racionado no abastecimento (déficit mensal) e volume racionado na irrigação, para cada mês de operação.

Como para este trabalho só foi considerado o volume de abastecimento, os valores utilizados foram somente os dos déficits de abastecimento apresentados na quarta coluna do TAPE.DAT. O run de falhas, que corresponde a um período de seca, será caracterizado pela seqüência de meses em que existam déficits de regularização ininterrupto, precedido e sucedido por meses onde não ocorram déficits. A Figura 5 mostra o run  $r_1$ , que inicia no mês 34812 da simulação e termina no mês 34815, e o run  $r_2$ , que inicia no mês 34818 da simulação e termina no mês 34824.

File	Edit	Format	View	Help
34806	32.46	194.87	.00	.00
34807	27.59	194.13	.00	.00
34808	21.25	193.08	.00	.00
34809	14.57	191.73	.00	.00
34810	8.06	189.89	.00	.00
34811	2.04	186.47	.00	.00
34812	.44	184.18	4.08	.00
34813	.38	184.07	5.56	.00
34814	.37	184.04	5.56	.00
34815	.41	184.14	5.56	.00
34816	4.47	188.38	.00	.00
34817	.56	184.42	.00	.00
34818	.40	184.11	4.63	.00
34819	.45	184.20	5.56	.00
34820	.35	184.02	5.56	.00
34821	.24	183.80	5.56	.00
34822	.11	183.54	5.56	.00
34823	.08	183.33	5.56	.00
34824	.07	183.13	5.56	.00
34825	14.15	191.64	.00	.00
34826	115.14	201.87	.00	.00
34827	133.55	202.77	.00	.00
34828	133.55	202.77	.00	.00
34829	133.55	202.77	.00	.00

Figura 6 – Exemplo do cálculo dos runs.

A contagem dos runs foi feita através de um programa computacional elaborado para especificamente para esta pesquisa. O programa calcula a duração, volume total do déficit e valor máximo de cada run da simulação, dessa forma, os runs  $r_1$  e  $r_2$  da Figura 5 seriam caracterizados por:

### $r_1$

- Duração: 4 meses;
- Déficit Máximo: 5,56;
- Volume Total do Déficit: 20.76 hm<sup>3</sup>;

### $r_2$

- Duração: 7 meses;
- Déficit Máximo: 5,56;
- Volume Total do Déficit: 37.99 hm<sup>3</sup>.

Neste trabalho, todos os indicadores de sustentabilidade de reservatórios serão formulados utilizando a teoria dos runs como base, onde cada run negativo na série de retiradas, obtidas durante as simulações, corresponderá a um evento de seca. Esta medida visa padronizar todos os indicadores utilizados, visto que originalmente foram criados por diferentes autores.

### **3.3 Indicadores de Sustentabilidade de Reservatórios**

Partindo da análise dos indicadores expostos do Item 2.4.2 do presente trabalho, procedeu-se a escolha dos indicadores de desempenho apropriados para criação de um conjunto de indicadores de sustentabilidade voltado ao estudo de secas em reservatórios, especificamente para a Bacia do Rio Jaguaribe. Neste processo, além da escolha dos indicadores apresentados anteriormente, também foram realizadas adaptações tanto em sua apresentação quanto em sua formulação, visando à simplificação no uso e no entendimento destes indicadores, assim como a obtenção de uma formulação ajustada às características próprias da região estudada. Os indicadores de desempenho escolhidos foram a *garantia*, *resiliência* e *vulnerabilidade*, juntamente com o *índice de sustentabilidade*.

Por se tratarem de indicadores estatísticos, os indicadores utilizados neste trabalho deveriam atender a uma série de critérios em sua formulação. O primeiro define que cada indicador deveria ser obtido de maneira relativa, ou seja, pela razão entre parâmetros relevantes oriundos da simulação do reservatório, de modo que todo indicador seja adimensional. A primeira vista, pode parecer que os indicadores têm uma formulação puramente algébrica, porém, os parâmetros fornecidos pela simulação dos reservatórios foram obtidos através de uma simulação com modelagem estocástica, garantindo a representatividade probabilística dos indicadores. O outro critério observado foi a necessidade do indicador fornecer valores positivos variando entre os extremos 0 e 1, como uma espécie de porcentagem.

#### **3.3.1 Garantia**

Garantia, como habitualmente é chamado pelos hidrólogos brasileiros, é o indicador de confiabilidade, ou confiabilidade temporal, e é certamente o indicador de sustentabilidade mais utilizado no estudo de reservatórios. A garantia normalmente é um parâmetro predeterminado na concepção do reservatório para se estipular as possíveis vazões regularizadas por ele, dessa forma, toda previsão de retirada de um reservatório está vinculada a uma determinada garantia. Como já foi citado no Item 3.2.4, as simulações foram efetuadas

fixando-se as retiradas, possibilitando que a garantia variasse livremente de um cenário para outro.

Utilizou-se uma variação da fórmula da confiabilidade de Vogel e Bolognese (1995) como o emprego da teoria dos runs. Assim, a garantia representa a probabilidade do reservatório não se encontrar no estado de seca, conforme a Eq. (23):

$$G = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{H} \quad (23)$$

onde:

G = garantia do reservatório;

$d_i$  = duração do i-ésimo run;

N = número total de runs obtidos durante a simulação;

H = horizonte de tempo da simulação expresso em meses.

A garantia pode também ser expressa em porcentagem, com a seguinte alteração (Eq. 24):

$$G(\%) = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{H} \right) \times 100 \quad (24)$$

### 3.3.2 Resiliência

A formulação da resiliência neste trabalho foi praticamente a mesma sugerida por Hashimoto et al. (1982), alterando somente a apresentação da fórmula utilizando o método dos runs. Esta formulação foi escolhida por ser matematicamente simples de ser empregada e entendida, além de ser amplamente aceita no meio acadêmico. A resiliência mede a velocidade de recuperação do reservatório de um evento de seca e, por se tratar de um indicador relativo ao tempo, os parâmetros utilizados na sua formulação foram o número de runs, eventos de seca e a duração destes obtidas através da simulação do reservatório. A formulação final da resiliência

ficou da seguinte forma (Eq. 25):

$$R = \frac{N}{\sum_{i=1}^N d_i} \quad (25)$$

onde:

R = resiliência do reservatório;

$d_i$  = duração do  $i$ -ésimo run;

N = número total de runs obtidos durante a simulação;

### 3.3.3 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade é o indicador que descreve o quão grave será a seca, dada à ocorrência da mesma no reservatório. A escolha da formulação a ser utilizada para este indicador é certamente muito mais difícil do que as formulações da garantia e resiliência, pois ao contrário destes dois indicadores, não existe um consenso geral sobre a definição específica da vulnerabilidade. Diante desse impasse, decidiu-se criar uma formulação diferente das que foram abordadas no Capítulo 2, pois estes não retratavam a vulnerabilidade da maneira desejada por este trabalho.

Tomando como modelo a formulação da vulnerabilidade sugerida por Hashimoto et al. (1982), que foi criada especificamente para o estudo de reservatórios superficiais, temos ela como uma espécie de média dos déficits mensais máximos que ocorreram em todos os runs da simulação. Neste trabalho, porém, buscou-se utilizar um conceito mais extremo do indicador, onde a análise incide sobre o evento mais desfavorável ocorrido durante a simulação e não sobre um valor médio. Partindo desse pressuposto, criou-se a formulação matemática para a vulnerabilidade apresentada na Eq. (26):

$$V_n = \frac{D_{máx}}{\mu \times \Phi} \quad (26)$$

onde:

$V_n$  = vulnerabilidade do reservatório;

$D_{m\acute{a}x}$  = déficit hídrico máximo de um run ocorrido durante a simulação em  $hm^3$ ;

$\mu$  = vazão anual média afluente ao reservatório em  $hm^3$ ;

$\phi$  = constante de vulnerabilidade para a região da Bacia do Rio Jaguaribe.

Para utilizar esta fórmula, deve-se encontrar o déficit hídrico máximo de um run ocorrido durante a simulação ou, em outras palavras, o volume total da maior seca ocorrida na simulação do reservatório. Este déficit hídrico é calculado somando-se todos os volumes de água racionados durante a duração do run. A fórmula também apresenta a vazão anual média afluente ao reservatório, que é o valor pelo qual o  $D_{m\acute{a}x}$  será dividido para tornar o indicador de vulnerabilidade adimensional, como os demais indicadores. O indicador apresenta ainda a constante de vulnerabilidade para a região da Bacia do Rio Jaguaribe ( $\phi$ ), que é o parâmetro que restringirá os valores obtidos para no máximo 1,00. Esta constante, por se tratar de um parâmetro regional, será a mesma para todos os reservatórios, independente do cenário simulado e, por ser uma constante essencialmente empírica, seu valor será conhecido somente após a simulação de todos os reservatórios da região estudada e da adequação de  $\phi$  à eles.

Pode-se notar que, diferentemente dos indicadores de garantia e resiliência, que trabalham com valores médios, a vulnerabilidade trabalha com as falhas máximas ocorridas durante cada evento de seca. Este fato deve-se ao posicionamento conservador adotado por profissionais de qualquer área quando se mensura aspectos significativamente danosos de qualquer sistema, como é o caso da vulnerabilidade que mede uma característica desfavorável à sustentabilidade. Dessa forma, o emprego dos eventos mais danosos na concepção da vulnerabilidade garante a obtenção de resultados mais seguros e precavidos sobre a operação dos reservatórios.

### 3.3.4 Índice de Sustentabilidade

Cada indicador de sustentabilidade utilizado neste trabalho mede um aspecto diferente da ocorrência das secas nos reservatórios, sendo todos imprescindíveis para a análise da sustentabilidade do mesmo. Para facilitar esta análise e obter uma visão holística desse fenômeno, é interessante a utilização de uma medida única agregando as informações contidas na garantia, resiliência e vulnerabilidade, através de um índice de sustentabilidade. No presente trabalho propor-se a utilização do índice de sustentabilidade desenvolvido por Loucks (1997), com uma pequena modificação na denominação das variáveis (Eq. 27).

$$IS = G \times R \times (1 - Vn) \quad (27)$$

onde:

IS = índice de sustentabilidade do reservatório;

G = garantia do reservatório;

R = resiliência do reservatório;

Vn = vulnerabilidade do reservatório.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados e analisados os valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para os 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe abordados neste trabalho. Estes resultados foram originados da simulação de cada reservatório estudado para 12 cenários distintos, nos quais se variaram seus respectivos volumes de retirada e capacidades, conforme descrito no Capítulo 3 – Metodologia.

Com a finalidade de tornar mais didática a construção deste capítulo, a apresentação dos resultados foi dividida em 3 etapas. Na primeira, serão apresentados os valores dos indicadores de sustentabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para cada reservatório separadamente. A segunda etapa consistirá na análise global de cada indicador e do índice de sustentabilidade, onde serão observados os seus aspectos regionais, assim como a sua sensibilidade relativa às variáveis utilizadas nos 12 cenários simulados, e é onde também será apresentada a constante  $\phi$ , necessária para se calcular a vulnerabilidade. A última etapa consistirá na análise comparativa entre os indicadores e o índice de sustentabilidade.

### 4.1 Indicadores de Desempenho dos Reservatórios

Os valores de garantia (G), resiliência (R), vulnerabilidade (Vn) e do índice de sustentabilidade (IS) serão apresentados em tabelas individuais para cada reservatório, seguidos de uma breve análise inicial, já que a análise mais aprofundada será realizada no item subsequente que analisará os indicadores de forma regionalizada. Nesta análise inicial poderemos verificar a existência de possíveis anormalidades nos resultados, assim como o comportamento individual de cada reservatório diante da variação dos cenários de simulação.

#### 4.1.1 Açude Canoas

A Tabela 7 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Canoas simulado com as capacidades de 169,25 ( $f_K=8,75$ ), 19,35 ( $f_K=1$ ), 38,70 ( $f_K=2$ ) e 77,40  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 4,84 ( $f_M=0,25$ ), 9,68 ( $f_M=0,50$ ), e 14,51  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).



Tabela 7 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Canoas.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
8,75 (real)	0,25	0,99	0,10	0,08	0,09
	0,50	0,93	0,09	0,25	0,06
	0,75	0,80	0,08	0,39	0,04
1	0,25	0,83	0,10	0,12	0,08
	0,50	0,61	0,08	0,25	0,04
	0,75	0,48	0,09	0,39	0,03
2	0,25	0,96	0,10	0,11	0,09
	0,50	0,82	0,09	0,25	0,05
	0,75	0,67	0,08	0,39	0,03
4	0,25	0,99	0,10	0,08	0,09
	0,50	0,91	0,09	0,25	0,06
	0,75	0,78	0,08	0,39	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Canoas mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que os resultados obtidos para o  $f_K = 4$  e o  $f_K$  real (8,75) foram praticamente os mesmos, o que pode indicar um superdimensionamento do reservatório.

#### 4.1.2 Açude Favelas

A Tabela 8 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Favelas simulado com as capacidades de 30,00 ( $f_K = 0,94$ ), 31,96 ( $f_K = 1$ ), 63,92 ( $f_K = 2$ ) e 127,84  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 7,99 ( $f_M = 0,25$ ), 15,98 ( $f_M = 0,50$ ), e 23,97  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 8 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Favelas.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,94 (real)	0,25	0,82	0,09	0,10	0,07
	0,50	0,62	0,09	0,24	0,04
	0,75	0,49	0,08	0,37	0,02
1	0,25	0,82	0,10	0,10	0,07
	0,50	0,63	0,09	0,24	0,04
	0,75	0,50	0,08	0,37	0,02
2	0,25	0,90	0,10	0,08	0,08
	0,50	0,74	0,09	0,24	0,05
	0,75	0,61	0,08	0,37	0,03

Tabela 8 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Favelas.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
4	0,25	0,94	0,10	0,08	0,09
	0,50	0,81	0,08	0,24	0,05
	0,75	0,68	0,08	0,37	0,03

Os resultados obtidos para o Açude Favelas mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.3 Açude Orós

A Tabela 9 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Orós simulado com as capacidades de 1956,26 ( $f_K = 2.22$ ), 880,22 ( $f_K = 1$ ), 1760,44 ( $f_K = 2$ ) e 3520,88  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 220,06 ( $f_M = 0,25$ ), 440,11,98 ( $f_M = 0,50$ ), e 660,17  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 9 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Orós.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2,22 (real)	0,25	0,99	0,14	0,06	0,13
	0,50	0,89	0,10	0,19	0,07
	0,75	0,74	0,10	0,38	0,04
1	0,25	0,87	0,14	0,09	0,11
	0,50	0,65	0,09	0,19	0,05
	0,75	0,48	0,11	0,38	0,03
2	0,25	0,99	0,14	0,06	0,13
	0,50	0,87	0,11	0,19	0,08
	0,75	0,72	0,10	0,38	0,04
4	0,25	1,00	0,13	0,02	0,13
	0,50	0,96	0,10	0,15	0,08
	0,75	0,85	0,10	0,38	0,05

Os resultados obtidos para o Açude Orós mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a

1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.4 Açude Poço da Pedra

A Tabela 10 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Poço da Pedra simulado com as capacidades de 50,00 ( $f_K = 1,11$ ), 45,10 ( $f_K = 1$ ), 90,20 ( $f_K = 2$ ) e 108,40  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 11,28 ( $f_M = 0,25$ ), 22,55 ( $f_M = 0,50$ ), e 33,983  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 10 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Poço da Pedra.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,11 (real)	0,25	0,90	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,72	0,10	0,21	0,06
	0,75	0,57	0,09	0,36	0,03
1	0,25	0,89	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,70	0,11	0,21	0,06
	0,75	0,56	0,08	0,36	0,03
2	0,25	0,95	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,80	0,10	0,19	0,06
	0,75	0,67	0,08	0,36	0,04
4	0,25	0,98	0,12	0,08	0,11
	0,50	0,87	0,10	0,18	0,07
	0,75	0,74	0,08	0,36	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Poço da Pedra mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.5 Açude Rivaldo de Carvalho

A Tabela 11 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Rivaldo de Carvalho simulado com as capacidades de 6,43 ( $f_K = 0,51$ ), 12,66 ( $f_K = 1$ ), 25,20 ( $f_K = 2$ ) e 150,40  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 3,15 ( $f_M = 0,25$ ), 6,30 ( $f_M = 0,50$ ), e 9,45  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 11 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Rivaldo de Carvalho.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,51 (real)	0,25	0,80	0,13	0,06	0,10
	0,50	0,58	0,14	0,18	0,07
	0,75	0,45	0,12	0,28	0,04
1	0,25	0,89	0,13	0,06	0,11
	0,50	0,72	0,12	0,18	0,07
	0,75	0,59	0,10	0,28	0,04
2	0,25	0,94	0,14	0,06	0,12
	0,50	0,80	0,12	0,18	0,08
	0,75	0,67	0,11	0,28	0,05
4	0,25	0,96	0,13	0,06	0,12
	0,50	0,85	0,12	0,18	0,08
	0,75	0,72	0,11	0,28	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Rivaldo de Carvalho mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.6 Açude Trici

A Tabela 12 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Trici simulado com as capacidades de 16,50 ( $f_K=0,64$ ), 25,74 ( $f_K=1$ ), 51,48 ( $f_K=2$ ) e 102,96  $hm^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 6,44 ( $f_M=0,25$ ), 12,87 ( $f_M=0,50$ ), e 19,31  $hm^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 12 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Trici.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,64 (real)	0,25	0,78	0,11	0,10	0,08
	0,50	0,57	0,08	0,21	0,04
	0,75	0,44	0,09	0,38	0,02
1	0,25	0,84	0,10	0,09	0,08
	0,50	0,64	0,09	0,21	0,05
	0,75	0,51	0,08	0,38	0,03

Tabela 12– Indicadores de sustentabilidade do Açude Trici.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2	0,25	0,92	0,10	0,08	0,08
	0,50	0,76	0,09	0,20	0,06
	0,75	0,63	0,08	0,38	0,03
4	0,25	0,96	0,10	0,08	0,09
	0,50	0,84	0,09	0,18	0,06
	0,75	0,71	0,08	0,38	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Trici mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.7 Açude Trussu

