



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

**TÁCIO RIBEIRO BRAGA**

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO CAPACIDADE-REGULARIZAÇÃO EM  
RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO JAGUARIBE E NA UTILIZAÇÃO DO  
“PARADIGMA 2VA”**

**FORTALEZA**

**2019**

TÁCIO RIBEIRO BRAGA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO CAPACIDADE-REGULARIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS  
DA BACIA DO RIO JAGUARIBE E NA UTILIZAÇÃO DO “PARADIGMA 2VA”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B796a Braga, Tácio Ribeiro.  
Avaliação da relação capacidade-regularização em reservatórios da Bacia do Rio Jaguaribe e na utilização do "Paradigma 2VA" / Tácio Ribeiro Braga. – 2019.  
76 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Profa. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart.

1. Região semiárida. 2. Dimensionamento de reservatórios. 3. SIMRES. I. Título.

CDD 627

---

TÁCIO RIBEIRO BRAGA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO CAPACIDADE-REGULARIZAÇÃO EM RESERVATÓRIOS  
DA BACIA DO RIO JAGUARIBE E NA UTILIZAÇÃO DO “PARADIGMA 2VA”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Recursos Hídricos.

Aprovada em: 22/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Renata Mendes Luna  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Rubens Sonsol Gondim  
Embrapa Agroindústria Tropical

A Deus.

Aos meus pais, Rosilene e Braga.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Código de Financiamento 001.

À Profa. Dra. Ticiania Marinho de Carvalho Studart, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Renata Mendes Luna e Rubens Sonsol Gondim pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À minha namorada Victoria Fernandes, pela paciência e apoio durante a elaboração desta dissertação.

Ao professor Anísio Meneses Filho, pela inspiração para este trabalho.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“Só deixo o meu Cariri no último pau-de-arara”

Guio de Moraes

## RESUMO

Devido às condições geológicas desfavoráveis para a extração de águas subterrâneas do estado do Ceará, a principal fonte de abastecimento da região vem da água retirada de reservatórios artificiais. Por causa do clima semiárido, que ocasiona enormes taxas de evaporação e a ocorrência de rios intermitentes, as metodologias de dimensionamento mais simples, como as metodologias empíricas como o Diagrama de Rippl, muito usadas no restante do mundo, não são precisas para estimar a vazão regularizada em climas semiáridos. Por esses motivos, a bacia do rio Jaguaribe é uma das regiões do mundo mais sensíveis e necessitadas de estudos hidrológicos que aprimorem as técnicas de dimensionamento de reservatórios com menores incertezas. Neste sentido, o SIMRES surge como uma ferramenta computacional de simulação de reservatório que calcula vazões regularizadas, perdas por sangria e evaporação usando uma abordagem estocástica. Neste trabalho, cujo objetivo é fornecer mais informações sobre o comportamento de vazões regularizadas por reservatórios, foram utilizadas séries sintéticas de vazão geradas a partir de distribuição de frequência Gama II em séries históricas de postos fluviométricos a nível anual e a nível mensal foi utilizado o Método dos Fragmentos. Cada série sintética foi simulada com tipos diferentes de açudes que variavam suas características entre: forma da bacia, volume do reservatório e garantia de vazão. Foi então determinado uma fórmula de pré-dimensionamento que estimasse a vazão em barragens da bacia do Jaguaribe.

**Palavras-chave:** Região semiárida. Dimensionamento de reservatórios. SIMRES.

## ABSTRACT

Due to the unfavorable geological conditions for the extraction of groundwater from the state of Ceará, the main source of supply in the region comes from water withdrawn from artificial reservoirs. Because of the semi-arid climate, which causes huge evaporation rates and the occurrence of intermittent rivers, simpler design methodologies, such as empirical methodologies such as the Rippl Diagram, widely used in the rest of the world, are not accurate to estimate yield in semi-arid climates. For these reasons, the Jaguaribe River basin is one of the most sensitive regions in the world and in need of hydrological studies to improve the techniques for designing reservoirs with lower uncertainties. In this sense, SIMRES appears as a computational tool of reservoir simulation that calculates yield, losses by spill and evaporation using a stochastic approach. In this work, whose objective is to provide more information about the behavior of regularized flows by reservoirs, we used synthetic flow series generated from frequency distribution Gamma II in historical series of fluviometric stations at annual level and at monthly level was used the Method of Fragments. Each synthetic series was simulated with different types of dams that varied its characteristics between: shape of the basin, volume of the reservoir and guarantee of flow. A pre-sizing formula was then determined that estimates the yield at dams in the Jaguaribe basin.

**Keywords:** Semiarid region. Reservoir Design. SIMRES.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Organização do conhecimento/Representação da informação, Organização da informação/Representação da informação .....	16
Figura 2 – Balanço hídrico no reservatório.....	21
Figura 3 – Localização das estações fluviométricas utilizadas .....	25
Figura 4 – Classificação de reservatório segundo Hankanson .....	30
Figura 5 – Arquivo T2 do Simres .....	32
Figura 6 – Arquivo T3 do Simres .....	32
Figura 7 – Arquivo T4 do SIMRES .....	33
Figura 8 – Fator adimensional de retirada em função do coeficiente de variação para $fk=2,0$ e $\alpha=40.000$ .....	37
Figura 9 – Fator adimensional de retirada em função do volume afluente médio anual para $fk=2,0$ e $\alpha=40.000$ .....	38
Figura 10 – Fator adimensional de retirada em função da evaporação líquida anual para $fk=2,0$ e $\alpha=40.000$ .....	39
Figura 11 – Influência do fator de forma no fator adimensional de retirada do Rio Iguatu para um $fk=2,0$ .....	42
Figura 12 – Correlação entre o coeficiente "m" e a evaporação líquida para os postos estudados .....	44
Figura 13 – Correlação entre o coeficiente de variação e o coeficiente regularizado para $\alpha=5.000$ , $EI<0,7m/ano$ ; $fk=2,0$ .....	45
Figura 14 – Correlação entre o coeficiente de variação e o fator adimensional de retirada para $\alpha =5.000$ ; $EI>0,7 m/ano$ ; $fk=2,0$ .....	46
Figura 15 – Bacia do Rio Jaguaribe .....	47
Figura 16 – Frequência acumulada de vazões afluentes na Bacia do Rio Jaguaribe .....	49
Figura 17 – Fator de regularização por coeficiente de variação em barragens (1,0; 5.000). Sendo $EI=1,7m/ano$ e $G=90\%$ .....	56
Figura 18 – Regularização de vazão na bacia do Rio Jaguaribe, para um $G=90\%$ .....	57