A Tabela 13 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Trussu simulado com as capacidades de 263,00 ( $f_K=3,59$ ), 73,28 ( $f_K=1$ ), 146,56 ( $f_K=2$ ) e 293,12  $hm^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 18,32 ( $f_M=0,25$ ), 36,64 ( $f_M=0,50$ ), e 54,96  $hm^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 13 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Trussu.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
3,59 (real)	0,25	1,00	0,10	0,02	0,10
	0,50	0,96	0,11	0,15	0,09
	0,75	0,86	0,10	0,28	0,06
1	0,25	0,95	0,13	0,06	0,12
	0,50	0,77	0,12	0,18	0,07
	0,75	0,62	0,09	0,28	0,04
2	0,25	0,99	0,13	0,06	0,12
	0,50	0,91	0,11	0,18	0,08
	0,75	0,77	0,10	0,28	0,06
4	0,25	1,00	0,10	0,02	0,10
	0,50	0,97	0,10	0,15	0,08
	0,75	0,87	0,10	0,28	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Trussu mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ ,

enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 3,59$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.8 Açude Várzea do Boi

A Tabela 14 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Várzea do Boi simulado com as capacidades de 51,82 ( $f_K = 0,94$ ), 55,34 ( $f_K = 1$ ), 110,68 ( $f_K = 2$ ) e 221,36  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 13,84 ( $f_M = 0,25$ ), 27,67 ( $f_M = 0,50$ ), e 41,51  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 14 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Várzea do Boi.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,94 (real)	0,25	0,81	0,10	0,09	0,08
	0,50	0,62	0,09	0,22	0,04
	0,75	0,49	0,08	0,34	0,03
1	0,25	0,82	0,10	0,08	0,08
	0,50	0,63	0,09	0,22	0,04
	0,75	0,50	0,08	0,34	0,03
2	0,25	0,90	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,75	0,09	0,21	0,05
	0,75	0,62	0,08	0,34	0,03
4	0,25	0,95	0,11	0,08	0,10
	0,50	0,82	0,09	0,19	0,06
	0,75	0,69	0,08	0,33	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Várzea do Boi mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.9 Açude Canafístula

A Tabela 15 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade

e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Canafístula simulado com as capacidades de 13,12 ( $f_K=2,20$ ), 5,97 ( $f_K=1$ ), 11,94 ( $f_K=2$ ) e 23,88  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 1,49 ( $f_M=0,25$ ), 2,99 ( $f_M=0,50$ ), e 4,48  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 15 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Canafístula.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2,20 (real)	0,25	0,84	0,08	0,13	0,06
	0,50	0,68	0,07	0,32	0,03
	0,75	0,55	0,06	0,51	0,02
1	0,25	0,72	0,08	0,15	0,05
	0,50	0,54	0,07	0,33	0,03
	0,75	0,43	0,06	0,52	0,01
2	0,25	0,83	0,08	0,14	0,06
	0,50	0,66	0,07	0,32	0,03
	0,75	0,54	0,06	0,51	0,02
4	0,25	0,88	0,07	0,12	0,06
	0,50	0,74	0,07	0,31	0,03
	0,75	0,61	0,06	0,51	0,02

Os resultados obtidos para o Açude Canafístula mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.10 Açude Ema

A Tabela 16 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Ema simulado com as capacidades de 10,39 ( $f_K=1,08$ ), 9,63 ( $f_K=1$ ), 19,26 ( $f_K=2$ ) e 38,52  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 2,41 ( $f_M=0,25$ ), 4,82 ( $f_M=0,50$ ), e 7,22  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 16 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Ema.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,08 (real)	0,25	0,82	0,09	0,14	0,06
	0,50	0,63	0,08	0,33	0,03
	0,75	0,50	0,07	0,52	0,02
1	0,25	0,81	0,09	0,15	0,06
	0,50	0,61	0,08	0,34	0,03
	0,75	0,49	0,07	0,52	0,02

Tabela 16– Indicadores de sustentabilidade do Açude Ema.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2	0,25	0,90	0,08	0,12	0,07
	0,50	0,73	0,08	0,30	0,04
	0,75	0,60	0,07	0,50	0,02
4	0,25	0,95	0,09	0,08	0,08
	0,50	0,82	0,07	0,26	0,05
	0,75	0,69	0,07	0,50	0,02

Os resultados obtidos para o Açude Ema mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.11 Açude Joaquim Távora

A Tabela 17 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Joaquim Távora simulado com as capacidades de 23,66 ( $f_K = 1,84$ ), 12,86 ( $f_K = 1$ ), 25,72 ( $f_K = 2$ ) e 51,44  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 3,22 ( $f_M = 0,25$ ), 6,43 ( $f_M = 0,50$ ), e 9,65  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 17 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Joaquim Távora.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,84 (real)	0,25	0,67	0,04	0,32	0,02
	0,50	0,50	0,04	0,65	0,01
	0,75	0,39	0,04	0,97	0,00
1	0,25	0,54	0,04	0,32	0,01
	0,50	0,38	0,04	0,65	0,00
	0,75	0,30	0,03	0,97	0,00
2	0,25	0,68	0,04	0,32	0,02
	0,50	0,51	0,04	0,65	0,01
	0,75	0,41	0,04	0,97	0,00
4	0,25	0,78	0,04	0,32	0,02
	0,50	0,62	0,04	0,65	0,01
	0,75	0,50	0,04	0,97	0,00

Os resultados obtidos para o Açude Joaquim Távora mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a



diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.12 Açude Riacho do Sangue

A Tabela 18 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Riacho do Sangue simulado com as capacidades de 61,42 ( $f_K = 0,80$ ), 76,81 ( $f_K = 1$ ), 153,62 ( $f_K = 2$ ) e 307,24  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 19,20 ( $f_M = 0,25$ ), 38,41 ( $f_M = 0,50$ ), e 57,61  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 18 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho do Sangue.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,80 (real)	0,25	0,94	0,14	0,06	0,12
	0,50	0,75	0,12	0,18	0,07
	0,75	0,60	0,10	0,28	0,04
1	0,25	0,96	0,14	0,06	0,13
	0,50	0,80	0,12	0,18	0,08
	0,75	0,65	0,10	0,28	0,05
2	0,25	0,99	0,14	0,06	0,13
	0,50	0,91	0,11	0,18	0,08
	0,75	0,78	0,10	0,28	0,06
4	0,25	1,00	0,14	0,03	0,14
	0,50	0,96	0,11	0,15	0,09
	0,75	0,86	0,10	0,28	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Riacho do Sangue mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.13 Açude Santo Antônio de Russas

A Tabela 19 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade

e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Santo Antônio de Russas simulado com as capacidades de 29,72 ( $f_K = 0,33$ ), 90,41 ( $f_K = 1$ ), 180,82 ( $f_K = 2$ ) e 361,64  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 22,60 ( $f_M = 0,25$ ), 45,20 ( $f_M = 0,50$ ), e 67,81  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 19 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Santo Antônio de Russas.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,33 (real)	0,25	0,90	0,19	0,05	0,16
	0,50	0,67	0,21	0,14	0,12
	0,75	0,51	0,17	0,22	0,07
1	0,25	0,99	0,22	0,03	0,21
	0,50	0,88	0,18	0,14	0,14
	0,75	0,72	0,15	0,22	0,09
2	0,25	1,00	0,23	0,03	0,22
	0,50	0,94	0,18	0,14	0,15
	0,75	0,82	0,16	0,22	0,10
4	0,25	1,00	0,11	0,03	0,11
	0,50	0,97	0,18	0,14	0,15
	0,75	0,86	0,16	0,22	0,11

Os resultados obtidos para o Açude Santo Antônio de Russas mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 2$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.14 Açude Cedro

A Tabela 20 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Cedro simulado com as capacidades de 126,00 ( $f_K = 4,91$ ), 25,67 ( $f_K = 1$ ), 51,34 ( $f_K = 2$ ) e 102,68  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 6,42 ( $f_M = 0,25$ ), 12,84 ( $f_M = 0,50$ ), e 19,25  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 20 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Cedro.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
4,91 (real)	0,25	0,98	0,11	0,08	0,10
	0,50	0,89	0,10	0,25	0,07
	0,75	0,76	0,09	0,39	0,04
1	0,25	0,83	0,13	0,10	0,10
	0,50	0,64	0,10	0,26	0,05
	0,75	0,51	0,10	0,39	0,03
2	0,25	0,94	0,12	0,09	0,10
	0,50	0,80	0,11	0,26	0,06
	0,75	0,65	0,10	0,39	0,04
4	0,25	0,97	0,12	0,08	0,11
	0,50	0,87	0,10	0,25	0,07
	0,75	0,74	0,09	0,39	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Cedro mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.15 Açude Patu

A Tabela 21 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Patu simulado com as capacidades de 71,83 ( $f_K = 0,89$ ), 81,05 ( $f_K = 1$ ), 162,10 ( $f_K = 2$ ) e 324,20  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 20,26 ( $f_M = 0,25$ ), 40,53 ( $f_M = 0,50$ ), e 60,79  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 21 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Patu.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,89 (real)	0,25	0,99	0,15	0,04	0,15
	0,50	0,88	0,15	0,12	0,12
	0,75	0,73	0,14	0,18	0,09
1	0,25	0,99	0,16	0,04	0,15
	0,50	0,89	0,15	0,12	0,12
	0,75	0,75	0,15	0,18	0,09
2	0,25	1,00	0,23	0,02	0,23
	0,50	0,96	0,14	0,09	0,12
	0,75	0,85	0,14	0,18	0,10

Tabela 21 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Patu.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
	0,25	1,00	1,00	0,00	1,00
4	0,50	0,99	0,14	0,09	0,13
	0,75	0,91	0,13	0,18	0,10

Os resultados obtidos para o Açude Patu mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 2$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos. Porém, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia realmente atingiu o valor de 100%, tanto que a resiliência e o IS obtiveram seus valores máximos e a vulnerabilidade o seu valor mínimo.

#### 4.1.16 Açude Pedras Brancas

A Tabela 22 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Pedras Brancas simulado com as capacidades de 434,00 ( $f_K = 2,76$ ), 157,21 ( $f_K = 1$ ), 314,42 ( $f_K = 2$ ) e 628,84  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 39,30 ( $f_M = 0,25$ ), 78,61 ( $f_M = 0,50$ ), e 117,91  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 22 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Pedras Brancas.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2,76 (real)	0,25	0,97	0,11	0,07	0,10
	0,50	0,85	0,09	0,18	0,06
	0,75	0,71	0,08	0,38	0,04
1	0,25	0,89	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,68	0,10	0,22	0,05
	0,75	0,54	0,08	0,38	0,03
2	0,25	0,96	0,11	0,08	0,10
	0,50	0,81	0,09	0,20	0,06
	0,75	0,67	0,08	0,38	0,03
4	0,25	0,98	0,11	0,07	0,10
	0,50	0,88	0,09	0,18	0,07
	0,75	0,75	0,08	0,38	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Pedras Brancas mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.17 Açude Poço do Barro

A Tabela 23 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Poço do Barro simulado com as capacidades de 52,00 ( $f_K=1,77$ ), 29,33 ( $f_K=1$ ), 58,66 ( $f_K=2$ ) e 117,32  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 7,33 ( $f_M=0,25$ ), 14,67 ( $f_M=0,50$ ), e 22,00  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 23 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Poço do Barro.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,77 (real)	0,25	0,50	0,11	0,10	0,05
	0,50	0,44	0,10	0,22	0,03
	0,75	0,40	0,09	0,37	0,02
1	0,25	0,50	0,11	0,10	0,05
	0,50	0,44	0,10	0,22	0,03
	0,75	0,40	0,09	0,37	0,02
2	0,25	0,50	0,11	0,10	0,05
	0,50	0,44	0,10	0,22	0,03
	0,75	0,40	0,09	0,37	0,02
4	0,25	0,50	0,11	0,10	0,05
	0,50	0,44	0,10	0,22	0,03
	0,75	0,40	0,09	0,37	0,02

Os resultados obtidos para o Açude Poço do Barro estranhamente obtiveram exatamente os mesmos valores para todos os cenários simulados. Como os dados de entrada foram revisados e corretamente inseridos no programa de simulação, podemos atribuir estes resultados a uma falha computacional ocorrida durante sua simulação.

#### 4.1.18 Açude Quixeramobim

A Tabela 24 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade

e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Quixeramobim simulado com as capacidades de 54,00 ( $f_K = 0,40$ ), 133,55 ( $f_K = 1$ ), 267,10 ( $f_K = 2$ ) e 534,20  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 33,39 ( $f_M = 0,25$ ), 66,78 ( $f_M = 0,50$ ), e 100,16  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 24 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Quixeramobim.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,40 (real)	0,25	0,88	0,17	0,06	0,14
	0,50	0,67	0,13	0,14	0,07
	0,75	0,52	0,14	0,22	0,06
1	0,25	0,98	0,16	0,06	0,15
	0,50	0,83	0,13	0,14	0,09
	0,75	0,68	0,13	0,22	0,07
2	0,25	1,00	0,17	0,05	0,17
	0,50	0,92	0,13	0,14	0,10
	0,75	0,79	0,13	0,22	0,08
4	0,25	1,00	0,21	0,02	0,21
	0,50	0,97	0,13	0,12	0,11
	0,75	0,87	0,13	0,22	0,09

Os resultados obtidos para o Açude Quixeramobim mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 2$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.19 Açude Boa Viagem

A Tabela 25 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Boa Viagem simulado com as capacidades de 47,00 ( $f_K = 1,64$ ), 28,65 ( $f_K = 1$ ), 57,30 ( $f_K = 2$ ) e 114,60  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 7,16 ( $f_M = 0,25$ ), 14,33 ( $f_M = 0,50$ ), e 21,49  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 25 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Boa Viagem.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,64 (real)	0,25	0,98	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,86	0,11	0,17	0,08
	0,75	0,71	0,09	0,29	0,05
1	0,25	0,94	0,13	0,07	0,12
	0,50	0,75	0,12	0,18	0,07
	0,75	0,61	0,09	0,29	0,04
2	0,25	0,99	0,15	0,04	0,14
	0,50	0,88	0,11	0,17	0,08
	0,75	0,74	0,09	0,29	0,05
4	0,25	1,00	0,15	0,02	0,15
	0,50	0,95	0,12	0,17	0,09
	0,75	0,83	0,09	0,29	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Boa Viagem mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.20 Açude Cipoada

A Tabela 26 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Cipoada simulado com as capacidades de 17,25 ( $f_K = 0,54$ ), 31,99 ( $f_K = 1$ ), 63,98 ( $f_K = 2$ ) e 127,96  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 8,00 ( $f_M = 0,25$ ), 16,00 ( $f_M = 0,50$ ), e 23,99  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 26 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Cipoada.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,54 (real)	0,25	0,79	0,12	0,08	0,09
	0,50	0,58	0,09	0,21	0,04
	0,75	0,44	0,10	0,37	0,03
1	0,25	0,90	0,12	0,08	0,10
	0,50	0,70	0,10	0,21	0,06
	0,75	0,56	0,08	0,37	0,03

Tabela 26 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Cipoada.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2	0,25	0,97	0,11	0,07	0,10
	0,50	0,83	0,09	0,19	0,06
	0,75	0,68	0,09	0,37	0,04
4	0,25	0,99	0,12	0,05	0,11
	0,50	0,91	0,10	0,18	0,07
	0,75	0,78	0,09	0,37	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Cipoada mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.21 Açude Riacho dos Tanques

A Tabela 27 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Riacho dos Tanques simulado com as capacidades de 12,78 ( $f_K = 4,14$ ), 3,09 ( $f_K = 1$ ), 6,18 ( $f_K = 2$ ) e 12,36  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 0,77 ( $f_M = 0,25$ ), 1,55 ( $f_M = 0,50$ ), e 2,32  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 27 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho dos Tanques.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
4,14 (real)	0,25	0,92	0,11	0,09	0,09
	0,50	0,79	0,10	0,26	0,06
	0,75	0,66	0,09	0,38	0,4
1	0,25	0,76	0,11	0,09	0,08
	0,50	0,60	0,09	0,26	0,04
	0,75	0,48	0,09	0,38	0,3
2	0,25	0,87	0,11	0,09	0,09
	0,50	0,72	0,10	0,26	0,05
	0,75	0,59	0,09	0,38	0,03
4	0,25	0,92	0,11	0,09	0,09
	0,50	0,78	0,10	0,26	0,06
	0,75	0,66	0,09	0,38	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Riacho dos Tanques mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a



diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.22 Açude Riacho Verde

A Tabela 28 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Riacho Verde simulado com as capacidades de 14,67 ( $f_K=6,64$ ), 2,21 ( $f_K=1$ ), 4,42 ( $f_K=2$ ) e 8,84  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 0,55 ( $f_M=0,25$ ), 1,11 ( $f_M=0,50$ ), e 1,66  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 28 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho Verde.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
6,64 (real)	0,25	0,84	0,05	0,19	0,04
	0,50	0,71	0,05	0,41	0,02
	0,75	0,59	0,05	0,66	0,01
1	0,25	0,53	0,06	0,22	0,02
	0,50	0,40	0,05	0,42	0,01
	0,75	0,30	0,05	0,80	0,00
2	0,25	0,70	0,06	0,21	0,03
	0,50	0,54	0,05	0,41	0,02
	0,75	0,43	0,05	0,76	0,01
4	0,25	0,80	0,06	0,21	0,04
	0,50	0,65	0,05	0,41	0,02
	0,75	0,54	0,05	0,66	0,01

Os resultados obtidos para o Açude Riacho Verde mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.23 Açude Serafim Dias

A Tabela 29 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Serafim Dias simulado com as capacidades de 43,00 ( $f_K=0,43$ ), 99,92 ( $f_K=1$ ), 199,84 ( $f_K=2$ ) e 399,68  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 24,98 ( $f_M=0,25$ ), 49,96 ( $f_M=0,50$ ), e 74,94  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 29 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Serafim Dias.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,43 (real)	0,25	0,78	0,12	0,08	0,08
	0,50	0,55	0,10	0,21	0,04
	0,75	0,41	0,09	0,37	0,02
1	0,25	0,92	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,72	0,10	0,21	0,06
	0,75	0,57	0,08	0,37	0,03
2	0,25	0,97	0,12	0,07	0,11
	0,50	0,84	0,09	0,18	0,06
	0,75	0,69	0,08	0,37	0,04
4	0,25	0,99	0,12	0,05	0,11
	0,50	0,91	0,09	0,18	0,07
	0,75	0,78	0,08	0,37	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Serafim Dias mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.24 Açude São José II