Figura 19 – Fator adimensional de retirada em função do fator de capacidade para  
CV=1,0;  $\alpha=5.000$  e EI=1,7m/ano ..... 59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Informações hidroclimáticas das estações fluviométricas selecionadas .....	27
Tabela 2 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ .....	35
Tabela 3 –	Coeficiente de correlação $R^2$ entre o fator adimensional de retirada e o coeficiente de variação para diversos valores de fator de forma da bacia e $fk_{2,0}$ .....	37
Tabela 4 –	Coeficiente de correlação $R^2$ entre o fator adimensional de retirada e o volume afluente médio anual para diversos valores de fator de forma da bacia e $fk_{2,0}$ .....	38
Tabela 5 –	Coeficiente de correlação $R^2$ entre o fator adimensional de retirada e a evaporação líquida para diversos valores de fator de forma da bacia e $fk_{2,0}$ .	39
Tabela 6 –	Variação da vazão regularizada com relação ao $\alpha=5.000$ e $\alpha=75.000$ para $fk=2,0$ .....	41
Tabela 7 –	Coeficientes "m" e "c" das bacias estudadas para um $fk=2,0$ .....	43
Tabela 8 –	Regressão linear para $EI < 0,7m/ano$ .....	45
Tabela 9 –	Regressão linear para $EI > 0,7m/ano$ .....	46
Tabela 10 –	Precipitação média mensal (mm) .....	48
Tabela 11 –	Evaporação média mensal (mm) .....	48
Tabela 12 –	Evaporação líquida média mensal (mm) .....	48
Tabela 13 –	Fator de Forma da Bacia ( $\alpha$ ) de barragens na bacia Jaguaribe .....	49
Tabela 14 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ para $fK = 1,0$ .....	51
Tabela 15 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ para $fK = 1,5$ .....	52
Tabela 16 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ para $fK = 2,0$ .....	53
Tabela 17 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ para $fK = 2,5$ .....	54
Tabela 18 –	Fator adimensional de retirada com relação ao $\alpha$ para $fK = 6,0$ .....	55
Tabela 19 –	Correlação $R^2$ das regressões lineares .....	58
Tabela 20 –	Regularização de vazões com relação ao $fk$ para uma $EI = 1,7 m/ano$ .....	58

Tabela 21 – Coeficientes "a", "b" e "c" .....	60
Tabela 22 – O "valor ótimo" de $fK$ .....	61
Tabela 23 – Valores máximos de $fM$ na bacia do Jaguaribe para uma garantia de 90% ....	61
Tabela 24 – Simulações na estação Icó .....	63
Tabela 25 – Dados do Açude Arneiroz .....	64
Tabela 26 – Fatores adimensionais do Açude Arneiroz .....	64
Tabela 27 – Fator de regularização em Arneiroz calculado pela fórmula .....	64
Tabela 28 – Dados do Açude Armando Ribeiro Gonçalves .....	65
Tabela 29 – Fatores adimensionais do Açude Armando Ribeiro Gonçalves .....	65
Tabela 30 – Fator de regularização do Açude Armando Ribeiro Gonçalves calculado pela fórmula .....	65
Tabela 31 – Fator adimensional de retirada para $fK = 2,0$ e $El=1,7\text{m/ano}$ .....	66
Tabela 32 – Diferença entre fator adimensional de retirada máximo para $El=1,7\text{m/ano}$ e o fator adimensional de retirada para $fK = 2,0$ e $El=1,7\text{m/ano}$ .....	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Altura do barramento
CV	Coeficiente de variação
K	Capacidade do reservatório
$\sigma$	Desvio padrão
El	Evaporação líquida
fK	Fator adimensional de capacidade
fM	Fator adimensional de retirada
$\alpha$	Fator de forma do reservatório
G	Nível de garantia
$\mu$	Volume afluente médio anual

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Métodos empíricos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Métodos estocásticos</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Dados do experimento</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Fatores adimensionais de reservatórios</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Fator adimensional de retirada</i> .....	<b>27</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Fator adimensional de capacidade</i> .....	<b>28</b>
<b>3.2.3</b>	<i>Fator de forma do reservatório</i> .....	<b>29</b>
<b>3.3</b>	<b>Softwares utilizados</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Hidroweb</i> .....	<b>31</b>
<b>3.3.2</b>	<i>SisCAH</i> .....	<b>31</b>
<b>3.3.3</b>	<i>Simres</i> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>A ANÁLISE DA ADOÇÃO DO “PARADIGMA 2VA” NO NORDESTE BRASILEIRO</b> .....	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Influência do coeficiente de variação</b> .....	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Influência do volume afluente médio anual</b> .....	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Influência da evaporação líquida anual</b> .....	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Influência do fator de forma dos reservatórios</b> .....	<b>42</b>
<b>4.5</b>	<b>Estudo do comportamento de reservatório com <math>f_k=2,0</math></b> .....	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS NA BACIA DO RIO JAGUARIBE</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização da Bacia do Rio Jaguaribe</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Vazões regularizadas na Bacia do Rio Jaguaribe</b> .....	<b>50</b>
<b>5.3</b>	<b>Estudo do comportamento da vazão regularizada</b> .....	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Valor ideal do fator de capacidade</b> .....	<b>59</b>
<b>5.5</b>	<b>Sugestão para dimensionar um reservatório</b> .....	<b>62</b>
<b>5.6</b>	<b>Testando a fórmula</b> .....	<b>62</b>

5.6.1	<i>Série histórica na Bacia do Rio Jaguaribe</i> .....	62
5.6.2	<i>Barragem construída na Bacia do Rio Jaguaribe</i> .....	63
5.6.3	<i>Barragem construída fora Bacia do Rio Jaguaribe</i> .....	64
5.7	<b>Análise do desempenho do “Paradigma 2Va” na Bacia do Rio Jaguaribe ..</b>	65
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	67
6.1	<b>Sugestão de trabalho futuro.....</b>	68
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018 (CONNOR ET AL., 2018) apresenta um panorama geral sobre os recursos hídricos no mundo, abordando quatro aspectos importantes: demanda, disponibilidade, qualidade e efeitos extremos.

No que se refere à demanda, observa-se uma vertiginosa aceleração no crescimento populacional. Se, às vésperas da revolução industrial, a população era de 700 milhões de pessoas, hoje, menos de 300 anos depois, a marca já superou 7 bilhões (ZUFFO e ZUFFO, 2016). Além dessa explosão populacional, a revolução propiciou mudanças nos padrões de consumo e de desenvolvimento econômico fazendo que a demanda por água cresça 1% ao ano (CONNOR ET AL., 2018).

Quanto à disponibilidade, esta não é homogênea. Ocorrem regiões que possuem uma disponibilidade de água abaixo da demanda e regiões que possuem excesso. O mesmo é válido para o padrão de distribuição temporal em uma mesma região, podendo haver períodos de déficit ou superávit, conforme o tempo avança.

Acerca da qualidade, Lanna (2002) aponta que “não basta a água estar disponível na quantidade certa: a qualidade também importa. Se não fosse isso a anunciada “crise da água” do século XXI não causaria tanta preocupação: afinal existe nos oceanos água mais do que suficiente para atender quantitativamente as demandas que podem ser projetadas para os próximos séculos; pena que seja salgada! ”.

Sobre os efeitos extremos, Connor et al (2018) explica que as mudanças climáticas estão fazendo as situações hidrológicas ficarem mais extremas. Estima-se que a população de regiões que possuem escassez de água pelo menos um mês por ano aumentará do seu atual patamar de 3,6 bilhões de pessoas para em torno de 5 bilhões em 2050. Já em regiões com risco de inundação, aumentará de 1,2 milhões hoje, para 1,6 bilhões em 2050.

No início da humanidade, a água utilizada para consumo era captada basicamente dos rios, entretanto, conforme o aumento das populações, e conseqüentemente das demandas, os rios começaram a se tornar incapazes de suprir as necessidades quantitativas de certos assentamentos. Isso se dava por dois motivos básicos:

O primeiro tem relação com a variabilidade climática, onde ao longo do tempo se percebe alternância entre épocas chuvosas e épocas de seca. Em períodos menos chuvosos, era natural a diminuição do volume do rio e podia acontecer de que nesses períodos a demanda de

água não fosse satisfeita. Em situações extremas, podemos citar os rios intermitentes, que simplesmente secam durante determinados períodos do ano. O segundo motivo se refere eminentemente o aumento populacional, acontece quando uma cidade cresce de tal forma que mesmo em períodos de grande volume d'água, o rio não consegue suprir a população.