A Tabela 30 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude São José II simulado com as capacidades de 29,15 ( $f_K=2,10$ ), 13,88 ( $f_K=1$ ), 27,76 ( $f_K=2$ ) e 55,52  $hm^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 3,47 ( $f_M=0,25$ ), 6,94 ( $f_M=0,50$ ), e 10,41  $hm^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 30 – Indicadores de sustentabilidade do Açude São José II.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2,10 (real)	0,25	0,96	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,82	0,09	0,25	0,05
	0,75	0,69	0,09	0,37	0,04
1	0,25	0,88	0,11	0,08	0,09
	0,50	0,68	0,09	0,25	0,05
	0,75	0,55	0,08	0,37	0,03
2	0,25	0,96	0,10	0,08	0,09
	0,50	0,81	0,09	0,25	0,05
	0,75	0,68	0,08	0,37	0,04
4	0,25	0,98	0,11	0,07	0,10
	0,50	0,89	0,09	0,25	0,06
	0,75	0,77	0,08	0,37	0,04

Os resultados obtidos para o Açude São José II mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.25 Açude Fogareiro

A Tabela 31 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Fogareiro simulado com as capacidades de 118,81 ( $f_K = 0,49$ ), 242,01 ( $f_K = 1$ ), 484,02 ( $f_K = 2$ ) e 968,04  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 60,50 ( $f_M = 0,25$ ), 121,01 ( $f_M = 0,50$ ), e 181,51  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 31 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Fogareiro.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,49 (real)	0,25	0,90	0,16	0,05	0,13
	0,50	0,69	0,13	0,16	0,10
	0,75	0,54	0,14	0,26	0,07
1	0,25	0,98	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,84	0,14	0,14	0,10
	0,75	0,69	0,13	0,26	0,06
2	0,25	1,00	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,93	0,13	0,14	0,10
	0,75	0,80	0,12	0,26	0,07
4	0,25	1,00	0,17	0,01	0,16
	0,50	0,97	0,13	0,14	0,11
	0,75	0,87	0,12	0,26	0,08

Os resultados obtidos para o Açude Fogareiro mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 2$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.26 Açude Trapiá II

A Tabela 32 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Trapiá II simulado com as capacidades de 18,19 ( $f_K=1,21$ ), 15,03 ( $f_K=1$ ), 30,06 ( $f_K=2$ ) e 60,12  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 3,76 ( $f_M=0,25$ ), 7,52 ( $f_M=0,50$ ), e 11,27  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 32 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Trapiá II.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,21 (real)	0,25	0,99	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,89	0,14	0,18	0,10
	0,75	0,74	0,12	0,28	0,07
1	0,25	0,98	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,86	0,14	0,18	0,10
	0,75	0,71	0,12	0,28	0,06
2	0,25	1,00	0,14	0,03	0,14
	0,50	0,94	0,13	0,18	0,10
	0,75	0,82	0,12	0,28	0,07
4	0,25	1,00	0,25	0,01	0,25
	0,50	0,98	0,13	0,14	0,11
	0,75	0,89	0,12	0,28	0,07

Os resultados obtidos para o Açude Trapiá II mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K=2$  e  $f_M=0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K=4$  e  $f_M=0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.27 Açude Riacho dos Carneiros

A Tabela 33 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Riacho dos Carneiros simulado com as capacidades de 37,18 ( $f_K=9,51$ ), 3,91 ( $f_K=1$ ), 7,82 ( $f_K=2$ ) e 15,64  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 0,98 ( $f_M=0,25$ ), 1,96 ( $f_M=0,50$ ), e 2,93  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 33 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Riacho dos Carneiros.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
9,51 (real)	0,25	1,00	0,16	0,01	0,15
	0,50	0,96	0,11	0,12	0,09
	0,75	0,85	0,10	0,27	0,06
1	0,25	0,80	0,14	0,08	0,10
	0,50	0,63	0,10	0,19	0,05
	0,75	0,49	0,10	0,31	0,03
2	0,25	0,96	0,13	0,05	0,12
	0,50	0,83	0,11	0,16	0,08
	0,75	0,68	0,09	0,31	0,04
4	0,25	0,99	0,14	0,04	0,13
	0,50	0,92	0,11	0,12	0,09
	0,75	0,79	0,10	0,27	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Riacho dos Carneiros mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 9,51$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.28 Açude Prazeres

A Tabela 34 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Prazeres simulado com as capacidades de 32,50 ( $f_K = 5,16$ ), 6,30 ( $f_K = 1$ ), 12,60 ( $f_K = 2$ ) e 25,20  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 1,58 ( $f_M = 0,25$ ), 3,15 ( $f_M = 0,50$ ), e 4,73  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 34 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Prazeres.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
5,16 (real)	0,25	1,00	1,00	0,00	1,00
	0,50	0,99	0,11	0,14	0,09
	0,75	0,90	0,10	0,28	0,07

Tabela 34 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Prazeres.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1	0,25	0,96	0,14	0,05	0,13
	0,50	0,79	0,12	0,18	0,08
	0,75	0,63	0,10	0,28	0,04
2	0,25	1,00	0,14	0,03	0,14
	0,50	0,92	0,11	0,18	0,08
	0,75	0,79	0,11	0,28	0,06
4	0,25	1,00	0,13	0,01	0,12
	0,50	0,98	0,11	0,14	0,09
	0,75	0,88	0,10	0,28	0,07

Os resultados obtidos para o Açude Prazeres mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 2$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos. Porém, para o cenário com  $f_K = 5,16$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia realmente atingiu o valor de 100%, tanto que a resiliência e o IS obtiveram seus valores máximos e a vulnerabilidade o seu valor mínimo.

#### 4.1.29 Açude Lima Campos

A Tabela 35 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Lima Campos simulado com as capacidades de 63,65 ( $f_K = 2,54$ ), 25,05 ( $f_K = 1$ ), 50,10 ( $f_K = 2$ ) e 100,20  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 6,26 ( $f_M = 0,25$ ), 12,53 ( $f_M = 0,50$ ), e 18,79  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 35 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Lima Campos.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2,54 (real)	0,25	1,00	0,18	0,04	0,18
	0,50	0,93	0,15	0,14	0,12
	0,75	0,80	0,13	0,23	0,08
1	0,25	0,97	0,19	0,04	0,18
	0,50	0,84	0,15	0,14	0,11
	0,75	0,69	0,13	0,23	0,07

Tabela 35 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Lima Campos.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
2	0,25	0,99	0,20	0,04	0,19
	0,50	0,91	0,15	0,14	0,11
	0,75	0,78	0,13	0,23	0,08
4	0,25	1,00	0,14	0,04	0,14
	0,50	0,95	0,14	0,14	0,12
	0,75	0,82	0,13	0,23	0,08

Os resultados obtidos para o Açude Lima Campos mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 2,54$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.30 Açude Ingazeiro

A Tabela 36 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Ingazeiro simulado com as capacidades de 11,32 ( $f_K = 0,74$ ), 15,30 ( $f_K = 1$ ), 30,60 ( $f_K = 2$ ) e 61,20  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 3,83 ( $f_M = 0,25$ ), 7,65 ( $f_M = 0,50$ ), e 11,48  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 36 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Ingazeiro.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
0,74 (real)	0,25	0,75	0,06	0,16	0,04
	0,50	0,51	0,06	0,40	0,02
	0,75	0,39	0,05	0,77	0,00
1	0,25	0,81	0,06	0,16	0,04
	0,50	0,57	0,05	0,39	0,02
	0,75	0,43	0,05	0,77	0,00
2	0,25	0,92	0,06	0,16	0,05
	0,50	0,71	0,05	0,37	0,02
	0,75	0,55	0,05	0,77	0,01
4	0,25	0,97	0,06	0,13	0,05
	0,50	0,83	0,05	0,34	0,03
	0,75	0,68	0,05	0,77	0,01

#### 4.1.31 Açude Quixabinha

A Tabela 37 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Quixabinha simulado com as capacidades de 32,51 ( $f_K=9,18$ ), 3,54 ( $f_K=1$ ), 7,08 ( $f_K=2$ ) e 14,16  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 0,89 ( $f_M=0,25$ ), 1,77 ( $f_M=0,50$ ), e 2,66  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).

Tabela 37 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Quixabinha.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
9,18 (real)	0,25	0,97	0,07	0,08	0,06
	0,50	0,87	0,06	0,27	0,04
	0,75	0,75	0,06	0,50	0,02
1	0,25	0,75	0,07	0,15	0,05
	0,50	0,55	0,07	0,35	0,02
	0,75	0,43	0,06	0,52	0,01
2	0,25	0,86	0,07	0,13	0,05
	0,50	0,69	0,07	0,32	0,03
	0,75	0,55	0,06	0,51	0,02
4	0,25	0,93	0,07	0,09	0,06
	0,50	0,80	0,06	0,29	0,04
	0,75	0,66	0,06	0,50	0,02

Os resultados obtidos para o Açude Quixabinha mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.32 Açude Atalho II

A Tabela 38 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Atalho II simulado com as capacidades de 108,25 ( $f_K=1,10$ ), 98,24 ( $f_K=1$ ), 196,48 ( $f_K=2$ ) e 392,96  $\text{hm}^3$  ( $f_K=4$ ), e para as retiradas anuais de 24,56 ( $f_M=0,25$ ), 49,12 ( $f_M=0,50$ ), e 773,68  $\text{hm}^3$  ( $f_M=0,75$ ).



Tabela 38 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Atalho II.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
1,10 (real)	0,25	0,88	0,08	0,13	0,06
	0,50	0,65	0,06	0,33	0,03
	0,75	0,49	0,06	0,53	0,01
1	0,25	0,86	0,08	0,14	0,06
	0,50	0,62	0,07	0,33	0,03
	0,75	0,47	0,06	0,53	0,01
2	0,25	0,96	0,08	0,09	0,07
	0,50	0,78	0,07	0,30	0,04
	0,75	0,62	0,07	0,50	0,02
4	0,25	0,99	0,09	0,04	0,09
	0,50	0,90	0,06	0,22	0,04
	0,75	0,75	0,06	0,47	0,03

Os resultados obtidos para o Açude Atalho II mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ .

#### 4.1.33 Açude Thomas Osterne

A Tabela 39 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Thomas Osterne simulado com as capacidades de 28,79 ( $f_K = 4,54$ ), 6,34 ( $f_K = 1$ ), 12,68 ( $f_K = 2$ ) e 25,36  $\text{hm}^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 1,59 ( $f_M = 0,25$ ), 3,17 ( $f_M = 0,50$ ), e 4,76  $\text{hm}^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 39 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Thomas Osterne.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
4,54 (real)	0,25	1,00	0,14	0,02	0,13
	0,50	0,95	0,11	0,15	0,09
	0,75	0,84	0,10	0,29	0,06
1	0,25	0,96	0,13	0,08	0,11
	0,50	0,79	0,12	0,18	0,08
	0,75	0,64	0,10	0,29	0,04
2	0,25	0,99	0,14	0,06	0,13
	0,50	0,90	0,11	0,18	0,08
	0,75	0,76	0,10	0,29	0,05

Tabela 39 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Thomas Osterne.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
	0,25	1,00	0,12	0,02	0,12
4	0,50	0,95	0,11	0,16	0,09
	0,75	0,83	0,10	0,29	0,06

Os resultados obtidos para o Açude Thomas Osterne mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 4,54$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

#### 4.1.34 Açude Olho D'Água

A Tabela 40 mostra valores dos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e do índice de sustentabilidade obtidos para o Açude Olho D'Água simulado com as capacidades de 21,30 ( $f_K = 3,88$ ), 5,49 ( $f_K = 1$ ), 10,98 ( $f_K = 2$ ) e 21,9  $hm^3$  ( $f_K = 4$ ), e para as retiradas anuais de 1,37 ( $f_M = 0,25$ ), 2,75 ( $f_M = 0,50$ ), e 4,12  $hm^3$  ( $f_M = 0,75$ ).

Tabela 40 – Indicadores de sustentabilidade do Açude Olho D'Água.

$f_K$	$f_M$	Indicadores			
		G	R	Vn	IS
	0,25	1,00	0,17	0,02	0,16
3,88 (real)	0,50	0,94	0,09	0,19	0,07
	0,75	0,82	0,09	0,37	0,04
	0,25	0,90	0,12	0,08	0,09
1	0,50	0,69	0,10	0,22	0,05
	0,75	0,54	0,08	0,37	0,03
	0,25	0,98	0,12	0,06	0,11
2	0,50	0,85	0,09	0,19	0,06
	0,75	0,70	0,09	0,37	0,03
	0,25	1,00	0,19	0,02	0,18
4	0,50	0,95	0,10	0,19	0,07
	0,75	0,82	0,09	0,37	0,04

Os resultados obtidos para o Açude Olho D'Água mostram que garantia, resiliência e índice de sustentabilidade tendem aumentar com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ , enquanto que a vulnerabilidade diminui com o aumento do  $f_K$  ou com a diminuição do  $f_M$ . Outra observação importante é que, para o cenário com  $f_K = 4$  e  $f_M = 0,25$ ; assim como para o cenário com  $f_K = 3,88$  (real) e  $f_M = 0,25$ ; a garantia aparece igual a 1,00 somente por conta do arredondamento, quando na realidade ela é um pouco menor que 100%, tanto que nenhum dos outros indicadores obtiveram seus valores máximos ou mínimos.

## 4.2 Indicadores de Desempenho da Bacia do Rio Jaguaribe

Como uma das funções mais importantes dos indicadores de sustentabilidade é possibilitar a análise comparativa do desempenho entre os reservatórios, é importante a realização de um estudo regionalizado dos indicadores capaz de descrever seu comportamento na bacia. Um dos objetivos desse estudo é a criação de uma classificação dos reservatórios indicando o nível de sustentabilidade do mesmo, adequada à realidade da região da Bacia do Rio Jaguaribe.

Para facilitar a visualização do comportamento dos indicadores e do índice de sustentabilidade da região, os valores expostos no Item 4.1 deste trabalho serão apresentados na forma de gráficos onde os resultados de todos os reservatórios, de um dado indicador para um dado  $f_K$ , serão colocados juntos. Os valores obtidos para os cenários que utilizaram os  $f_K$ 's reais dos reservatórios não serão abordados neste tópico pois, por representarem valores diferentes para cada reservatório, seriam de pouca valia para o estudo comparativo do comportamento dos indicadores de sustentabilidade.

### 4.2.1 Garantia

A garantia é o indicador de sustentabilidade historicamente mais utilizado pela hidrologia no estudo de reservatórios, tendo sido amplamente estudada por diversos pesquisadores, nas mais diversas situações. Por esse motivo, o seu comportamento diante das variações do fator adimensional de capacidade e do fator adimensional de retirada, assim como o de outras variáveis, é bem conhecido por grande parte dos estudiosos da área. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos da Figura 7, que contém todos os valores de garantia obtidos para os 34 reservatórios abordados nesta pesquisa.

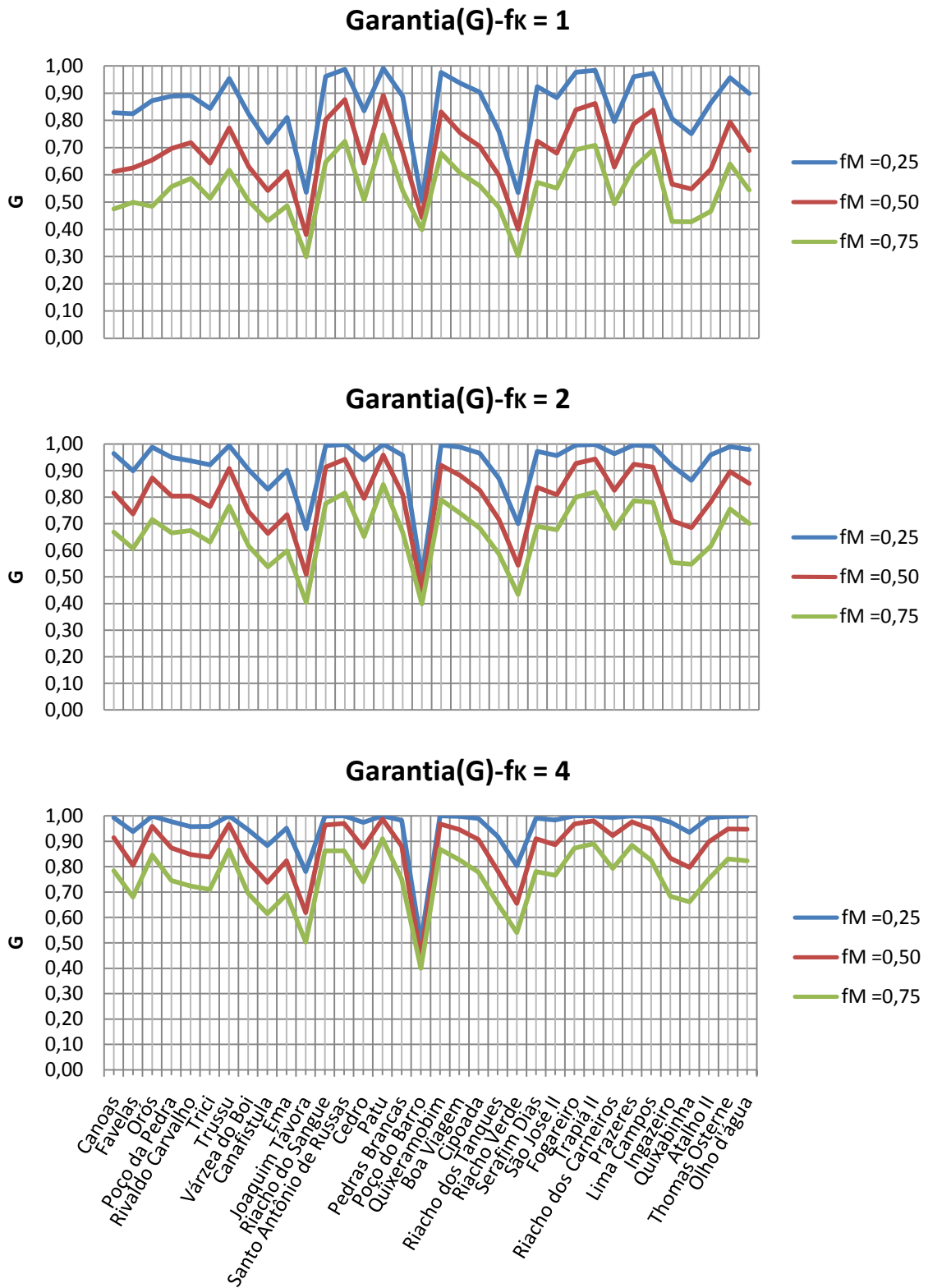


Figura 7 – Gráficos dos valores do indicador de garantia (G) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores dimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4.

Fazendo-se primeiramente uma análise sobre o comportamento da garantia devido à variação do fator adimensional de retirada, pode-se observar que as simulações que utilizaram  $f_M = 0,25$  obtiveram valores de garantia mais elevados do que as que utilizaram  $f_M = 0,50$ ; que, por sua vez, obtiveram valores maiores do que as que utilizaram  $f_M = 0,75$ . Este fenômeno ocorre, sem exceção, em todos os cenários para os quais os reservatórios foram simulados, o que indica a existência de uma relação inversamente proporcional entre o  $f_M$  adotado e a garantia obtida. Partindo da premissa de que os volumes afluentes a um reservatório não se alteram de um cenário para outro, esta relação pode ser facilmente explicada pelo fato de que o incremento da retirada de água, causado pelo aumento da vazão regularizada, enquanto a sua entrada permanece inalterada, significa a diminuição do volume armazenado no reservatório e, conseqüentemente, da probabilidade de se atender da retirada esperada.

Uma observação análoga pode ser feita sobre a influência da variação do  $f_K$ , no entanto, ao contrário do que ocorre com o  $f_M$ , o  $f_K$  e a garantia apresentam uma relação diretamente proporcional entre si, onde os reservatórios simulados com os maiores  $f_K$  obtiveram os valores de garantia mais elevados. Apesar de esta relação ter sido observada em todos os cenários pelos quais os reservatórios estudados neste trabalho foram simulados, é importante salientar que este comportamento se mantém até certo valor limite, que depende do coeficiente de variação da vazão afluente, como demonstram os diagramas triangulares de regularização construídos por Campos (1996).

A disposição mais detalhada dos resultados obtidos para o indicador de garantia utilizando os  $f_K$ 's sintéticos pode ser realizada com o auxílio da tabela de freqüências da Tabela 41 e de sua representação gráfica no Histograma apresentado na Figura 8.

Tabela 41 – Tabela de freqüências dos valores de garantia dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Garantia</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>acum</sub></b>	<b>f (%)</b>	<b>f<sub>acum</sub> (%)</b>
0,30 -  0,37	2	2	0,01	0,01
0,37 -  0,44	10	12	0,03	0,04
0,44 -  0,51	18	30	0,06	0,10
0,51 -  0,58	16	46	0,05	0,15
0,58 -  0,65	24	70	0,08	0,23
0,65 -  0,72	36	106	0,12	0,35
0,72 -  0,79	33	139	0,11	0,45
0,79 -  0,86	42	181	0,14	0,59
0,86 -  0,93	47	228	0,15	0,75
0,93 -  1,00	78	306	0,25	1,00
<b>Total</b>	<b>306</b>		<b>1,00</b>	

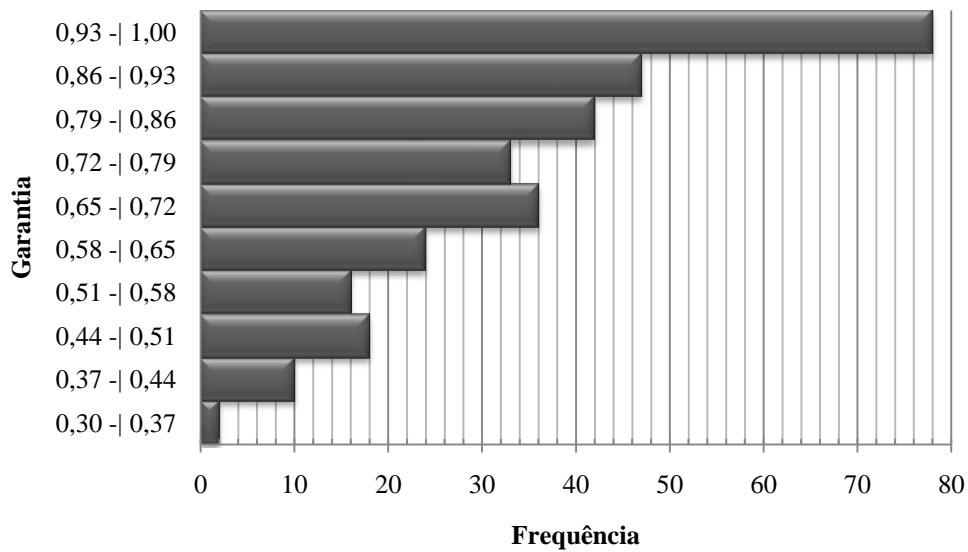


Figura 8 – Histograma dos valores de garantia dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Observa-se que a maioria das simulações obteve valores elevados de garantia, constatação caracterizada pelo formato crescente apresentado pelo histograma, onde a classe dos valores mais baixos (0,30 a 0,37) contém apenas 1% dos resultados enquanto a classe dos valores mais elevados (0,93 a 1,00) abrange 25%. A média do indicador de garantia obtida nas simulações é de 78%, enquanto a mediana atingiu o valor de 81%, o que ratifica a tendência de se obter valores elevados para este indicador.

Tendo em vista que um dos objetivos de se calcular os indicadores é poder classificar seus resultados, é preciso criar uma qualificação dos valores obtidos, delimitando-se faixas de desempenho para eles. A escolha dos limites de cada faixa pode seguir diversos critérios, sendo que o mais utilizado para a garantia é análise dos usos destinados a água fornecida pelo reservatório. Como os usos da água dos reservatórios, bem como outras características relevantes ao consumo, não foram abordados nesse trabalho, convencionou-se utilizar um critério puramente estatístico.

Os resultados serão classificados utilizando-se a técnica dos Quantis descrita em Alves et. al. (2000), pela qual se obtêm os seguintes limites:

- muito baixa:  $G \leq Q_{15}$
- baixa:  $Q_{15} \leq G \leq Q_{35}$
- normal:  $Q_{35} \leq G \leq Q_{65}$
- alta:  $Q_{65} \leq G \leq Q_{85}$
- muito alta:  $G \geq Q_{85}$

A Tabela 42 mostra os limites obtidos para os resultados do indicador de garantia utilizando os  $f_K$ 's sintéticos.

Tabela 42 – Níveis de Garantia da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Limites</b>	<b>Nível de Garantia</b>
$G \leq 58\%$	muito baixa
$58\% \leq G \leq 72\%$	baixa
$72\% \leq G \leq 88\%$	normal
$88\% \leq G \leq 97\%$	alta
$97\% \leq G$	muito alta

Ao se utilizar a técnica dos quartis para classificar os resultados nós teremos sempre uma porcentagem fixa de valores presentes em cada classe, onde 35% dos resultados terão uma classificação insatisfatória (baixa e muito baixa) e 65% dos resultados terão uma classificação satisfatória (normal, alta e muito alta). Porém, se usarmos estes limites para analisar as simulações que utilizaram os  $f_K$ 's reais podemos obter porcentagens diferentes para os níveis de garantia, além de possibilitar uma análise da situação real dos reservatórios da região.

Os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, foram classificados com 23% dos reservatórios tidos com de garantia muito baixa, 18% de garantia baixa, 27% de garantia normal, 18% de garantia alta e 15% de garantia muito alta. Pode-se notar uma piora do quadro obtido para os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, que apresentaram, respectivamente, 40% e 60% de resultados insatisfatórios e satisfatórios, contra 35% e 65% dos cenários simulados com os  $f_K$ 's sintéticos. Este quadro indica que as capacidades reais dos reservatórios estudados, em sua maioria, não são muito eficientes, na ótica do indicador de garantia.

#### 4.2.2 Resiliência

O indicador de resiliência, apesar de não ser tão difundido quanto o da garantia, tem uma formulação tradicional bem fundamentada e aceita por grande parte dos especialistas, tanto que, no presente trabalho, não houve nenhuma modificação em sua equação matemática. Mesmo assim, a resiliência normalmente não é utilizada como parâmetro para se medir a eficiência de reservatórios, especialmente no Brasil. Por esse motivo, o comportamento do indicador de resiliência nos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe é praticamente desconhecido, pois ao contrário da amplamente utilizada garantia, este indicador mede as durações de eventos de seca (runs) e não o período total em falha.

Para realizar a análise de seu comportamento, os valores de resiliência obtidos para os 34 reservatórios abordados nesta pesquisa estão dispostos nos gráficos da Figura 9.

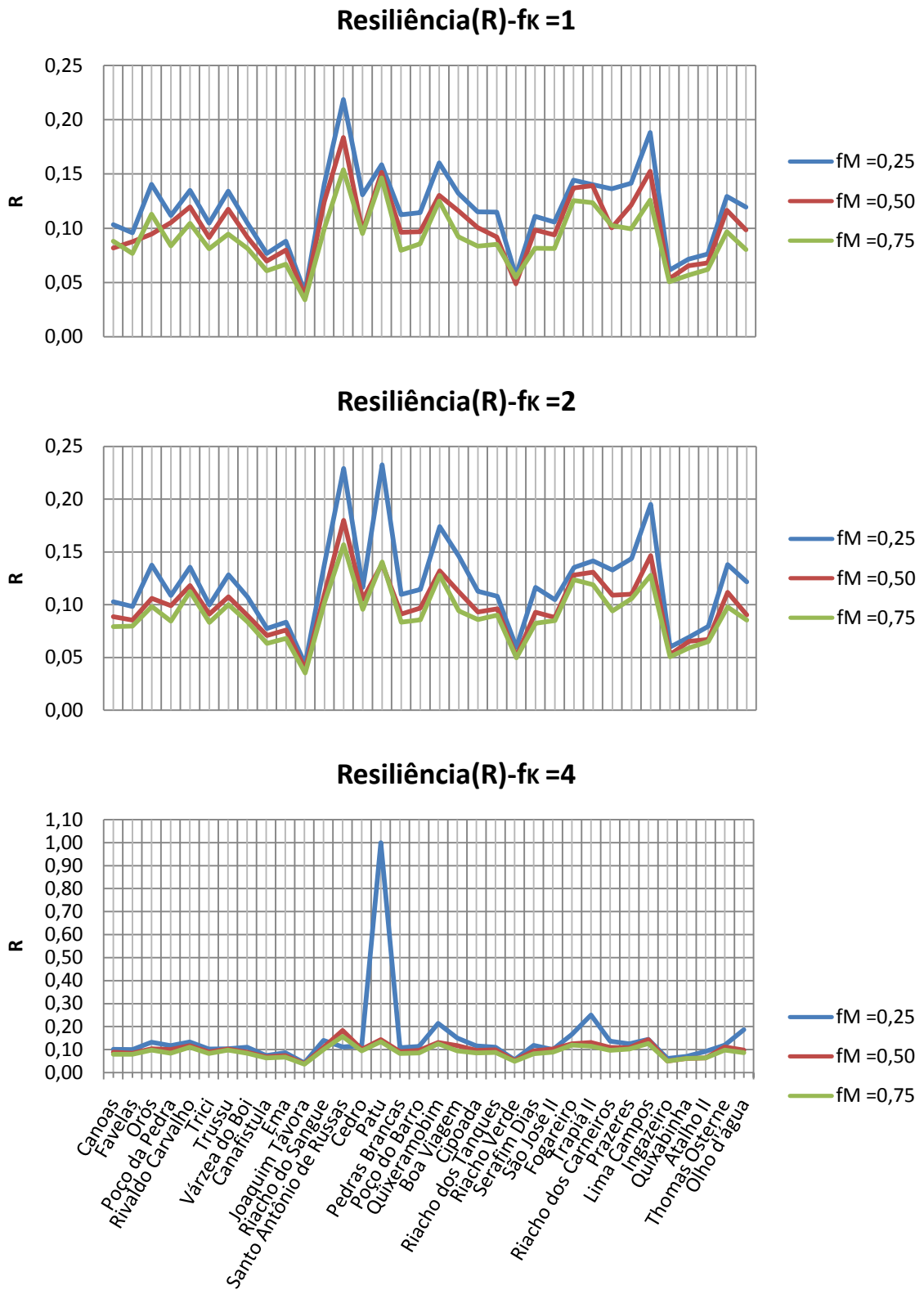


Figura 9 – Gráficos dos valores do indicador de resiliência (R) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores dimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4.



O gráfico dos valores de resiliência obtidos com o  $f_K = 4$ , ficou muito distorcido devido a presença de um único valor extremo para o Açude Patu, dificultando a visualização dos demais valores. Por isso, a Figura 10 apresenta o mesmo gráfico com a ausência do Açude Patu, para facilitar a análise de seu comportamento.

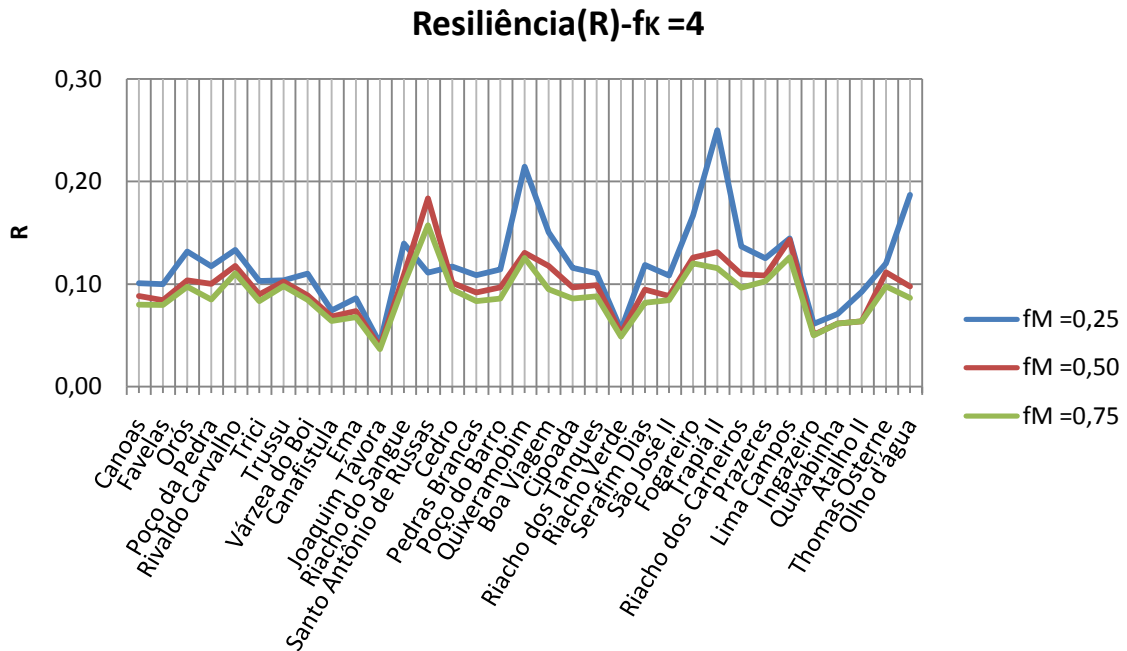


Figura 10 – Gráfico dos valores do indicador de resiliência (R) dos 33 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe (excluindo o Açude Patu) simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 4.

Fazendo-se primeiramente uma análise sobre o comportamento da resiliência devido à variação do fator adimensional de retirada, pode-se observar que, assim com ocorreu com a garantia, as simulações que utilizaram  $f_M = 0,25$  obtiveram valores de resiliência mais elevados do que as que utilizaram  $f_M = 0,50$ ; que, por sua vez, obtiveram valores maiores do que as que utilizaram  $f_M = 0,75$ . No entanto, este fenômeno não pôde ser observado em todos os cenários para os quais os reservatórios foram simulados. Se pegarmos com exemplo os resultados do Açude Santo Antônio de Russas com o  $f_K = 4$ , veremos que o resultado obtido pelo  $f_M = 0,25$  foi menor do que os obtidos pelos  $f_M = 0,50$  e  $0,75$ . Este fato pode ser explicado pela aleatoriedade da ocorrência de uma falha durante o período simulado, que pode fazer com que as falhas ocorram mais agrupadas, aumentando a duração média dos runs e, conseqüentemente, diminuindo a resiliência, ou mais dispersas, diminuindo a duração média das secas e aumentando a resiliência. Entretanto, foram apenas 5 casos de exceção a regra de

que os  $f_M$  mais baixos obtêm os valores mais elevados de resiliência, o que caracteriza uma relação inversa entre a retirada e a resiliência.

Realizando a mesma análise com relação ao  $f_K$ , observa-se que a resiliência é pouco sensível a sua variação. Apesar de existir uma variação entre cenários simulados com  $f_K$ 's diferentes, essas variações foram muito pequenas, atingindo menos de 1% da média obtida para os resultados, tanto para mais quanto para menos. Isto indica que mesmo que o número de falhas de regularização em reservatórios diminua com o aumento de sua capacidade, as durações das falhas ocorridas permanecerão praticamente inalteradas.

A disposição mais detalhada dos resultados obtidos para o indicador de resiliência pode ser realizada com o auxílio da tabela de freqüências da Tabela 43 e de sua representação gráfica no Histograma apresentado na Figura 11.