É nesse cenário que se percebe a importância da Engenharia de Recursos Hídricos, que na definição de Lanna (2002), tem o objetivo de “promover a alteração dos padrões qualitativos e quantitativos das disponibilidades de água de forma a adequá-los aos padrões qualitativos e quantitativos das demandas hídricas”.

Tal dinâmica de oferta e demanda exigiu que os humanos criassem tecnologias que pudessem garantir água para sua população. Dentre elas podemos citar: a adução de corpos de água mais distante por meio de adutoras, o bombeamento de águas dos lençóis freáticos, dessalinização da água dos mares e, o mais comum na região semiárida brasileira, a regularização de vazões por meio de reservatórios.

O princípio básico da regularização de vazões é armazenar as águas de épocas superavitárias para usar em períodos de carência (ALRAYESS et al., 2017). O local onde a água fica armazenada é um lago artificial, chamado de reservatório. Para que se forme essa imensa “caixa d'água” é necessário que primeiro se construa uma barragem, que interceptando o curso d'água, provoca um acúmulo de água. É por estemotivo que Lanna (2002) chama os reservatórios de “máquinas do tempo” que “transferem” para o futuro águas as águas do rio.

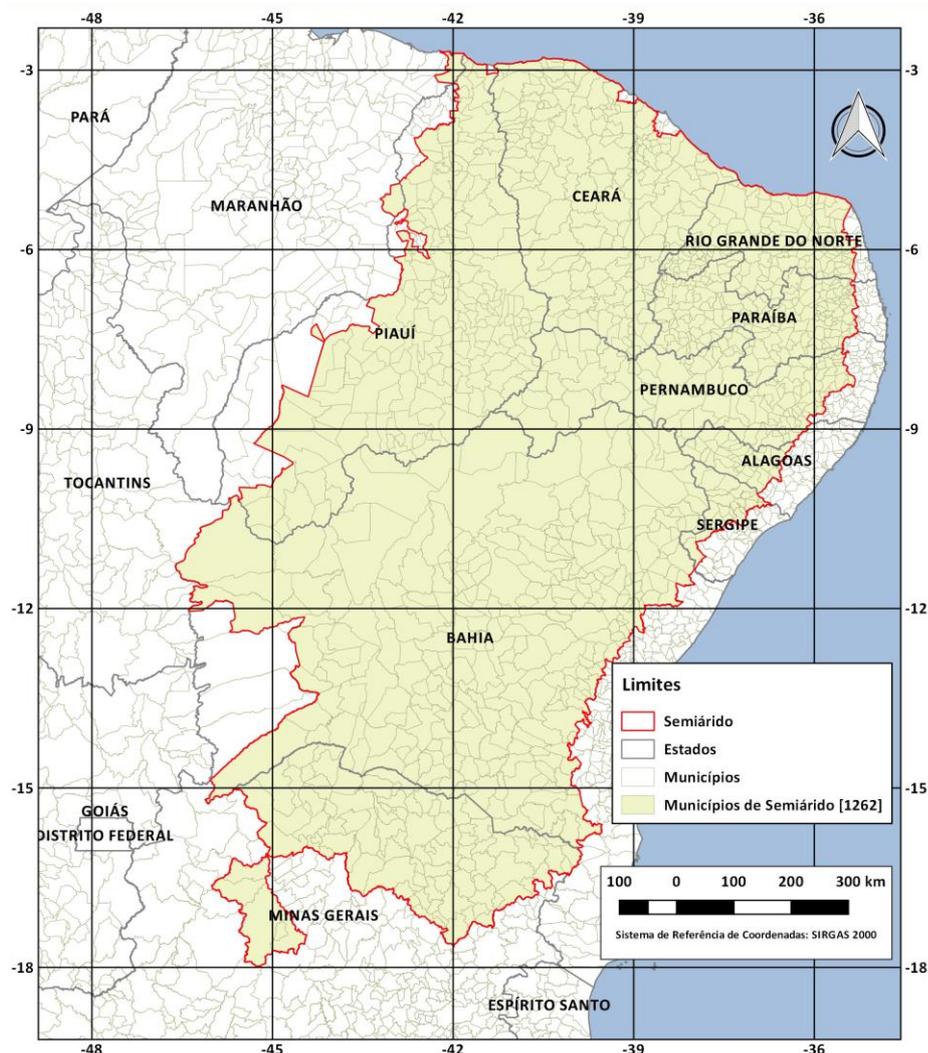
Neste sistema, ocorrem três fenômenos que são importantes de destacar. O primeiro é o da evaporação, que ocorre naturalmente (cujas intensidade média varia conforme a região onde a barragem foi construída e o período do ano) e se caracteriza como uma perda de água do reservatório para a atmosfera, neste fenômeno é importante lembrar que a intensidade de evaporação (comprimento evaporado por unidade de tempo) é de atuação vertical, o que implica a ocorrerem maiores perdas de volume de água por evaporação quanto maior for área superficial do espelho d'água. (MUSY e HIGY, 2004). O segundo processo é o de sangria (também conhecido como vertimento), que está intimamente relacionado à altura da barragem e representa as águas que ultrapassam o volume máximo, durante períodos de cheia. O último importante processo que ocorre num reservatório é a vazão regularizada, que é a vazão efetivamente disponível para uso.

## 1.1 Justificativa

O Nordeste corresponde a cerca de 18,2% da área do país, englobando nove estados da

federação e abriga 28% da população brasileira (IBGE, 2010). Das 12 regiões hidrográficas do Brasil, o Nordeste Brasileiro contém (total ou parcialmente) cinco delas: Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste, Parnaíba e São Francisco. Grande parte do Nordeste encontra-se incluída no clima semiárido (Figura 1), caracterizado por baixas taxas de precipitação média, quase sempre menor que a taxa de evaporação (TOLEDO et al., 2014). Os fatores climáticos sofrem altas variações entre os anos e é comum períodos de secas prolongadas. As chuvas tendem a serem bastante intensas, mas de curta duração e pequena área de incidência quando ocorrem, características estas típicas de chuvas convectivas (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015) e influenciada pela presença da Zona de Convergência Intertropical nos primeiros meses do ano. No segundo semestre, as precipitações são praticamente inexistentes (CAVALCANTI et al., 2009).

Figura 1 – Divisão Político Administrativa do Semiárido Nordestino



Fonte: INSA (2017)

A predominância de estratos cristalinos de solo pobre em nutrientes e com alta salinidade associado a secas periódicas ocasiona a predominância da caatinga, vegetação adaptada a longos períodos de secas (REBOUÇAS, 1997). Em geral, os lençóis freáticos são profundos e a maioria dos rios do Nordeste são intermitentes, como exemplo, o Rio Jaguaribe, um de seus mais famosos (REBOUÇAS, 2014).

No Nordeste é comum o represamento de rios, formando açudes que seguem o princípio de armazenar a água nos períodos chuvosa e utilizar nos períodos de seca (REBOUÇAS, 1997).

Além de todas essas dificuldades naturais existentes Campos (2006) alerta que os altos coeficientes de variação presentes nos rios nordestinos demandam uma longa série temporal de dados para se estimar o valor médio do deflúvio anual com precisão. Ironicamente as regiões semiáridas são aquelas onde menos se dispões de dados.

Uma prática comum entre os projetistas de reservatórios no Nordeste Brasileiro é dimensionar o volume do reservatório como sendo igual ao dobro do volume afluente médio anual ( $\mu$ ). O próprio DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) na obra Vieira e Gouveia Neto (1983) recomenda a prática: “Capacidade do reservatório para uma repleção total de 2 anos de inverno normal” para os dimensionamentos em rios do Nordeste.

As origens dessa prática ainda não foram determinadas. Campos (2005) acredita que venha da observação de algumas barragens como Hoover nos Estados Unidos e algumas barragens dimensionada pelo famoso Engenheiro Francisco Gonçalves Aguiar, ao qual as razões entre a capacidade do reservatório e o volume afluente médio anual era aproximadamente dois. Sobre este costume, o autor também comenta “não se pode dizer que os resultados da aplicação dessa prática tenham sido danosos ao Nordeste”.

Em uma região como essa, é absolutamente preciso que deixem esses paradigmas simplistas e se produzam pesquisas que estudem os comportamentos hidrológicos, coletando dados e fornecendo informações a fim de que se diminuam as incertezas e riscos, para que se possa garantir que esse bem tão precioso, que é a água não falte onde é mais necessária.

## 1.2 Objetivos

A o paradigma que consiste em considerar a capacidade do reservatório como sendo o dobro do volume afluente médio anual, por meio de simulação de diversas tipologias de barragem em diversos rios nordestinos.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

A presente pesquisa encontra-se assim estruturada: o Capítulo 1 disserta sobre a contextualização, a justificativa e o objetivo; o segundo Capítulo desenvolve o embasamento teórico da pesquisa; no Capítulo 3 é descrito a metodologia geral, que é comum a ambos experimentos do trabalho. O Capítulo 4 e o 5 apresentam os dois experimentos do trabalho. E, finalmente, o Capítulo 6 contém a conclusão geral da dissertação e sugestão de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta o embasamento teórico que fundamenta o estudo descrito neste trabalho, começando com uma descrição dos métodos de dimensionamento de reservatório, passando pelas características que influenciam na vazão regularizada e terminando com uma discussão sobre a importância do uso de séries sintéticas.

A ciência de Hidrologia dos Reservatórios tem como principal objetivo o estudo das relações entre capacidade do reservatório (K), vazão regularizada (M) e garantia (G), as quais são não-lineares e complexas, o que complica tentativas de estudo teórico do dimensionamento (ADELOYE, 2007).

Chow et al. (1988) descrevem o dimensionamento de reservatórios em quatro passos: o primeiro, diz respeito a determinação do volume demandado que o reservatório se destina a suprir. O segundo, trata a escolha das coordenadas de locação do eixo do barramento e a altura da barragem. Sobre esse segundo passo, fica clara a importância do conceito de forma do reservatório e a utilização de dados como a curva cota-volume. O terceiro passo é estudar como se comportará a vazão regularizada por esse reservatório ao longo da passagem do tempo. No quarto e último passo, deve-se comparar a vazão regularizada com o volume demandado, para se ter ideia de quantos períodos de tempos haverá falhas de reservatório (garantia).

Destes quatro procedimentos, o terceiro é o mais importante, pois a definição da vazão regularizada é o principal fator a ser determinado em num estudo de reservatórios, pois define a adequação (ou não) ao objetivo da obra. A dificuldade de estimação da vazão regularizada vem de duas fontes primárias: a variabilidade natural inerente a vazão dos rios e da limitação do tamanho de registros da série histórica (KURIA e VOGEL, 2015).

### 2.1 Métodos empíricos

As primeiras tentativas de determinação do volume regularizado consistiam em abordagens empíricas (CAMPOS e STUART, 2001). De acordo com McMahon e Mein (1978), um dos primeiros métodos desenvolvidos para o dimensionamento de reservatórios foi o Diagrama de Rippl em 1889, um método que apenas utiliza a série histórica como parâmetro para o dimensionamento e tem como princípio equalizar a vazão ofertada e demandada. Consiste em construir uma curva integral do hidrograma da série histórica e a partir dele encontrar o período crítico, para definir o volume estocado (GIACCHINI, 2016). O método é relativamente simples, mas só obtém resultados bons em situação em que a demanda é

aproximadamente igual ao volume disponível e em rios perenes (que possuem vazão diferente de zero o ano todo), além disso, devem sofrer ajustes para simular o efeito da evaporação. (RAGHUNATH, 2006). Esse método tende ao superdimensionamento, comparado a outros métodos mais bem elaborados (GHISI, 2006) e não permite prever o risco associado ao volume do reservatório (ALRAYESS et al, 2017).

O Método SPA (Sequence Peak Algorithm) é o equivalente a uma versão automatizada do Método de Rippl (THOMAS e BURDEN, 1963), que determina a capacidade de um reservatório para garantir uma vazão regularizada sem falhas (100% de garantia), por meio de um processo sequência de acúmulo de déficit máximo a partir de uma vazão regularizada esperada (PATSKOSKI e SAKARASUBRAMAIAN, 2015). É um método muito utilizado no mundo todo e muitos reservatórios tiveram sua capacidade dimensionada a partir dele (MCMAHON et al., 2017). Como se assemelha ao Diagrama de Rippl, por padrão não leva em conta a evaporação em seus cálculos, mas Adeloje e Montaseri (1998) elaboraram um algoritmo mais complexo, que leva em conta a evaporação. Outra limitação original deste método é o típico uso da série histórica de vazões, Vogel (1988) utiliza simulações em séries sintéticas geradas por um modelo lognormal e Patskoski e Sakarasubramaian (2015) usam séries temporais reconstruídas com cronologias de anéis de árvores para elaborar séries sintéticas.

O Método BA (Behavior Analysis) se assemelha ao Método SPA, usando uma sequência de procedimentos para determinar a capacidade do reservatório a partir de uma série de vazões afluentes e também foi utilizado em dimensionamentos ao redor do mundo, mas ao contrário do SPA, leva em consideração a probabilidade de falha no reservatório (MCMAHON e ADELOYE, 2005).

Em 1937, o engenheiro Francisco Aguiar desenvolveu um método de dimensionamento de reservatórios para o Nordeste Brasileiro, onde predominavam altas taxas de evaporação o que inviabilizavam o emprego do Diagrama de Rippl. O método consistia basicamente em usar a série histórica de precipitações anuais para calcular a capacidade e a vazão regularizada a partir de uma fórmula polinomial que convertia chuva em deflúvio. A capacidade do reservatório era a vazão correspondente ao valor obtido da fórmula polinomial quando se considerava uma chuva igual a média das precipitações que fossem maior que a mediana da série histórica. A vazão regularizada era calculada do mesmo modo, mas considerando a média das precipitações que fossem menores que a mediana da série histórica (CAMPOS e STUDART, 2001).