Tabela 43 – Tabela de freqüências dos valores de resiliência dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Resiliência	F	F <sub>acum</sub>	f (%)	f <sub>acum</sub> (%)
0,030 -  0,052	17	17	0,06	0,06
0,052 -  0,074	35	52	0,11	0,17
0,074 -  0,096	80	132	0,26	0,43
0,096 -  0,118	90	222	0,29	0,73
0,118 -  0,140	48	270	0,16	0,88
0,140 -  0,162	22	292	0,07	0,95
0,162 -  0,184	5	297	0,02	0,97
0,184 -  0,206	3	300	0,01	0,98
0,206 -  0,228	2	302	0,01	0,99
0,228 -  1,000	4	306	0,01	1,00
<b>Total</b>	<b>306</b>		<b>1,00</b>	

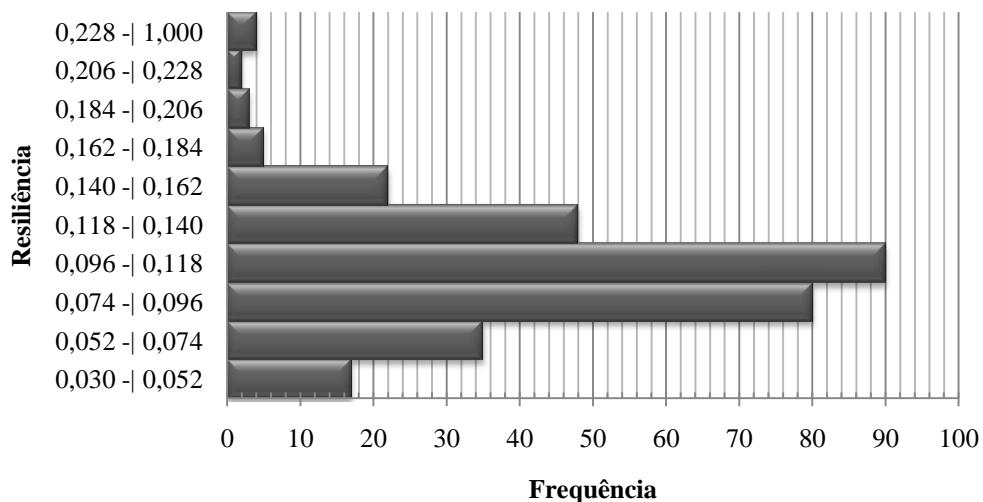


Figura 11 – Histograma dos valores de resiliência dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

A primeira observação que pode ser feita sobre esta tabela é que os valores obtidos para a resiliência foram muito baixos, chegando a uma média de apenas 10%. Este fato pode ser atribuído a característica hidrológica dos rios da região que sempre apresentaram longos períodos de estiagem. Observa-se também que a maior parte dos resultados está situada nas classes dos valores mais baixos, como demonstra o histograma que apresenta um pico na metade inferior de sua escala vertical. Enquanto as cinco primeiras classes da tabela, que representam os valores mais baixos obtidos, contêm quase 90% dos resultados, as outras cinco classes, que representam os valores mais elevados, contêm apenas 22%.

A classificação dos resultados obtidos para a resiliência, assim como a garantia, foi realizada seguindo técnica dos quartis. Dessa forma, teremos como limites para delimitar os cinco níveis de resiliência os valores apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 – Níveis de Resiliência da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Limites</b>	<b>Nível de Resiliência</b>
$R \leq 7\%$	muito baixa
$7\% \leq R \leq 9\%$	baixa
$9\% \leq R \leq 11\%$	normal
$11\% \leq R \leq 14\%$	alta
$14\% \leq R$	muito alta

Os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, foram classificados com 16% dos reservatórios tidos com de resiliência muito baixa, 19% de resiliência baixa, 31% de resiliência normal, 13% de resiliência alta e 22% de resiliência muito alta. Pode-se notar uma pequena melhora do quadro obtido para os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, que apresentaram, respectivamente, 34% e 66% de resultados insatisfatórios e satisfatórios, contra 35% e 65% dos cenários simulados com os  $f_K$ 's sintéticos. Este quadro indica que as capacidades reais dos reservatórios estudados, em sua maioria, apresentam resultados medianos, na ótica do indicador de resiliência.

#### 4.2.3 Vulnerabilidade

Dos indicadores de sustentabilidade utilizados neste trabalho a vulnerabilidade é certamente o mais diferenciado. O primeiro motivo é que, ao contrário dos outros indicadores, a vulnerabilidade mede um aspecto negativo de um evento de seca, ou seja, é o único indicador inversamente proporcional à sustentabilidade. O segundo motivo é que não há um consenso entre os especialistas sobre a melhor formulação para a vulnerabilidade, tanto que no presente trabalho buscou-se criar uma fórmula matemática diferentes de outras já abordadas

anteriormente. Devidos a estes motivos, é impossível fazer qualquer previsão sobre como será o comportamento do indicador de vulnerabilidade nos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe, pois será a primeira vez que esta formulação será utilizada.

Para realizar a análise de seu comportamento, os valores de resiliência obtidos para os 34 reservatórios abordados nesta pesquisa estão dispostos nos gráficos das Figuras 12 e 13.

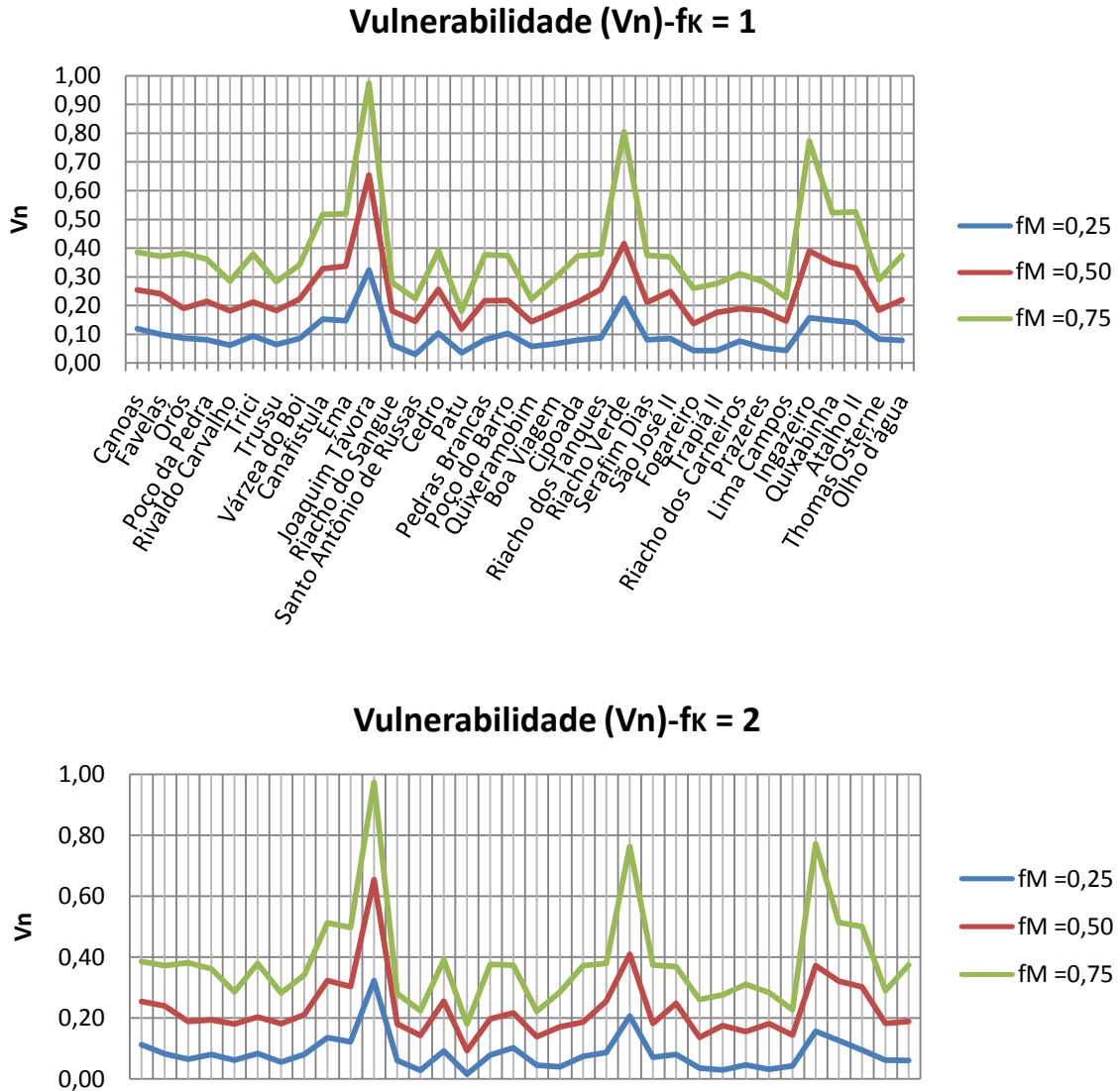


Figura 12 – Gráficos dos valores do indicador de vulnerabilidade (Vn) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada (f<sub>M</sub>) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade (f<sub>K</sub>) iguais a 1 e 2.

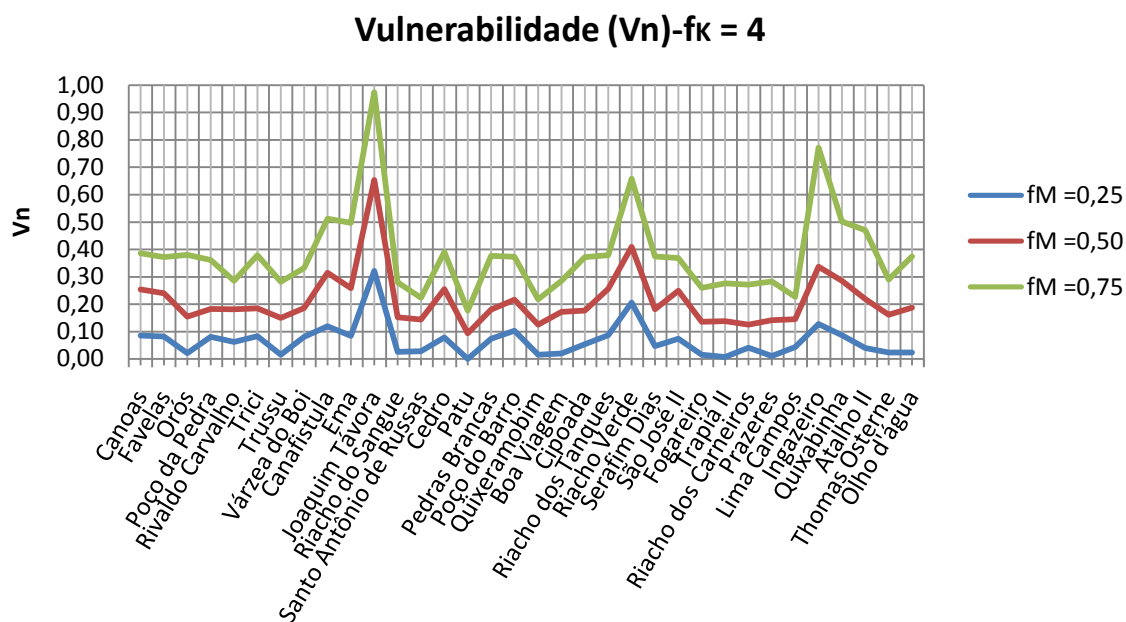


Figura 13 – Gráfico dos valores do indicador de vulnerabilidade (Vn) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) igual a 4.

Foi com o auxílio desses gráficos que se obteve o valor da constante de vulnerabilidade para a região da Bacia do Rio Jaguaribe ( $\phi$ ), que assumiu o valor de  $\phi = 15$ . É como afirmar que, no pior cenário simulado dentre todos os reservatórios da região, a pior seca ocorrida teve um déficit equivalente a uma seca com duração 15 anos totalmente secos. Este número, a primeira vista, pode parecer exagerado, e de certa forma o é, porém este valor tem mesmo que ser extremamente alto para que os valores do indicador jamais superem o limite pré-estabelecido de 1,00; ou 100%. É bom lembrar também que este valor foi obtido para uma simulação com horizonte de tempo de 5.000 anos e um cenário totalmente desfavorável, portanto a probabilidade de um evento desses acontecer é quase nula.

Analisando o comportamento da vulnerabilidade devido à variação do fator adimensional de retirada observa-se claramente pelos gráficos que as simulações que utilizaram  $f_M = 0,25$  obtiveram valores de vulnerabilidade mais baixos do que as que utilizaram  $f_M = 0,50$ ; que, por sua vez, obtiveram valores mais baixos do que as que utilizaram  $f_M = 0,75$ . Esta diferença entre os valores obtidos para os diferentes  $f_M$ 's é observado, sem exceção, em todos os cenários simulados. Isto pode ser explicado pelo fato de que a ocorrência de uma seca é determinada pelo nível de truncamento adotado, que neste caso é a vazão regularizada, portanto, durante um evento de seca, quanto mais elevada for a retirada que se deseja fazer, maior será o déficit provocado por ela. Diante de fatos tão contundentes, observa-se um forte indicio de que existe uma relação diretamente proporcional entre o indicador de vulnerabilidade

e o  $f_M$  utilizado, o que era esperado já que os indicadores de garantia e resiliência, que ao contrário da vulnerabilidade fazem uma análise “otimista” do fenômeno da seca, são inversamente proporcionais ao  $f_M$ .

Realizando a mesma análise com relação ao  $f_K$ , observa-se que a vulnerabilidade, assim como ocorreu com a resiliência, é pouco sensível a sua variação. É verdade que existe uma leve tendência da vulnerabilidade diminuir com o aumento do  $f_K$ , porém esta diferença, em média, não passou de 1% para as simulações feitas por um  $f_K$  qualquer para as realizadas com o  $f_K$  imediatamente superior. Esta indiferença do indicador de vulnerabilidade quanto ao  $f_K$  fica explícita nos gráficos da Figura 13, onde os três gráficos são muito semelhantes, com apenas algumas nuances diferentes. Isto indica que, mesmo que o número de falhas de regularização em reservatórios diminua com o aumento de sua capacidade, o déficit total máximo de uma seca ocorrida durante a simulação praticamente não será alterado.

A disposição mais detalhada dos resultados obtidos para o indicador de vulnerabilidade pode ser realizada com o auxílio da tabela de frequências da Tabela 46 e de sua representação gráfica no Histograma apresentado na Figura 14.

Tabela 45 – Tabela de frequências dos valores de vulnerabilidade dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Vulnerabilidade</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>acum</sub></b>	<b>f (%)</b>	<b>f<sub>acum</sub> (%)</b>
0,00 -  0,10	81	81	0,26	0,26
0,10 -  0,20	72	153	0,24	0,50
0,20 -  0,30	67	220	0,22	0,72
0,30 -  0,40	59	279	0,19	0,91
0,40 -  0,50	7	286	0,02	0,93
0,50 -  0,60	8	294	0,03	0,96
0,60 -  0,70	4	298	0,01	0,97
0,70 -  0,80	4	302	0,01	0,99
0,80 -  0,90	1	303	0,00	0,99
0,90 -  1,00	3	306	0,01	1,00
<b>Total</b>	<b>306</b>		<b>1,00</b>	

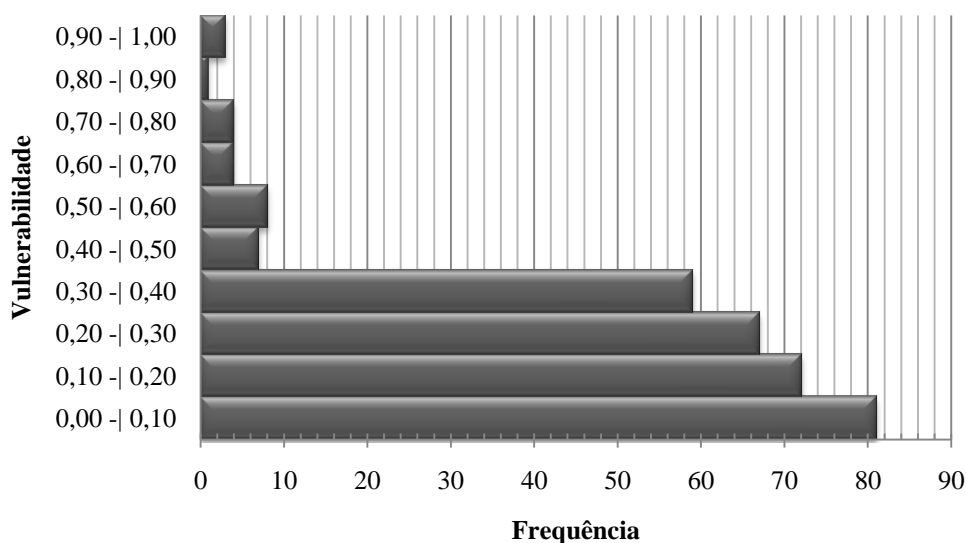


Figura 14 – Histograma dos valores de vulnerabilidade dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Observa-se que a grande maioria dos resultados está disposta na metade inferior do histograma, que representa os valores mais baixos obtidos para a vulnerabilidade. A tendência dos resultados assumirem valores baixos é nítida, com mais de 90% dos resultados inferiores à marca de  $V_n = 0,50$ ; que é o valor que divide o histograma em duas metades iguais. Apesar desse grande agrupamento de resultados na faixa inferior do histograma, é interessante perceber que ocorreram resultados dos dois extremos possíveis, de 0 a 100%.

A classificação dos resultados obtidos para a vulnerabilidade, assim como os outros indicadores, foi realizada seguindo técnica dos quartis. Dessa forma, teremos como limites para delimitar os cinco níveis de vulnerabilidade os valores apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 – Níveis de vulnerabilidade da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Limites</b>	<b>Nível de Vulnerabilidade</b>
$V_n \leq 7\%$	muito baixa
$7\% \leq V_n \leq 14\%$	baixa
$14\% \leq V_n \leq 28\%$	normal
$28\% \leq V_n \leq 37\%$	alta
$37\% \leq V_n$	muito alta

Os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, foram classificados com 15% dos reservatórios tidos com de vulnerabilidade muito baixa, 22% de vulnerabilidade baixa, 30% de vulnerabilidade normal, 18% de vulnerabilidade alta e 16% de vulnerabilidade muito alta. Pode-se notar uma pequena piora do quadro obtido para os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, que apresentaram, respectivamente, 34% e 66% de resultados insatisfatórios e satisfatórios, contra 35% e 65% dos cenários simulados com os  $f_K$ 's sintéticos. Como a

diferença entre os resultados não é muito significativa, pode-se admitir que as capacidades reais dos reservatórios estudados, em sua maioria, apresentam resultados medianos, na ótica do indicador de vulnerabilidade.

#### 4.2.4 Índice de Sustentabilidade

Como já foi dito anteriormente, o índice de sustentabilidade irá agregar os indicadores de garantia, resiliência e vulnerabilidade em um único valor, pelo qual poderemos classificar a sustentabilidade hidrológica dos reservatórios. Será a primeira vez que este índice será calculado, pois, apesar de sua formulação ser a mesma utilizada por Loucks (1997), a fórmula matemática da vulnerabilidade que compõe a equação foi modificada. Por isso, não existem ainda parâmetros de comparação.

Para realizar a análise de seu comportamento, os valores do índice de sustentabilidade obtidos para os 34 reservatórios abordados nesta pesquisa estão dispostos nos gráficos das Figuras 12 e 13.