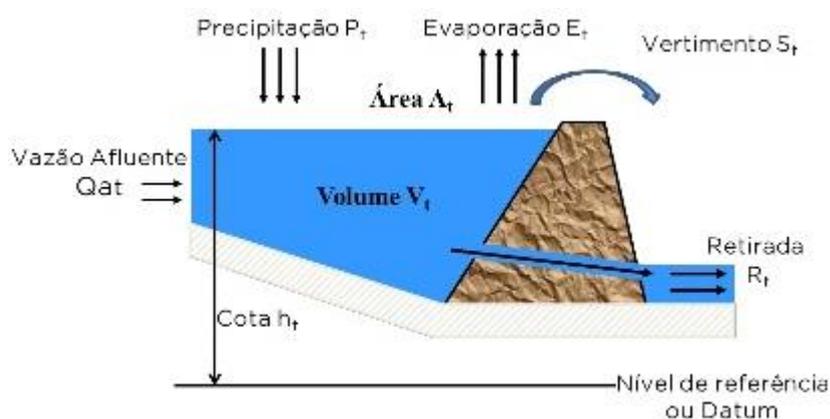
Uma metodologia semelhante ao Método de Aguiar, chamada “Fórmula Empírica do  $2V_a$ ”, muito aplicada pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra a Seca), consistia em aplicar a fórmula polinomial chuva-deflúvio presente no trabalho de Aguiar usando a precipitação média para calcular o volume afluyente anual ( $V_a$ ) e calcular a capacidade do reservatório como sendo o dobro deste valor (VIEIRA e GOUVEIA NETO, 1983). Essa consideração simplista de capacidade abriu margem ao estabelecimento de um paradigma entre os projetistas de adotar o volume do reservatório como sendo o dobro do volume afluyente médio anual (CAMPOS, 2005).

## 2.2 Métodos estocásticos

A grande limitação dos métodos empíricos é não considerar a natureza estocásticas do processo de armazenamento de águas em reservatórios, que foi reconhecido por Sudler (1927) durante uma tentativa rudimentar de criar séries sintéticas de vazão, ainda de forma limitada por não contar com ferramentas computacionais (CAMPOS e STUDART, 2001).

Foi a teoria de Moran (1954), que calculava a probabilidade de esvaziamento de um reservatório, e o advento da computação que subsidiaram o surgimento de uma abordagem de dimensionamento estocástica, que utiliza o conceito de balanço hídrico (Figura 2), e, portanto, respeita a natureza estocástica da água nos reservatórios. A partir do balanço hídrico pode-se determinar o volume acumulado no próximo intervalo de tempo ( $V_{t+1}$ ) pela Equação 1.

Figura 2 – Balanço hídrico no reservatório



Fonte: Amana (2019)

$$V_{t+1} = V_t + Q_{at} - R_t + (P_t - E_t) \cdot A_t - S_t \quad (1)$$

Quando se dispõe da série histórica de vazão afluente, é intuitivo o uso da equação do balanço hídrico em cada intervalo de tempo e então determinar a vazão regularizada pelo reservatório (BUARQUE e TUCCI, 2005).

Nesta abordagem estocásticas aplicada no balanço hídrico, Campos e Studart (2009) descrevem a vazão regularizada ( $M$ ) como função de:

$$M = \Phi(\bar{X}, \bar{Y}, S_0, N) \quad (2)$$

Onde  $\bar{X}$  é vetor que reúne as características hidroclimáticas tais como (volume afluente médio, coeficiente de variação e evapotranspiração líquida sobre o lago),  $\bar{Y}$  é um vetor com características morfológicas do reservatório, tais como capacidade e as relações cota x área x volume.  $S_0$  é o volume inicial do reservatório e  $N$  é comprimento da série de vazões afluentes.

Segundo Campos (2005), em termos de planejamento, as barragens sempre estão associadas a um risco probabilístico devido as características hidroclimáticas, que compreendem eventos complexos demais para serem previstos com total precisão. Portanto, em faz-se necessário o uso de ferramentas estatísticas para a atividade de dimensionamento de reservatórios (LANNA, 2007).

O conceito de volume disponível em determinado instante remete ao conceito de garantia, isto é, a porcentagem de tempo em que o volume disponível supre a demanda de água necessária (MCMAHON et al., 2006), definida pela Equação 3:

$$G (\%) = \left(1 - \frac{nr}{N}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde  $N$  é comprimento da série de vazões afluentes e  $nr$  é número de períodos de tempo em que a demanda não foi suprida.

Em geral, os dimensionamentos de reservatórios estados do Nordeste Brasileiro adotam a vazão regularizada para uma garantia de 90%, devido as legislações presentes no estado do Ceará (STUDART, 2002). Caso seja necessário a conversão de uma vazão regularizada com determinada garantia conhecida para uma outra garantia, pode-se usar a equação proposta por Barcelos et al. (2006), que descreve uma relação entre vazões regularizadas com diferentes garantias.

Studart (2000) alertam que a utilização da série histórica faz com que a vazão regularizada seja função do volume inicial do reservatório e, portanto, a Equação 2 descreve o

que se chama de Fase Transiente, onde se pode ter problemas de dimensionamento dependendo de qual o volume foi assumido na simulação, além disso Kelman (1987) explica “como a série histórica é apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico, pode-se imaginar que a natureza “sorteou” a série histórica segundo algum conjunto de leis probabilísticas” e Kuria e Vogel (2015), a partir de simulações de Monte Carlo, concluíram que o coeficiente de variação das estimativas de vazões regularizadas de reservatório dependem unicamente do coeficiente de variação e do tamanho da série histórica de vazões afluente. Por essas razões, Campos (2005) explica que devido ao alto Coeficiente de Variação, como os existentes no Semiárido Nordeste, seria necessária uma longa série histórica de vazão para que se obtenha uma amostra que seja confiável, ao se aplicar a fórmula da garantia, o que nem sempre é possível de se encontrar.

Para contornar este problema, usam-se séries sintéticas de vazão de longa duração, cujo precursor foi Sudler (1927). Séries sintéticas são fabricadas a partir de séries históricas reais, que preservando as características estatísticas originais (tais como o  $\mu$  e o CV), apresentam maiores períodos de tempo. Trata-se, portanto, de um “alargamento” dos dados originais, para que se tenha mais representatividade no cálculo da garantia de uma simulação hidrológica (maiores valores de  $n$ ) e não dependa do volume inicial para determinação da vazão regularizada (STUDART, 2000). Quando a série é muito longa, a simulação dá-se no chamado estado de equilíbrio:

$$f_M = \Phi(\bar{X}, \bar{Y}) \quad (4)$$

Pode-se dizer que se atinge o estado de equilíbrio quando praticamente não há diferença do volume regularizado ao se assumir o reservatório inicialmente cheio ou vazio. Preto et al. (1997) demonstram que sequências de pelo menos mil anos são necessárias para se obter a simulação em estado de equilíbrio. Studart (2000) concluiu que se utilizando de séries sintéticas de 5.000 anos, obtém-se o coeficiente de variação igual a 0,028, sendo considerada nula. Para Campos e Studart (2009) a utilização de séries com 5.000 anos de dados não implica em grandes esforços computacionais.

O estudo de relações de capacidade-garantia-regularização por meio de processo estocásticos é muito útil para estudar os comportamentos de diversos sistemas de reservatórios (KURIA e VOGEL, 2014). Yevjevich (1972) previra que o padrão dos métodos de dimensionamento seria experimental com o auxílio de métodos analíticos, de fato, diversos métodos de dimensionamento expeditos foram criados, fundamentados nos conceitos

estocásticos, usando simulações de vazão regularizada em balanço hídrico e tentando estabelecer relações que descrevam os resultados obtidos com métodos como Monte Carlo usados no processo estocásticos de séries de vazões combinadas com simulações em reservatórios (KURIA e VOGEL, 2014).

Gould (1964) desenvolveu uma técnica de período crítico que considerava a distribuição gamma como uma melhor aproximação para o comportamento do volume afluente e possuía uma equação que calculava a relação entre a capacidade e o volume afluente anual.

McMahon (1976) modificou o método de Gould tomando em experimentos em rios Australianos para estimar a capacidade dos reservatórios em diferentes probabilidades de falha no abastecimento. Neste método, o coeficiente de variação é um fator muito determinante na relação capacidade e volume afluente anual.

Campos (2000) estudou as relações entre regularização, evaporação e sangria de reservatório nordestinos a partir de simulações de séries sintéticas que utilizavam a distribuição Gama II a nível anual e o método dos fragmentos a nível mensal, e a partir dos resultados elaborou o método de dimensionamento chamado Diagrama Triangular de Regularizações.

Silva e Portela (2013) elaboraram uma equação de pré-dimensionamento de reservatórios portugueses usando como base simulações em séries sintéticas que usou a distribuição Gama II para rios nordestinos a nível anual e o método dos fragmentos no nível mensal.

Vogel and Stedinger (1987), Phien (1993) e Stephenson (1997) também criaram métodos baseados em um tratamento estocásticos (MCMAHON et al., 2007).

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreverá como foram obtidos os dados do experimento, quais os parâmetros adotados na pesquisa e apresentará uma visão geral dos softwares utilizados na pesquisa.

#### 3.1 Dados do experimento

Os dados fluviométricos utilizados foram os do Hidroweb, banco de dados eletrônicos de acesso público da ANA (Agência Nacional de Águas). Foram selecionados 43 postos fluviométricos distribuídos na região Nordeste (Figura 3) por meio de amostragem estratificada, escolhendo, no mínimo, duas estações por faixa de CV. Os CV variam entre 0,2 e 1,6. Os postos fluviométricos escolhidos devem possuir mais de 20 anos completos de registros de vazão sem falhas.

Figura 3 – Localização das estações fluviométricas utilizadas



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir de cada uma dessas séries históricas, foram geradas séries sintéticas de 5.000 anos em nível anual pela distribuição Gama II e a nível mensal pelo Método dos Fragmentos proposto por Svanidze (1980). De acordo com Araújo (1991) o Método dos Fragmentos é apropriado para os rios intermitentes do Semiárido Nordestino.

Para representar a perda (ou ganho) de água do reservatório para a atmosfera foi utilizado o conceito de evaporação líquida (Equação 5), que é definida como o resultado da evaporação menos a precipitação: quando aquele é maior que este em um determinado período de tempo, a evaporação líquida é positiva e significa que o reservatório perde mais água para a atmosfera do que recebe, e vice-versa (CAMPOS e STUDART, 2009).

$$E_L = E - P \quad (5)$$

Tucci (2002) desconsidera a evaporação em suas simulações de reservatórios, assim como Silva e Portela (2013) em rios Portugueses e Marton e Kapelan (2014) em rios da República Tcheca. Entretanto, em rios como os nordestinos, as taxas de evaporação são grandes e não devem ser negligenciadas (CAMPOS, 2005).

Os valores médios mensais de evaporação e precipitação de cada posto fluviométrico foram determinados pela Normal Climatológica (INMET, 2010) mais próxima e, a partir desses valores, foram calculados os valores de evaporação líquida atuante.

As características hidroclimáticas das estações fluviométricas escolhidas estão apresentadas na Tabela 1. A primeira coluna da tabela apresenta o código correspondente a bacia no sistema Hidroweb, a sétima coluna informa a Normal Climatológica escolhida e a última coluna descreve a evaporação líquida anual.

Todas as vazões regularizadas foram simuladas para uma modulação de retiradas igual ao longo do ano, volume de reserva sendo 5% do volume total e garantia 90%, que são condições usuais no dimensionamento.

### **3.2 Fatores adimensionais de reservatórios**

Por se tratar de um trabalho que analisa simulações realizadas em diversas configurações de reservatórios, optou-se por usar como parâmetros de estudo os fatores adimensionais de reservatórios estabelecidos por Campos (2005) que possuem como grande vantagem a possibilidade de comparar o desempenho de reservatórios submetidos a características hidroclimáticas e morfológicas de diferentes grandezas.

McMahon et al. (2007) e Silva e Portela (2013) e Alrayess et al. (2017) também utilizam de fatores adimensionais para caracterizar reservatórios, embora utilizem outros símbolos para representar cada fator ele são essencialmente os mesmo de Campos (2005).

Tabela 1 – Informações hidroclimáticas das estações fluviométricas selecionadas

Código	Nome	UF	Anos de dados completos	$\mu$ (hm <sup>3</sup> /ano)	CV	Normal Climatológica	El (m/ano)
33250000	Barra do Corda	MA	48	1911,21	0,22	Barra do Corda	0,327
33260000	Santa Vitória	MA	43	1970,26	0,25	Barra do Corda	0,327
46490000	Fazenda Coqueiro	BA	27	203,33	0,34	Barra	1,8805
33281000	Pedreiras II	MA	36	2764,31	0,36	Bacabal	-0,5258
33290000	Bacabal	MA	39	3363,89	0,38	Bacabal	-0,5258
39770000	Fazenda Boa Fortuna	AL	39	988,57	0,41	Maceió	-0,764
51560000	Nazaré	BA	68	269,1	0,46	Cruz das almas	0,3048
33170000	Esperantina	MA	36	629,63	0,48	Bacabal	-0,5258
39980000	Camaçari	AL	27	238,74	0,53	Maceió	-0,764
34270000	Barra Do Lance	MA	38	1006,84	0,54	Picos	1,8448
39870000	Atalaia	AL	34	739,75	0,61	Maceió	-0,764
51840000	Tesouras	BA	49	49,74	0,63	Itirucu (jaguaquara)	0,3047
50047000	Rosário do Catete	SE	34	106,27	0,65	Aracaju	0,1309
39185000	Tiuma	PE	34	573	0,66	Recife (curado)	-0,742
50840000	Mata de São João	BA	43	206,06	0,67	Alagoinhas	0,3392
33620000	Fazenda Sobral	MA	34	1166,96	0,69	Chapadinha	0,0515
50755000	Ponte Da Ba-6	BA	48	368,69	0,75	Alagoinhas	0,3392
53650000	Itambé	BA	63	699,78	0,76	Vitoria da conquista	0,5299
38750000	Mulungu	PB	25	131,93	0,78	Campina grande	0,7644
53620000	Cândido Sales	BA	63	648,66	0,8	Vitoria da conquista	0,5299
52695000	Vapor	BA	45	1937,37	0,83	Cruz das almas	0,3048
37220000	Várzea Grande	PB	33	65,71	0,94	Iguatu	1,7028
39540000	Capivara	PE	32	108,74	1	Arcoverde	1,167
34770000	Prata Do Piauí	PI	42	2746,48	1	Piripiri	0,7175
50250000	Fazenda Tourão	SE	33	86,72	1	Itabaianinha	0,2433
51460000	Ponte Rio Branco	BA	74	271,09	1,12	Serrinha	0,5567
37380000	Pau Ferrado	PB	41	506,48	1,13	Iguatu	1,7028
51440000	Riachão Do Jacuípe	BA	37	119,88	1,14	Serrinha	0,5567
39145000	Limoeiro	PE	39	163,25	1,25	Surubim	1,2212
52370000	Anagé	BA	30	146,75	1,27	Vitoria da conquista	0,5299
50146000	Água Branca	BA	27	28,5	1,29	Monte santo	1,021
34480000	Fazenda Talhada	PI	23	585,98	1,29	Picos	1,8448
37470000	Jardim De Piranhas	RN	40	1641,71	1,3	Serido (caico)	2,4728
37080000	Pedra De Abelhas	RN	22	614,99	1,3	Apodi	1,9686
36580000	Morada Nova Ii	CE	36	630,34	1,32	Morada Nova	1,6934
35830000	Caio Prado	CE	27	142,95	1,34	Iguatu	1,7028
38170000	Ceará-Mirim	RN	44	112,25	1,38	Ceara mirim	0,3753
36470000	Senador Pompeu	CE	28	296,1	1,4	Iguatu	1,7028
36160000	Iguatu	CE	37	929,67	1,5	Iguatu	1,7028
35260000	Groairas	CE	36	201,89	1,58	Iguatu	1,7028
38880000	Guarita	PB	39	552,06	1,58	Campina grande	0,7644
36045000	Malhada	CE	30	70,07	1,64	Campos Sales	2,4174
35950000	Cristais	CE	30	174,29	1,85	Iguatu	1,7028

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.1 Fator dimensional de retirada

Kuria e Vogel (2015) explicam que as relações capacidade-garantia-regularização, estudadas sobretudo em métodos estocásticos, são ferramentas utilizadas para determinar a capacidade de um reservatório necessária para garantir uma vazão regularizada para uma dada garantia ou alternativamente, a vazão regularizada que pode ser fornecida por um reservatório de capacidade conhecida.