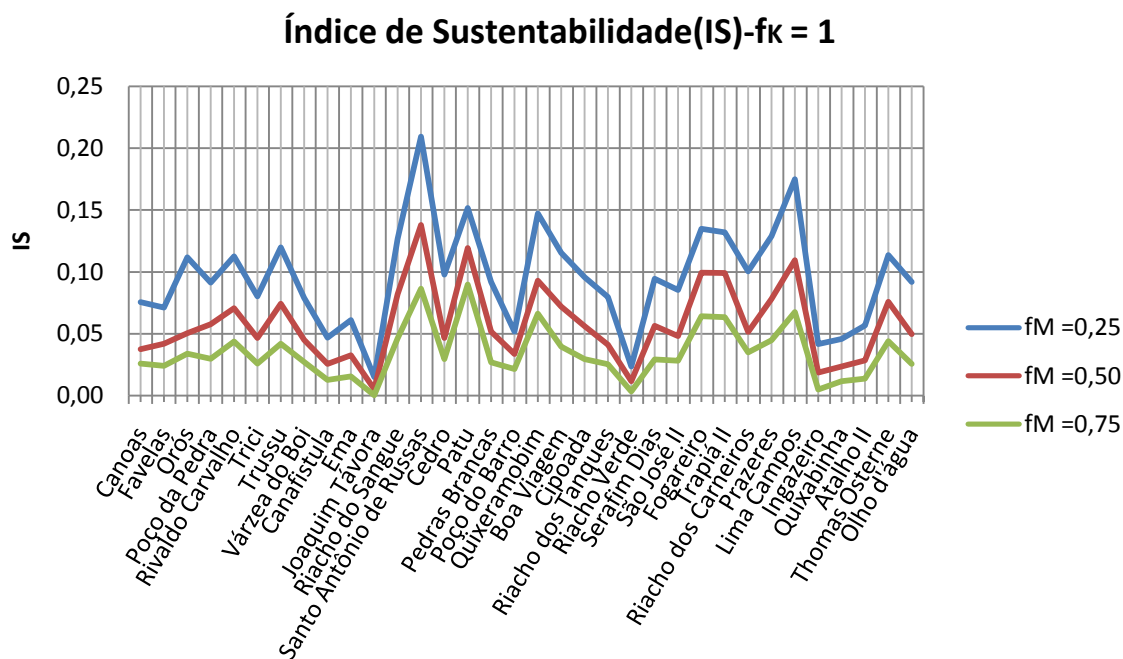


Figura 15 - Gráfico dos valores do índice de sustentabilidade (IS) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1.



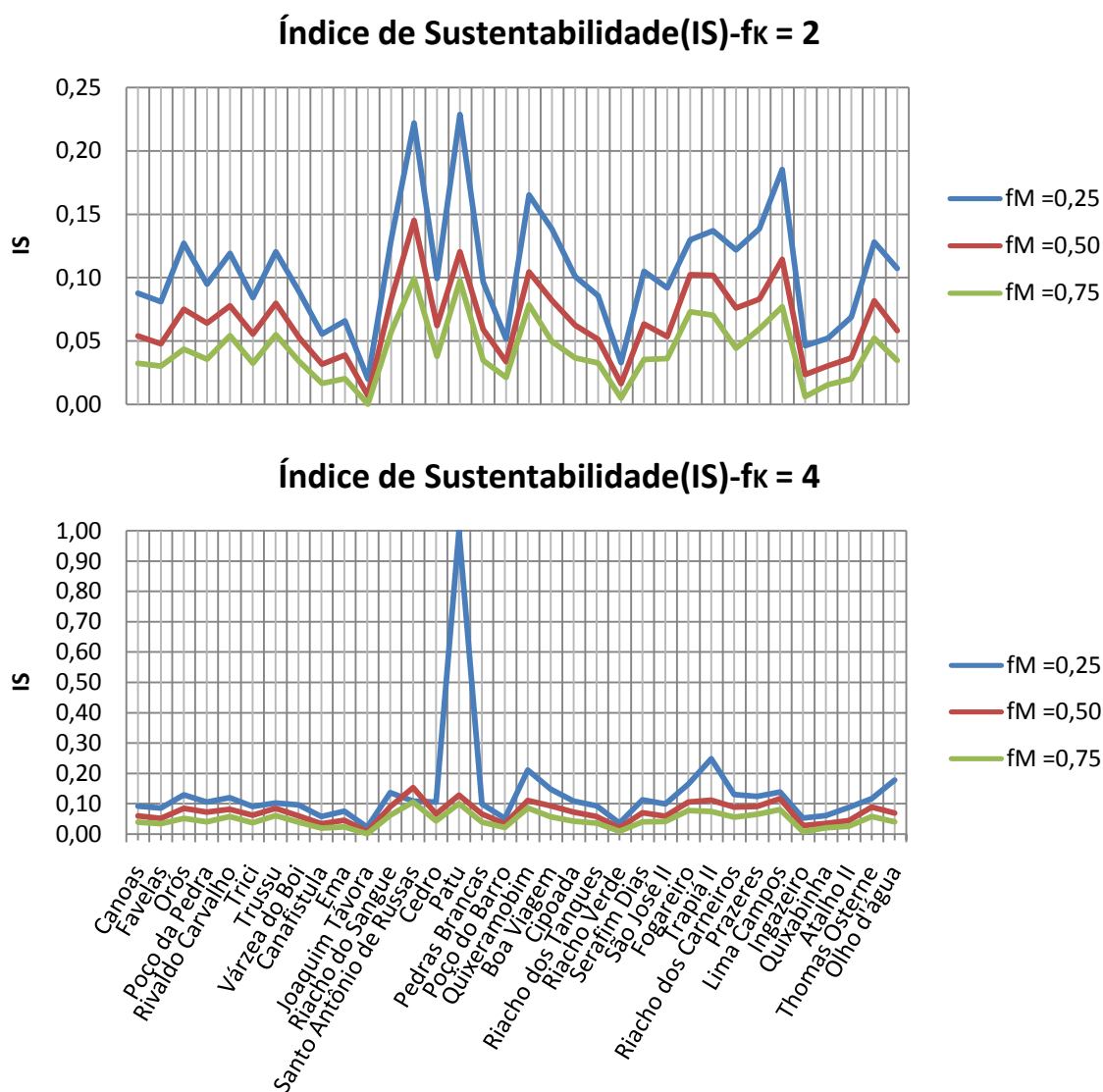


Figura 16 – Gráficos dos valores do índice de sustentabilidade (IS) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores dimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores dimensionais de capacidade ( $f_k$ ) iguais a 2 e 4.

O que se nota é que os valores do índice de sustentabilidade atingiram, em sua grande maioria, valores muito baixos. A média alcançada foi de apenas 7%, ainda menor do que a atingida pelo indicador de resiliência. Estes valores tão baixos podem ser explicados pelo fato de que este índice foi criado para descrever a sustentabilidade de reservatórios em regiões com regime de vazões bem menos variáveis, como a de climas temperados. Dessa forma, com a visão deste índice criado para regiões menos variáveis, os resultados aparentam que a grande maioria dos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe são pouco sustentáveis, porém estes valores podem representar uma alta sustentabilidade para a realidade desta local.

Por esse motivo, decidiu-se realizar uma pequena modificação no índice de

sustentabilidade proposto por Loucks(1997), criando um índice específico para a região da Bacia do Rio Jaguaribe, mantendo a mesma concepção, mas aumentando os seus valores.

#### 4.2.5 Índice de Sustentabilidade de Reservatórios do Semi-Árido

Este novo índice foi batizado com o nome de *índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido* (ISRSA), clima predominante na Bacia do Rio Jaguaribe, caracterizada pela concentração da pluviosidade em poucos meses, e pela elevada evaporação, e a grande dificuldade em refazer a sua formulação foi encontrar uma maneira de modificar a fórmula de Loucks (1997) sem modificar a sua essência. Para manter a mesma concepção do índice anterior, a fórmula deve continuar apresentando a multiplicação dos indicadores de garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade, sem atribuição de pesos diferentes para nenhum deles, pois, no entendimento deste trabalho, todos esses indicadores medem aspectos da sustentabilidade de igual importância para os reservatórios. Foi preciso, porém, encontrar uma maneira de aumentar os resultados do índice sem que eles extrapolassem os limites mínimo e máximo de 0 e 100%, respectivamente.

A maneira encontrada para atender todas as exigências atribuídas para o ISRSA foi aplicar a raiz cúbica à multiplicação da garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade, com mostra a Equação 28.

$$\text{ISRSA} = \sqrt[3]{G \times R \times (1 - Vn)} \quad (28)$$

onde:

ISRSA = índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido;

G = garantia do reservatório;

R = resiliência do reservatório;

Vn = vulnerabilidade do reservatório.

Os resultados obtidos para o ISRSA dos 34 reservatórios estudados, simulados pelos 12 cenários propostos por este trabalho, estão dispostos na Tabela 47. Para facilitar a visualização desses resultados, a Figura 17 mostra os gráficos dos valores obtidos para os  $f_k$ 's iguais a 1, 2 e 4.

Tabela 47 – Valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) reais e iguais a 1, 2 e 4.

Reservatório	$f_K = \text{Real}$			$f_K = 1$			$f_K = 2$			$f_K = 4$		
	$f_M = 0,25$	$f_M = 0,50$	$f_M = 0,75$	$f_M = 0,25$	$f_M = 0,50$	$f_M = 0,75$	$f_M = 0,25$	$f_M = 0,50$	$f_M = 0,75$	$f_M = 0,25$	$f_M = 0,50$	$f_M = 0,75$
Canoas	0,99	0,93	0,80	0,83	0,61	0,48	0,96	0,82	0,67	0,99	0,91	0,78
Favelas	0,82	0,62	0,49	0,82	0,63	0,50	0,90	0,74	0,61	0,94	0,81	0,68
Orós	0,99	0,89	0,74	0,87	0,65	0,48	0,99	0,87	0,72	1,00	0,96	0,85
Poço da Pedra	0,90	0,72	0,57	0,89	0,70	0,56	0,95	0,80	0,67	0,98	0,87	0,74
Rivaldo Carvalho	0,80	0,58	0,45	0,89	0,72	0,59	0,94	0,80	0,67	0,96	0,85	0,72
Trici	0,78	0,57	0,44	0,84	0,64	0,51	0,92	0,76	0,63	0,96	0,84	0,71
Trussu	1,00	0,96	0,86	0,95	0,77	0,62	0,99	0,91	0,77	1,00	0,97	0,87
Várzea do Boi	0,81	0,62	0,49	0,82	0,63	0,50	0,90	0,75	0,62	0,95	0,82	0,69
Canafistula	0,84	0,68	0,55	0,72	0,54	0,43	0,83	0,66	0,54	0,88	0,74	0,61
Ema	0,82	0,63	0,50	0,81	0,61	0,49	0,90	0,73	0,60	0,95	0,82	0,69
Joaquim Távora	0,67	0,50	0,39	0,54	0,38	0,30	0,68	0,51	0,41	0,78	0,62	0,50
Riacho do Sangue	0,94	0,75	0,60	0,96	0,80	0,65	0,99	0,91	0,78	1,00	0,96	0,86
Santo Antônio de Russas	0,90	0,67	0,51	0,99	0,88	0,72	1,00	0,94	0,82	1,00	0,97	0,86
Cedro	0,98	0,89	0,76	0,83	0,64	0,51	0,94	0,80	0,65	0,97	0,87	0,74
Patu	0,99	0,88	0,73	0,99	0,89	0,75	1,00	0,96	0,85	1,00	0,99	0,91
Pedras Brancas	0,97	0,85	0,71	0,89	0,68	0,54	0,96	0,81	0,67	0,98	0,88	0,75
Poço do Barro	0,50	0,44	0,40	0,50	0,44	0,40	0,50	0,44	0,40	0,50	0,44	0,40
Quixeramobim	0,88	0,67	0,52	0,98	0,83	0,68	1,00	0,92	0,79	1,00	0,97	0,87
Boa Viagem	0,98	0,86	0,71	0,94	0,75	0,61	0,99	0,88	0,74	1,00	0,95	0,83
Cipoadá	0,79	0,58	0,44	0,90	0,70	0,56	0,97	0,83	0,68	0,99	0,91	0,78
Riacho dos Tanques	0,92	0,79	0,66	0,76	0,60	0,48	0,87	0,72	0,59	0,92	0,78	0,66
Riacho Verde	0,84	0,71	0,59	0,53	0,40	0,30	0,70	0,54	0,43	0,80	0,65	0,54
Serafim Dias	0,78	0,55	0,41	0,92	0,72	0,57	0,97	0,84	0,69	0,99	0,91	0,78
São José II	0,96	0,82	0,69	0,88	0,68	0,55	0,96	0,81	0,68	0,98	0,89	0,77
Fogareiro	0,90	0,69	0,54	0,98	0,84	0,69	1,00	0,93	0,80	1,00	0,97	0,87
Trapiá II	0,99	0,89	0,74	0,98	0,86	0,71	1,00	0,94	0,82	1,00	0,98	0,89
Riacho dos Carneiros	1,00	0,96	0,85	0,80	0,63	0,49	0,96	0,83	0,68	0,99	0,92	0,79
Prazeres	1,00	0,99	0,90	0,96	0,79	0,63	1,00	0,92	0,79	1,00	0,98	0,88
Lima Campos	1,00	0,93	0,80	0,97	0,84	0,69	0,99	0,91	0,78	1,00	0,95	0,82
Ingazeiro	0,75	0,51	0,39	0,81	0,57	0,43	0,92	0,71	0,55	0,97	0,83	0,68
Quixabinha	0,97	0,87	0,75	0,75	0,55	0,43	0,86	0,69	0,55	0,93	0,80	0,66
Atalho II	0,88	0,65	0,49	0,86	0,62	0,47	0,96	0,78	0,62	0,99	0,90	0,75
Thomas Osterne	1,00	0,95	0,84	0,96	0,79	0,64	0,99	0,90	0,76	1,00	0,95	0,83
Olho d'água	0,98	0,89	0,76	0,83	0,64	0,51	0,94	0,80	0,65	0,97	0,87	0,74

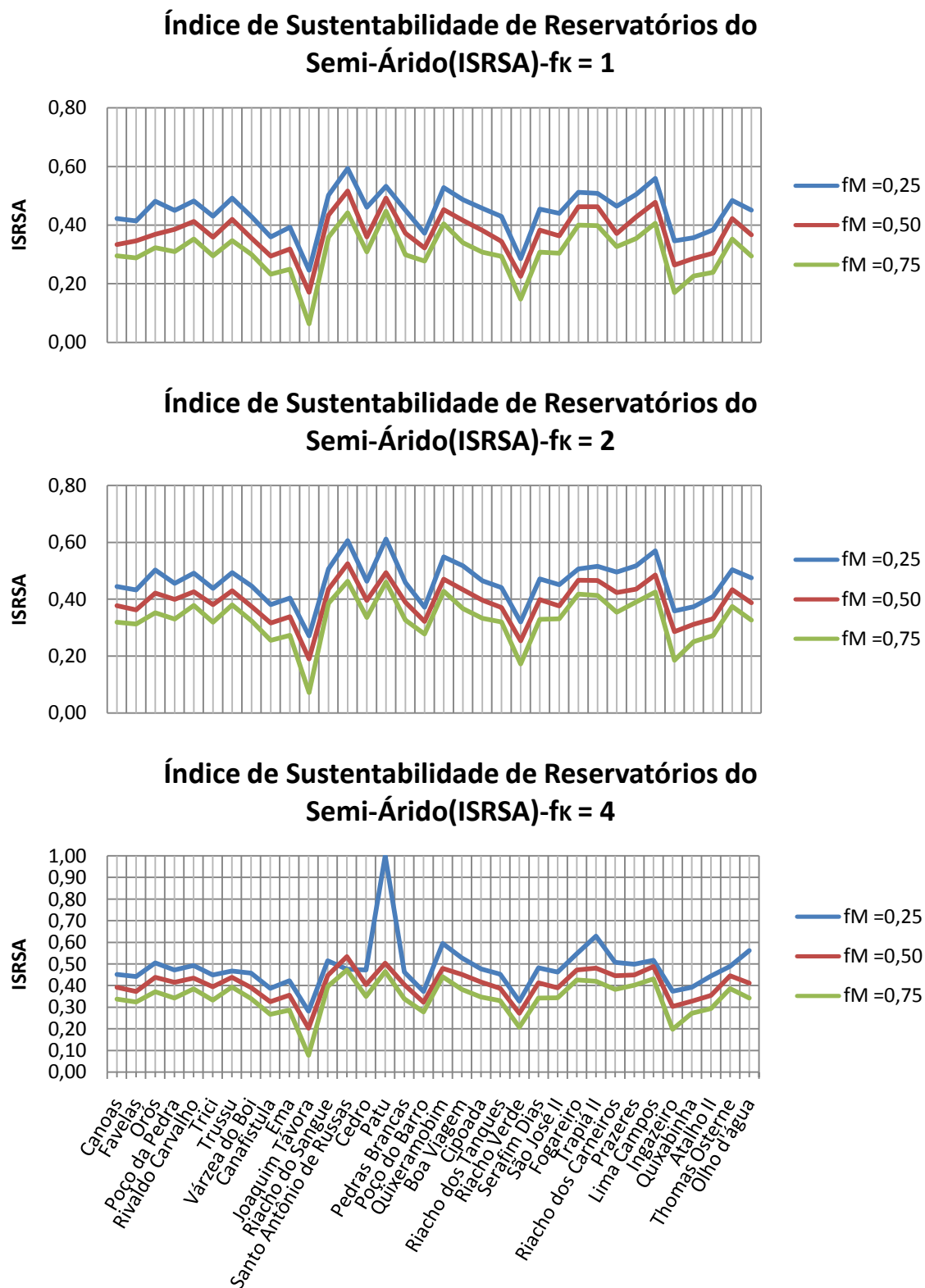


Figura 17 – Gráficos dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe simulados com os fatores adimensionais de retirada ( $f_M$ ) de 0,25; 0,50 e 0,75, utilizando os fatores adimensionais de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 1, 2 e 4.