Vários métodos de dimensionamento utilizam o conceito de fatores adimensionais de reservatório para a partir da vazão regularizada requerida em termos adimensionais, calcular a capacidade de reservatório como é o caso de Alrayess et al. (2017) e Silva e Portela (2013), que nomeiam de Draft (meta de projeto). Outros métodos como é o caso de Campos (2005), calculam a vazão regularizada requerida em termos adimensionais a partir de um reservatório de capacidade conhecida. Tipicamente, a vazão regularizada é colocada como um fator adimensional pela divisão com a vazão afluente, e, portanto, informa a fração de vazão que adentra o reservatório e consegue ser aproveitável para os diversos usos ao qual a barragem se destina.

Pode-se tratar a vazão regularizada ( $M$ ) de forma adimensional, na forma de um fator adimensional de retirada ( $f_M$ ), obtido por meio da Equação 6 apresentada por Campos (2005):

$$f_M = \frac{M}{\mu} \quad (6)$$

### ***3.2.2 Fator adimensional de capacidade***

Segundo Campos (2005), o fator adimensional de capacidade ( $f_K$ ), representa a relação entre capacidade do reservatório e o volume afluente médio anual (Equação 7).

$$f_K = \frac{K}{\mu} \quad (7)$$

O  $f_K$  também recebe outra abordagem no conceito de qualidade de água, sendo conhecido como tempo de residência, ou tempo de detenção. McMahon et al. (2007) explica que esse conceito é útil na prática por representar o número máximo de anos que a água se mantém no reservatório e é útil na teoria por padronizar a capacidade dos reservatórios em termos de estatística. Mees (2018) define esse conceito como “o tempo de percurso de determinada massa de água desde o momento que aflui ao sistema até o momento de sua saída”.

O Método de Dimensionamento do 2Va, em Vieira e Neto (1983), recomenda que os reservatórios do Nordeste Brasileiro sejam dimensionados com o dobro de sua vazão afluyente anual, os reservatórios dimensionados para esse método têm, portanto,  $f_K = 2,0$ .

Mees (2018) explica que o tempo de residência é essencial para a análise qualitativa da água no reservatório quanto se trata, por exemplo, de eutrofização ou padrões de fósforo.

### 3.2.3 Fator de forma do reservatório

Tanto as retiradas de volume ocasionadas pela sangria e pela evaporação recebem influência da forma topográfica do reservatório. As perdas por sangria estão fortemente relacionadas à altura da barragem e as perdas por evaporação são função do espelho d'água. Portanto é imprescindível que se conheça o quanto de volume de água corresponde a cada nível de água no reservatório (relativo também a uma área de espelho d'água) (CHOW et al., 1985). Para se obter essa relação é necessário que se faça um levantamento topográfico antes da construção do reservatório, ou batimétrico, em casos de reservatórios já construídos (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015).

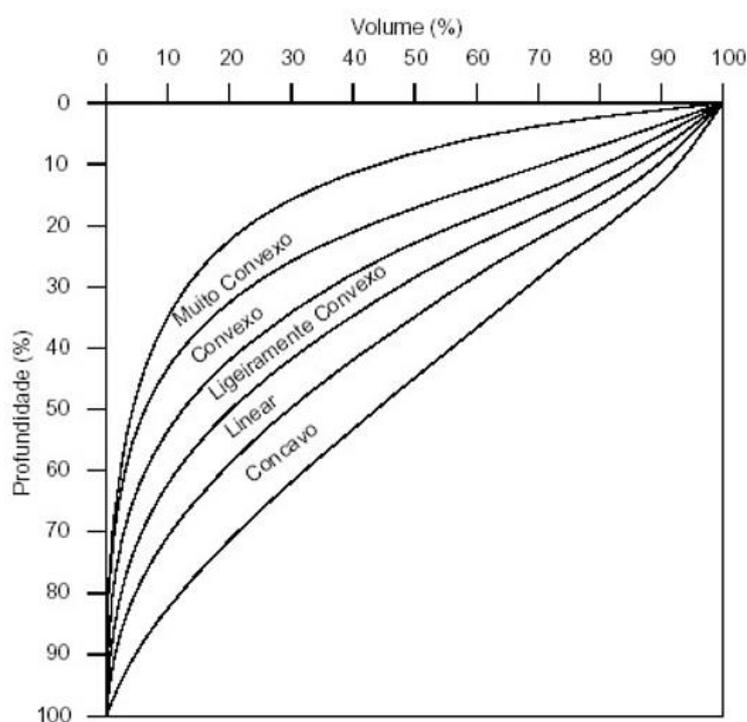
Para caracterizar os reservatórios Nordestinos quanto sua forma, Campos (2005) associou relação cota-volume a um fator adimensional de forma ( $\alpha$ ) característico de cada reservatório. Esse estimador representa o reservatório como sendo um cone e, portanto, uma vez conhecido o valor de  $\alpha$ , pode-se estimar a capacidade do reservatório (K) que corresponde a certo nível de água (h), ou vice-versa (Equação 8).

$$\alpha = \frac{K}{h_{m\acute{a}x}^3} \quad (8)$$

No estudo de vazões regularizadas de Campos et al (2016), constatou-se que o estimador acima é muito eficiente para representar a forma dos reservatórios normalmente encontrados no Nordeste, exibindo pouco erro médio no cálculo das vazões regularizadas, se comparado a modelos mais complexos, como o método dos mínimos quadrados.

A validade do estudo acima foi ligeiramente convexos, convexos e lineares (FIGURA 4) na classificação de Hankanson (1981), que são categorias preponderantes em reservatórios nordestinos.

Figura 4 – Classificação de reservatório segundo Hankanson



Fonte: Campos et al (2016)

No que se refere aos dados topográficos necessários, como não se dispõe dos levantamentos de cada bacia, optou-se por utilizar o fator de forma do reservatório ( $\alpha$ ) para gerar curvas cota-volume de cada reservatório, Campos et al. (2016) concluiu que a caracterização de reservatórios pelo fator de forma do reservatório gera erros de até 5% se comparadas as simulações realizadas com o cota-volume real. Toda simulação em um determinado posto sempre será feita adotando-se quatro valores de  $\alpha$ : 5.000, 20.000, 40.000 e 75.000. Valores entre 5.000 e 40.000 são comuns no Nordeste, a utilização do valor 75.000 serve para garantir uma amplitude do  $\alpha$  é tentativa de se estabelecer o comportamento da vazão regularizada com o  $\alpha$ , mesmo em situações atípicas.