Ao analisar o comportamento do ISRSA devido à variação do fator adimensional de retirada observar-se claramente pelos gráficos que as simulações que utilizaram  $f_M = 0,25$  obtiveram valores de sustentabilidade mais elevados do que as que utilizaram  $f_M = 0,50$ ; que, por sua vez, obtiveram valores mais elevados do que as que utilizaram  $f_M = 0,75$ . Esta diferença entre os valores obtidos para os diferentes  $f_M$ 's é observada, em praticamente todos os cenários simulados, ocorrendo apenas uma exceção para a simulação do Açude Santo Antônio de Russas com o  $f_K = 4$ , onde o valor obtido para o  $f_M = 0,25$  foi menor do que o obtido para o  $f_M = 0,50$ . Este comportamento já era esperado, pois tinha sido observado nos indicadores de garantia e resiliência, assim como pelo complemento da vulnerabilidade, que compõe o ISRSA. Dessa forma, os resultados apresentam um forte indicio da existência de uma relação inversamente proporcional entre o ISRSA e o  $f_M$  utilizado.

Fazendo a mesma análise com relação ao  $f_K$ , observa-se que a sustentabilidade apresenta uma leve tendência de aumentar com o aumento do  $f_K$ . Esta diferença foi muito pequena, com os resultados obtidos a partir do  $f_K = 1$  obtendo uma média de 38%, os resultados obtidos a partir do  $f_K = 2$  obtendo uma média de 40% e os resultados obtidos a partir do  $f_K = 4$  obtendo uma média de 41%. Esta diferença, apesar de ser pequena, foi observada em praticamente todos os cenários, e quando não ocorria, os resultados obtidos para  $f_K$ 's mais baixos conseguiram no máximo se igualar aos obtidos pelo  $f_K$  imediatamente superior.

A disposição mais detalhada dos resultados obtidos para o ISRSA pode ser realizada com o auxílio da tabela de frequências da Tabela 48 e de sua representação gráfica no Histograma apresentado na Figura 18.

Tabela 48 – Tabela de frequências dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

ISRSA	F	F <sub>acum</sub>	f (%)	f <sub>acum</sub> (%)
0,00 -  0,10	3	3	0,01	0,01
0,10 -  0,20	7	10	0,02	0,03
0,20 -  0,30	34	44	0,11	0,14
0,30 -  0,40	115	159	0,38	0,52
0,40 -  0,50	114	273	0,37	0,89
0,50 -  0,60	29	302	0,09	0,99
0,60 -  0,70	3	305	0,01	1,00
0,70 -  0,80	0	305	0,00	1,00
0,80 -  0,90	0	305	0,00	1,00
0,90 -  1,00	1	306	0,00	1,00
<b>Total</b>	<b>306</b>		<b>1,00</b>	

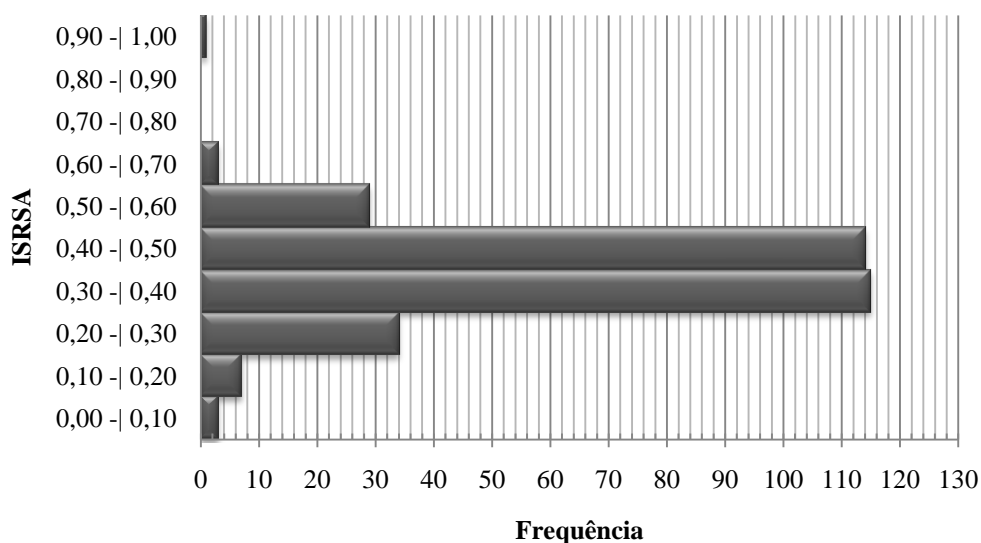


Figura 18 – Histograma dos valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

Uma observação importantíssima que deve ser feita é que o objetivo de se conseguir resultados com valores mais elevados para o ISRSA foi alcançado. A média que, pelo índice de Loucks (1997), era de apenas 7% saltou para uma média de 39%, com o novo índice. Todos os resultados se encontraram dentro do intervalo de 0 e 100%, isso porque sempre que a raiz cúbica for aplicada a um número positivo menor ou igual a 1, como é o caso dos valores obtidos para o índice de sustentabilidade, o resultado dessa operação também será um valor positivo menor ou igual a 1.

Observa-se também que grande parte dos resultados está disposta na região central do histograma, indicando uma tendência dos valores de sustentabilidade se aproximarem da média dos resultados. Este comportamento fica nítido quando observamos que 75% dos resultados estão contidos em apenas duas classes centrais do histograma.

A classificação dos resultados obtidos para o ISRSA também foi realizada seguindo técnica dos quartis. Dessa forma, teremos como limites para delimitar os cinco níveis de sustentabilidade os valores apresentados na Tabela 46.

Tabela 49 – Níveis de sustentabilidade da Bacia do Rio Jaguaribe.

<b>Limites</b>	<b>Nível de Sustentabilidade</b>
$ISRSA \leq 30\%$	muito baixa
$30\% \leq ISRSA \leq 36\%$	baixa
$36\% \leq ISRSA \leq 43\%$	normal
$43\% \leq ISRSA \leq 48\%$	alta
$48\% \leq ISRSA$	muito alta

Os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, foram classificados com 18% dos reservatórios tidos com de sustentabilidade muito baixa, 21% de sustentabilidade baixa, 30% de sustentabilidade normal, 16% de sustentabilidade alta e 16% de sustentabilidade muito alta. Pode-se notar uma piora do quadro obtido para os cenários simulados com os  $f_K$ 's reais, que apresentaram, respectivamente, 38% e 62% de resultados insatisfatórios e satisfatórios, contra 35% e 65% dos cenários simulados com os  $f_K$ 's sintéticos. Este quadro mostra um forte indício de que os reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe apresentam baixa sustentabilidade hidrológica.

#### **4.3 Análise Comparativa Entre os Indicadores de Sustentabilidade e o Índice de Sustentabilidade de Reservatórios do Semi-Árido**

Mesmo que na fórmula do ISRSA os indicadores de garantia, resiliência e vulnerabilidade tenham o mesmo peso, isso não implica que um desses indicadores não tenha um comportamento mais semelhante ao do ISRSA que os demais. Fazendo uma análise comparativa entre o ISRSA e os indicadores de sustentabilidade, pode-se ver se algum desses indicadores tem algum comportamento que destoe muito dos demais, ou que esteja influenciando mais no ISRSA do que outro.

Foi realizada uma comparação puramente visual, pois a intenção desta análise não é a obtenção de equações de correlação entre os indicadores e o ISRSA, ou de qualquer outro resultado mais detalhado, mas sim visualizar como o ISRSA se porta diante da variação dos indicadores que o compõe. Para realizar esta comparação, utilizaremos somente os resultados relativos ao  $f_K = 2$  e ao  $f_M = 0,50$ ; pois os gráficos de outros cenários não apresentaram características muito diferentes das obtidas para esse, não havendo a necessidade de se colocar uma quantidade exagerada de gráficos neste trabalho. Além disso, a utilização do ao  $f_K = 2$  do  $f_M = 0,50$  é muito comum na região estudada. Os gráficos comparativos relativos aos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe estão apresentados nas Figuras 19 e 20.

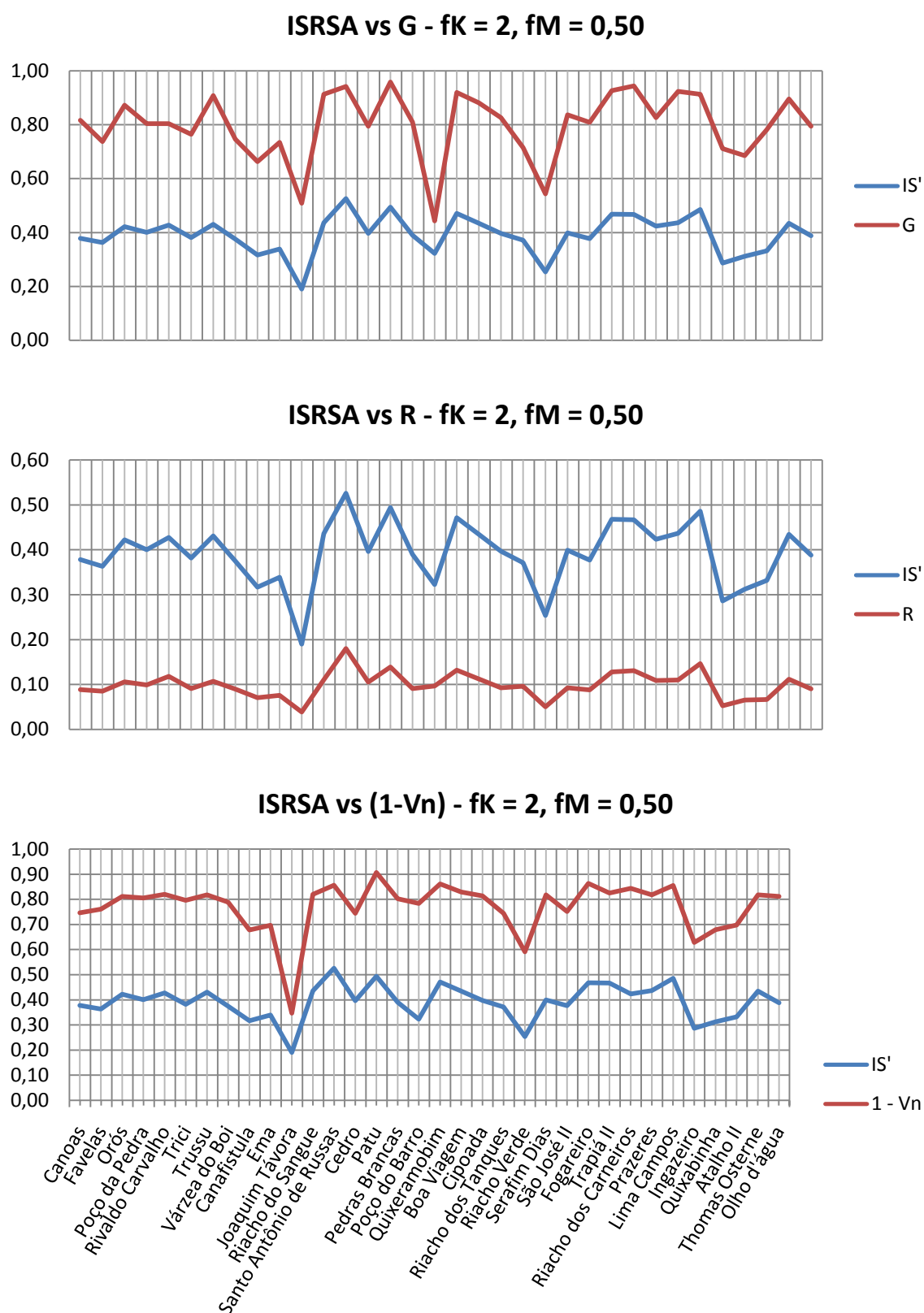


Figura 19 - Gráficos comparativos entre os valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe e os valores dos indicadores de garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade simulados com o fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) igual a 0,50 e o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 2.



### ISRSA vs G, R, (1-Vn) - $f_K = 2$ , $f_M = 0,50$

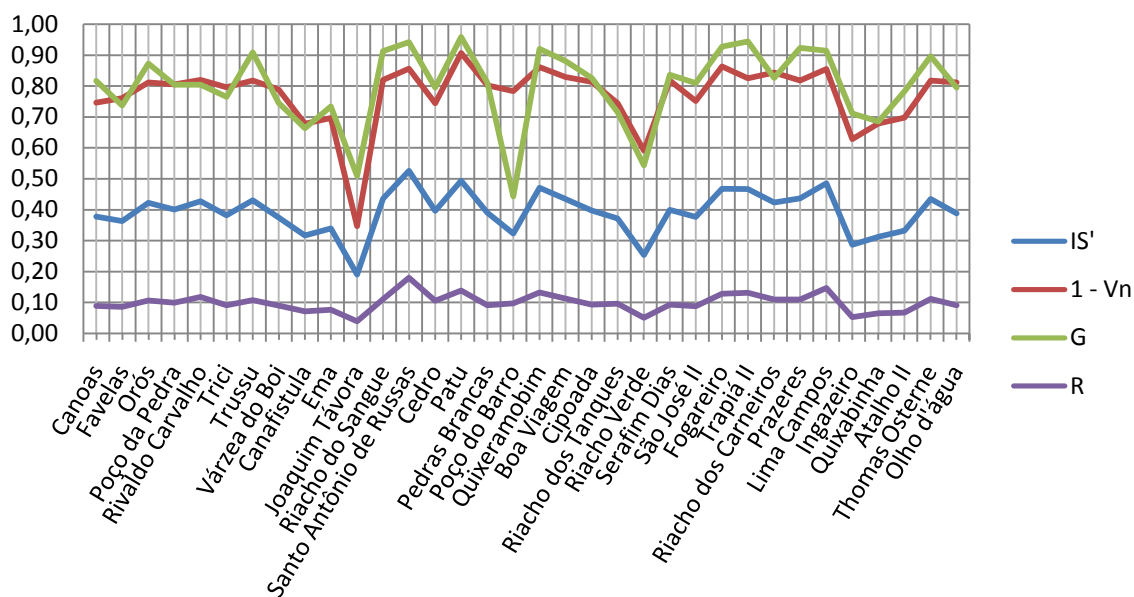


Figura 20 - Gráfico comparativo entre os valores do índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido (ISRSA) dos 34 reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe e os valores dos indicadores de garantia, resiliência e do complemento da vulnerabilidade simulados com o fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) igual a 0,50 e o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ) iguais a 2.

A primeira observação que deve ser feita é que no gráfico que compara o ISRSA com a  $V_n$ , foi utilizado, na verdade, o complemento da vulnerabilidade ( $V_n - 1$ ), pois é dessa maneira que o indicador é inserido na equação do ISRSA. Feita esta observação, logo no primeiro gráfico, nota-se que há uma forte correlação entre os resultados obtidos entre ISRSA e G. Esta correlação não está caracterizada pela equiparação de suas médias ou de qualquer outro parâmetro estatístico, mas sim no fato de que, em praticamente todos reservatórios, toda mudança de direção, tanto para baixo ou para cima, apresentada pela linha que representa a garantia, foi observada uma mudança de direção do mesmo tipo para o ISRSA. Isto demonstra que os valores mais elevados de sustentabilidade estão normalmente relacionados a valores elevados de garantia.

Esta correlação com o ISRSA não foi uma exclusividade do indicador de garantia, mas também pôde ser observada para a resiliência e para o complemento da vulnerabilidade. O complemento da vulnerabilidade, aparentemente, obteve uma correlação mais forte com o índice de sustentabilidade do Jaguaribe, enquanto que a correlação entre o índice e a resiliência aparentou ser a mais fraca.

Como esta correlação foi observada comparando-se todos os indicadores, separadamente, com o ISRSA, significa também, que existe uma correlação forte também entre

os indicadores, como pode ser observado no gráfico da Figura 20. Este é um indício muito positivo, pois apesar de medirem aspectos diferentes, todos os indicadores e o índice utilizados neste trabalho estudam o mesmo fenômeno, a seca hidrológica, e por isso, os seus comportamentos não devem divergir muito um do outro.

## 5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para se calcular a sustentabilidade hidrológica de reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe. Utilizou-se como estudo de caso 34 reservatórios diferentes pertencentes à Bacia do Rio Jaguaribe, localizada no Ceará, que apresentam características peculiares, comuns ao semi-árido brasileiro onde está inserida. A sustentabilidade hidrológica é calculada através análises quantitativas e qualitativas das secas hidrológicas decorridas de falhas na regularização dos reservatórios. Como as séries de vazões históricas existentes geralmente são muito pequenas e precárias para uma análise mais detalhada de eventos extremos como a seca foram utilizadas séries estocásticas simuladas a partir de dados das séries históricas originais do reservatório. Para a obtenção destas séries estocásticas foi utilizado um programa computacional para simulação dos reservatórios, que na sua raiz utiliza a equação do balanço hídrico. Para ser empregado não necessita apenas dos dados de vazões para, mas também de séries de precipitação, evaporação e das curvas cota-volume.

Os reservatórios foram simulados para 12 cenários diferentes, variando-se as suas capacidades e retiradas, de modo que fossem obtidos  $f_K$ 's iguais a 1, 2 e 4, além do  $f_K$  relativo a capacidade real do próprio reservatório, assim como  $f_M$ 's iguais a 0,25; 0,50 e 0,75. De posse das séries sintéticas de vazões regularizadas, calcularam-se os três indicadores de sustentabilidade denominados garantia, resiliência e vulnerabilidade, e o índice de sustentabilidade, fundamentados na Teoria dos Runs. As principais conclusões desta pesquisa são as que se seguem:

1. Neste trabalho utilizou-se a fórmula mais tradicional de se calcular a garantia, que é o indicador de sustentabilidade mais utilizado no estudo hidrológico de reservatórios, e seus resultados apresentaram o comportamento esperado para a Bacia do Rio Jaguaribe. Este indicador apresenta uma relação inversamente proporcional com  $f_M$  e uma relação diretamente proporcional com o  $f_K$ . A garantia também apresentou uma leve tendência dos resultados obterem valores próximos da média, o que não impede a ocorrência considerável de valores extremos, com maior incidência dos valores mais elevados. O valor médio obtido para todas as simulações, excluindo os cenários que utilizaram os  $f_K$ 's reais, foi de  $G = 78\%$  e, de acordo com o critério de classificação adotado, a situação real dos reservatórios Bacia do Rio Jaguaribe apresenta um desempenho fraco, analisando-se somente este indicador.

2. Neste trabalho utilizou-se uma fórmula tradicional de se calcular a resiliência, sugerida por Hashimoto et al. (1982), que, no entanto, não é frequentemente utilizada como parâmetro para se medir a sustentabilidade de reservatórios, especialmente no Brasil. Este indicador apresenta uma relação inversamente proporcional com  $f_M$  e uma relação muito discreta com o  $f_K$ , demonstrando que a resiliência é pouco suscetível a variação da capacidade. A resiliência ainda apresentou uma tendência dos resultados assumirem valores muito baixos. O valor médio obtidos para todas as simulações, excluindo os cenários que utilizaram os  $f_K$ 's reais, foi de  $R = 10\%$  e, de acordo com o critério de classificação adotado, a situação real dos reservatórios Bacia do Rio Jaguaribe apresenta um desempenho mediano, analisando-se somente este indicador.
3. O indicador de vulnerabilidade é certamente o mais complexo dos escolhidos para compor este trabalho, tanto que se utilizou uma fórmula matemática modificada para calculá-la, pois entre os autores pesquisados não havia um consenso para a sua melhor formulação. A formulação adotada utiliza a constante  $\phi$ , denominada de constante de vulnerabilidade para a região da Bacia do Rio Jaguaribe, que assumiu um valor igual a 15 para a região. Este indicador apresenta uma relação diretamente proporcional com  $f_M$  e uma relação muito discreta com o  $f_K$ , demonstrando que este conceito de vulnerabilidade, para este estudo de caso, é pouco suscetível a variação da capacidade. A vulnerabilidade ainda apresentou uma tendência dos resultados assumirem valores baixos. O valor médio obtidos para todas as simulações, excluindo os cenários que utilizaram os  $f_K$ 's reais, foi de  $V_n = 23\%$  e, de acordo com o critério de classificação adotado, a situação real dos reservatórios Bacia do Rio Jaguaribe apresenta um desempenho mediano, analisando-se somente este indicador.
4. Para o índice de sustentabilidade foi utilizada a formulação proposta por Loucks (1997), que tem como função agregar os indicadores de garantia, resiliência e vulnerabilidade em um único valor, pelo qual será mediada a sustentabilidade hídrica do reservatório. Porém, os resultados do índice de sustentabilidade atingiram, em sua grande maioria, valores muito baixos, aparentando que a grande maioria dos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe são pouco sustentáveis. Decidiu-se então, realizar uma pequena modificação no índice de sustentabilidade, criando um índice específico para a região da Bacia do Rio Jaguaribe, mantendo a mesma concepção, mas aumentando os seus valores.
5. O novo índice recebeu o nome de *índice de sustentabilidade de reservatórios do semi-árido*, que nada mais é do que a raiz cúbica do índice de sustentabilidade de Loucks (1997). No entanto, esta pequena modificação proporcionou um aumento substancial dos resultados obtidos, sem deixar de atender todas as características exigidas para o índice.

Este índice apresenta uma relação inversamente proporcional com  $f_M$  e uma relação muito discreta com o  $f_K$ , demonstrando que a sustentabilidade é pouco suscetível a variação da capacidade. A sustentabilidade também apresentou uma tendência dos seus resultados assumirem valores próximos da média. O valor médio obtidos para todas as simulações, excluindo os cenários que utilizaram os  $f_K$ 's reais, foi de  $ISRSA = 39\%$  e, de acordo com o critério de classificação adotado, a situação real dos reservatórios Bacia do Rio Jaguaribe apresenta uma sustentabilidade hidrológica baixa.

6. Através de uma rápida comparação entre o comportamento dos indicadores de sustentabilidade e do  $ISRSA$ , observa-se que todos os indicadores, separadamente, apresentaram uma forte correlação com o  $ISRSA$ , assim como entre os próprios indicadores. Este é um indício muito positivo, pois apesar de medirem aspectos diferentes, todos os indicadores e o índice utilizados neste trabalho estudam o mesmo fenômeno, a seca hidrológica, e por isso, os seus comportamentos não devem divergir muito um do outro.

Conclui-se que os objetivos traçados para este trabalho foram completamente alcançados, pois, o conjunto de medidas formado pelos indicadores de garantia, resiliência, vulnerabilidade e o  $ISRSA$ , proposto neste trabalho, obteve resultados consistentes que atendessem os critérios pré-estabelecidos. Segundo este conjunto de medidas, os reservatórios estudados obtiveram uma classificação preocupante, sendo classificados, de forma generalizada, como de baixa sustentabilidade hidrológica.

Outra observação importante é que apesar do  $ISRSA$  ter sido utilizado neste trabalho para estudar especificamente a Bacia do Rio Jaguaribe ele também é válido para toda a região do semi-árido brasileiro, que compartilha das mesmas características principais que são a alta taxa de evaporação e a alta variabilidade pluviométrica.

Esta classificação dos reservatórios, porém, tem que ser recebida com muita cautela, pois conjunto de medidas sugerido analisa o reservatório por apenas uma ótica, a da seca hidrológica, e diversos outros fatores relevantes, como os econômicos, ambientais e sociais, não foram mensurados. Assim, como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a busca de indicadores e índices de sustentabilidade que consigam agregar tanto aspectos hidrológicos quanto outros aspectos relevantes, com a finalidade de facilitar ainda mais o gerenciamento dos reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, W. M. **Green Development: Environment and Sustainability in the Third World**. 2.ed. New York: Routledge, 2001. 445p.

ALVES, J. M. B.; XAVIER, T. M. B. S.; FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. Verificação de prognósticos sazonais de precipitação no Estado do Ceará utilizando a técnica dos Quantis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 15, n. 2, p. 75-85. 200.

AMERICAN SOCIETY OF ENGINEERS (ASCE). **Sustainability Criteria for Water Resource Systems**. Virginia: ASCE Publications, 1998. 253p.

BOGARDI J. J.; KUNDZEWICZ Z. W. **Risk, Reliability, Uncertainty, and Robustness of Water Resource Systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 220 p.

BONACCI, O. Hydrological identification of drought. **Hydrological Processes**, vol. 7, n. 3, p. 249-262. 1993.

BERAN, M.; RODIER, J. A. **Hydrological aspects of drought**, Studies and reports in hydrology, n. 39. UNESCO-WMO, Paris. p. 149. 1985.

CAMPOS J. N. B. **A procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers under Evaporation Rate**. Tese de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1987.

CAMPOS, J. N. B. **Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização**. 1 ed. Fortaleza: Edições UFC, 1996. 51p.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Secas no Nordeste Brasil: Origens, Causas e Soluções. In: **Dialógo Interamericano de Gerenciamento de Águas**, 4., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, 2001.

CARVALHO, J. O.; SANTOS, J. A. **Oficina do Semi-Árido: Contribuição da “Nova Sudene” para o Desenvolvimento da Região Semi-Árida do Nordeste**. Recife: SUDENE, 2003. (Relatório Final)

CEARÁ. **Plano de Gerenciamento de Bacia do Rio Jaguaribe**. Fortaleza: COGERH/ENGESOFT Consultoria, 1999. 17 volumes.

CHANG, T. J.; STENSON, J. R. Is it realistic to Define a 100-year Drought for Water Management? **Journal of the American Water Resources Association**, vol. 26, n. 5, p. 823–829, out.1990.

CLAUSEN, B.; PEARSON, C. P. Regional Frequency Analysis of annual maximum streamflow drought. **Journal of Hydrology**, vol. 173, n. 1-4, p. 111–130, dez. 1995.

DRACUP, J. A.; LEE, K. S.; PAULSON, G. On the definitions of droughts. **Water Resources Research**, Washington, vol.16, n.2, p. 297-302. 1980.

FLEIG, A. K.; TALLAKSEN, L. M.; HISDAL, H.; DEMUTH, S. A global evaluation of streamflow drought characteristics. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 10, p. 535–552, jul. 2006.

GALLOPIN, G.C. Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A system approach. **Environmental Modeling & Assessment**, vol. 1, p. 101–117, dez. 1996.

GANOULIS, J. G. **Engineering Risk Analysis of Water Pollution**. Weinheim: VCH Publishers Inc., 1994. 306 p.

GRIFFITH, G. A. Rainfall deficits: distribution of monthly runs. **Journal of Hydrology**, vol. 115, n. 1-4, p. 219-229, jul. 1990.

HAMMOND, A.; ADRIAANSE, A.; RODENBURG, E.; BRYANT, D.; WOODWARD, R. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington, D.C.: World Resources Institut, 1995. 302p.

HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.; LOUCKS, D. P. Reliability, Resilience and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. **Water Resources Research**, Washington, vol.18, n.1, p. 14-26. 1982.

HAZEN, A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. **Transactions American Society of Civil Engineers**, vol. 77, p. 1539-1640. 1914.

HEIM, R. R. J. A review of twentieth - century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 83, n.8, p.1149-1163. 2002.

HUDSON, H. E.; HAZEN, R. **Droughts and low stream flows**. V. T. Chow (ed): Handbook of Applied Hydrology, cap. 18, McGraw-Hill, New York, 1964.

IUCN; UNEP; WWF. **The World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development**. International Union for Conservation of Nature (IUCN), United Nations Environment Programme (UNEP) and World Wide Fund for Nature (WWF). Gland: IUCN, 1980. 70p.

KHANNA, N. Measuring environmental quality: an index of pollution. **Ecological Economics**, vol. 35, n. 2, p. 191-202, nov. 2000.

KUCHARSKI F.; POLZIN D.; HASTENRATH S. Teleconnection Mechanisms of Northeast Brazil Droughts: Modeling and Empirical Evidence. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol.23, n. 2, p. 115-125, jun. 2008.

LÉLÉ, S. M. 1991. Sustainable Development: A Critical Review. *World Development*, Berkeley, v. 19, n. 6, p. 607-621, jun. 1991.

LOUCKS, D.P. Quantifying trends in system sustainability. **Hydrological Sciences Journal**, vol. 42, n. 4, p. 513-530. 1997.

MATALAS, N.C.; FIERING, M.B. **Water-Resources Systems Planning, Climate, Climatic Change and Water Supply**. Washington: National Academy of Sciences, p. 99-100. 1977.

MCMAHON, T. A.; ADELOYE, A. J.; ZHOU, S. L. Understanding performance measures of reservoirs. **Journal of Hydrology**, vol. 324, p. 359-382. 2006.

MCQUEEN, D.; NOAK, H. Health Promotion Indicators: Current Status, issues and problems. **Health Promotion. An International Journal**, vol. 3, n, 1, p. 117-125, 1988.

MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. **Sustainable Development**, vol. 4, n. 1, p. 1-11. 1996.

MOLLE, F. **Marcos Históricos e Reflexões sobre a Açudagem e seu Aproveitamento**. Recife. SUDENE. 1994. 194 p. (Série hidrologia, 30).

MOYÉ L. A.; KAPADIA A. S. Predictions of drought length extreme order statistics using run theory. **Journal of Hydrology**, vol. 169, n. 1-4, p. 95-110, jul. 1995.



PAIXÃO, M. P. **Aplicação de indicadores de performance na avaliação de sistemas hídricos**: Um estudo de caso. 2003. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

PETERS, E.; LANEN, H. A. J.; TORFS, P. J. J. F.; BIER, G. Drought in groundwater-drought distribution and performance indicators. **Journal of Hydrology**, vol. 306, p. 302-317. 2005.

PIECHOTA T.; TIMILSENA J; TOOTLE G.; HIDALGO H. The Western U.S. Drought:How Bad Is It? **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, vol. 85, n. 32, p. 301-308, ago. 2004.

SERAGELDIN I. ; STEER A. D. **Making Development Sustainable**: From Concepts to Action. Washington: World Bank Publications, 1994. 40 p.

SHIELDS, D.; SOLAR, S.; MARTIN, W. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. **Ecological Indicator**, vol. 2, n. 1-2, p. 149-160, nov. 2002.

SILVEIRA, G. L., TUCCI, C. E. M., SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, vol.3, n.3, p.111-131, jul/set. 1998.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMERO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & sociedade**, Campinas, vol.10, n. 2, p. 137-148, jul/dez. 2007.

SVANIDZE, G. G. **Mathematical Modeling of Hydrologic Series**: For Hydroelectric and Water Resources Computations. Fort Collins: Water Resources Publications, 1980. 314p.

TALLAKSEN, L. M. **Streamflow drought frequency analysis**. In: Drought and Drought Mitigation in Europe (ed. por Vogt, J.V. e Somma, F.). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 103-117. 2000.

TATE, E. L.; FREEMAN, S. N. Three Modeling Approaches for Seasonal Streamflow Droughts in Southern Africa: the use of censored data. **Hydrological Sciences Journal**, vol. 45, n. 1, p. 27-42. 2000.

THOMAS L. T.; CHARLES A. T. Viewpoint: the role of drought in range management. **Journal of Range Management**, vol. 52, n.5, p. 413-419, set. 1999.

TUNSTALL, D. **Developing Environmental Indicators**: Definitions, framework and issues. (Draft paper). Background Materials for the World Resources Institute. Workshop on Global Environmental Indicators, Washington, D.C., p. 7-8, dez. 1992.

VOGEL, R. M.; BOLOGNESE, R. A. Storage-reliability-resiliency-yield relations for over-year water supply system. **Water Resources Research**, vol. 31, n. 3, p. 645-654. 1995.

Wall, R.; Ostertag, K.; Block, N. **Synopsis of selected indicator systems for sustainable development**. Relatório para o projeto investigativo, 'Further development of indicator systems for reporting on the environment' of the Federal Ministry of the Environment. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Karlsruhe. 1995.

WCED. **Our Common Future**. World Commission on Environmental and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987. 400p.

YEVJEVICH, V. **An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts**. Hydrology Papers 23, Fort Collins, Colorado State University, 1967. 18 p.

YEVJEVICH, V. **Methods for determining statistical properties of droughts**. In: Coping with droughts( ed. por Yevjevich, V.; Cunha, L. e Vlachos, E.). Colorado: Water Resources Publications, p. 22-43. 1983.

ZAIDMAN, M. D.; REES, H. G.; YOUNG A. R. Spatio-temporal development of streamflow droughts in northwest Europe. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 5, p. 733-751. 2001.

ZELENHASIC, E, SALVAI, A. A Method of Streamflow Droughts Analysis. **Water Resources Research**, Washington, vol.23, n.1, p. 156-168. 1987.

ZONGXUE, X.; JINNO, K.; KAWAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Performance Risk Analysis for Fukuoka Water Supply System. **Water Resources Management**, vol. 12, n. 13, p. 13-30. 1998.



Açude Orós		Açude Canafístula		Açude Santo Antônio de Russas	
cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
162,00	0,00	95,00	1,51	7,00	5,79
165,00	3,41	96,00	2514,00	8,00	10,49
170,00	22,55	97,00	3881,00	9,00	15,40
175,00	77,22	98,00	5638,00	10,00	21,77
180,00	173,85	99,00	7738,00	11,00	29,72
185,00	351,34	100,00	10,20	15,00	82,32
186,00	413,12	101,00	13,12	18,00	150,00
190,00	660,22	105,00	33075,00	22,00	280,00
195,00	1183,27			25,00	420,00
199,50	1956,26				
200,00	2038,81				
205,00	3342,81				
210,00	5203,57				
215,00	8000,00				
Açude Riacho do Sangue		Açude Ema		Açude Riacho dos Tanques	
cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
101,00	0,00	11,00	0,00	206,00	0,00
102,00	0,20	12,00	0,01	207,00	0,27
103,00	0,36	13,00	0,04	208,00	0,11
104,00	0,64	14,00	0,11	209,00	0,30
105,00	1,20	15,00	0,27	210,00	0,63
106,00	2,20	16,00	0,53	211,00	1,12
107,00	3,30	17,00	0,98	212,00	1,81
108,00	5,18	18,00	1,66	213,00	2,76
108,80	6,94	19,00	2,58	214,00	4,01
109,00	7,38	20,00	3,77	215,00	5,65
110,00	10,76	21,00	5,24	216,00	7,69
111,00	14,22	22,00	7,03	217,00	10,07
112,00	19,06	23,00	9,15	218,00	12,78
113,00	24,26	23,50	10,39	222,00	28,67
114,00	30,26	27,50	22,46		
115,00	36,70	30,00	34,00		
116,00	44,43	35,00	60,00		
117,00	52,40				
118,00	61,42				
119,00	72,00				
120,00	82,00				
122,00	105,00				
125,20	150,00				
130,00	232,00				
133,00	300,00				
135,00	353,00				
Açude Canafístula		Açude Joaquim Távora		Açude São José II	
cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
90,00	0,00	100,00	0,00	233,00	0,00
91,00	0,03	102,00	0,04	235,00	0,16
92,00	0,13	104,00	0,60	238,00	1,50
93,00	0,37	106,00	2,01	240,00	3,03
94,00	0,82	108,00	4,61	245,00	11,49
		110,00	8,70	247,00	17,00
		112,00	15,46	250,00	29,15
		114,00	23,66	255,00	60,51
		118,00	52,49	260,00	200,00
		119,00	62,00		
Açude Santo Antônio de Russas		Açude Boa Viagem			
cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )	cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )		
1,00	0,00	70,00	0,00		
2,00	0,08	72,00	0,02		
3,00	0,32	74,00	0,08		
4,00	0,89	76,00	0,24		
5,00	2,08	78,00	0,85		
6,00	4,03	80,00	2,30		
		82,00	4,81		
		84,00	8,75		





Açude Quixabinha

cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
393,00	0,35
394,00	0,59
395,00	0,92
396,00	1,31
397,00	1,93
398,00	2,58
399,00	3,18
400,00	3,78
401,00	4,71
402,00	5,72
403,00	6,98
404,00	7,92
405,00	8,83
408,00	13,04
410,00	16,49
412,00	20,19
415,00	25,82
418,00	32,51
419,00	34,74
421,00	200,00

Açude Riacho dos Carneiros

cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
427,00	37,18
428,00	41,45
430,00	50,94
432,00	200,00

Açude Thomas Osterne

cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
416,00	0,00
420,00	0,12
422,00	0,60
425,00	1,33
430,00	4,50
435,00	11,49
440,00	24,73
441,00	28,79
445,00	45,01
446,00	49,91
447,00	200,00

Açude Prazeres

cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
52,20	0,00
55,00	0,03
60,00	0,21
65,00	0,65
70,00	1,61
75,00	3,34
80,00	6,26
85,00	10,78
90,00	17,20
95,00	25,82
98,00	32,50
100,00	38,73
102,00	200,00

Açude Riacho dos Carneiros

cota (m)	volume (hm <sup>3</sup> )
393,00	0,00
399,00	0,04
400,00	0,07
405,00	0,45
410,00	1,85
416,00	7,08
420,00	14,11
422,00	19,67
424,00	25,91
425,00	29,41
426,00	33,20