### 3.3 Softwares utilizados

Três programas foram utilizados para os experimentos deste trabalho: o Hidroweb, o SisCAH e o SIMRES. Essa seção apresenta uma breve descrição de cada um deles. No anexo desse trabalho encontra-se um manual de utilização desses softwares para dimensionar um reservatório.

### **3.3.1 Hidroweb**

Em postos fluviométricos, é possível encontrar informações de réguas linimétricas, registrador de nível, medição de descarga líquida, medição de sedimentos, medição de qualidade da água. Em postos pluviométricos podem ser encontradas informações de registrador de chuva, tanque evaporimétrico e estação climatológica.

O mapa de postos possui um eficiente sistema de filtros que permite ocultar do mapa os postos não desejados, para que a visualização fique mais limpa.

### **3.3.2 SisCAH**

O Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH) foi desenvolvido pela UFV (Universidade Federal de Viçosa) em conjunto com diversos outros institutos brasileiros. Trata-se um software composto de vários módulos de processamento e análise de séries históricas de vazão obtidas pelo Hidroweb (SOUZA et al, 2009).

Os módulos são os seguintes: pré-processamento (descarta meses ou anos com falhas), estimativas de vazão (médias, mínimas e máximas), exibição da curva de permanência, obtenção da regularização de vazões, traçar a hidrógrafa e preenchimento das séries históricas.

Em todos módulos, o SisCAH tem a opção de imprimir relatórios e exportar os resultados para o programa Excel.

### **3.3.3 Simres**

O Simulador de Reservatórios (Simres), desenvolvido pela UFC (Universidade Federal do Ceará) na linguagem Fortran e com interface Delphi.

A principal função deste programa é realizar simulações de reservatórios usando uma informando as características hidroclimáticas e morfológicas desejadas. O programa utiliza a simulação de Monte Carlo aplicada ao balanço hídrico para determinar o funcionamento do reservatório, informando os valores médios de regularização, evaporação e sangria.

A simulação realizada pelo programa ocorre da inserção de dois arquivos pelo usuário em formato DAT. O primeiro arquivo, chamado T2 deve conter dados gerais do reservatório (Figura 5), tais como: a curva cota-volume, evaporação líquida média mensal, garantias e

modulação da retirada. O outro arquivo, chamado T3 (Figura 6), corresponde a série histórica de vazão do rio.

Figura 5 – Arquivo T2 do Simres

**Dados Gerais do Reservatório**

Nome do arquivo: 37474t2.dat

Título do Trabalho: Reservatório 75m

Impressão dos volumes parciais: 1 - Imprimir

Número de estações que divide o ano: 12

Tipo de simulação: Com garantia fixa anual

Volume inicial (hm3): 3283.42 Reserva de segurança (hm3): 164.17

Retirada na reserva de segurança (hm3/ano): 0.00

Número de garantias a simular: 1

Valores das garantias a simular (%): g(1) 80

**Dados Gerais do Reservatório**

Modulação sazonal das retiradas:

0.0833	0.08330	0.08330	0.08330	0.08330	0.08330
--------	---------	---------	---------	---------	---------

Distribuir Igualmente

Número de capacidades a simular: 1

Capacidades: 3.283.42

Volume mínimo do reservatório (hm3): 164.17

Número de cotas: 8

Cota (m)	Volume (hm3)
0.00	0.00
5.00	9.38
10.00	75.00

Modulação sazonal das evaporações:

0.01100	-0.04500	-0.06800	-0.05000	0.10100
---------	----------	----------	----------	---------

Distribuir Igualmente

Evaporação líquida anual (m): 1.03

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6 – Arquivo T3 do Simres

**Série de Vazões**

Vazões Históricas Sazonais

Nome do arquivo: 3747t3.dat

Título do Trabalho: 3747gt3.dat

Número de séries: 1

Horizonte de tempo: 5000

Estações: 12

Série:

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
v[1]	53.10	159.80	525.70	62.10	280.70	35.50
v[2]	5.30	6.80	91.80	23.40	4.40	7.20
v[3]	50.00	150.20	494.40	58.40	264.00	33.40
v[4]	4.10	1.60	26.00	16.90	8.60	4.20

Fonte: elaborado pelo autor.

Após a seleção dos arquivos, o SIMRES irá simular os reservatórios e informar, num arquivo gerado T4 (Figura 7) os valores dos volumes regularizados, evaporados e das sangrias referentes a todas as garantias e capacidades informadas previamente (o programa suporta até dez garantias e dez capacidades distintas por simulação).

Figura 7 – Arquivo T4 do SIMRES

```

Editor - [C:\Program Files (x86)\Simres\Simres\3747t4.dat]
srdados1 | 3747f.dat | 3747i3.dat | vr.dat | 3747t4.dat

Reservatório 75m
DEFLUVIO MEDIO (hm3/ano) 1675.73
COEF. VAR DOS DEFLUVIOS) 1.32

-----

CAPACIDADE DO RESERVATORIO = 3283.420(hm3)
RET. ABASTEC. ANUAL = 898.874(hm3)

FALHAS1 FALHAS2 FALHAS3 TOTAL MAXIMO ANOS FALHOS
31 29 463 5871 67 1000

VOLUME DE ALERTA = 164.17hm3
RETIRADA NO BUFFER = .00hm3/ano

ANOS ABAIXO DO MINIMO = 1000 FREQUENCIA = 20.00%
ANOS ABAIXO DO VOL. ALERTA = 0 FREQUENCIA = .00%
MESES ABAIXO DO MINIMO = 5871 FREQUENCIA = 9.78%
MESES ABAIXO DO VOL. SEG = 0 FREQUENCIA = .00%

MEDIA DAS SANGRIAS = 279.52hm3/ano
MEDIA DAS EVAPORACOES = 571.88hm3/ano
MEDIA DAS RET. IRRIG. = 825.18hm3/ano
MEDIA DAS RET. BUFFER = .00hm3/ano

-----

CAPACIDADE DO RESERVATORIO = 3283.420(hm3)
RET. ABASTEC. ANUAL = 720.631(hm3)

FALHAS1 FALHAS2 FALHAS3 TOTAL MAXIMO ANOS FALHOS
7 19 229 2780 65 500

VOLUME DE ALERTA = 164.17hm3
RETIRADA NO BUFFER = .00hm3/ano

ANOS ABAIXO DO MINIMO = 500 FREQUENCIA = 10.00%
ANOS ABAIXO DO VOL. ALERTA = 0 FREQUENCIA = .00%
MESES ABAIXO DO MINIMO = 2780 FREQUENCIA = 1.32%
MESES ABAIXO DO VOL. SEG = 0 FREQUENCIA = .00%

```

Fonte: elaborado pelo autor.

Além desta função principal, o SIMRES possui a opção de gerar séries sintéticas até 5.000 anos a partir do arquivo T3, para possibilitar os estudos na fase de equilíbrio. A nível anual, a geração de séries é feita a partir de um “modelo simultâneo e mutuamente exclusivo, em funções gama, log-normal e normal” (CAMPOS e STUDART, 2009). A nível mensal é utilizado o Método dos Fragmentos, proposto por Svanidze (1980).

#### 4. A ANÁLISE DA ADOÇÃO DO “PARADIGMA 2VA” NO NORDESTE BRASILEIRO

O presente capítulo irá tratar do primeiro objetivo deste trabalho, que consiste em estudar o “Paradigma 2Va” e mensurar quais os reais impactos a adoção indiscriminada deste parâmetro pode ocasionar na vazão regularizada de diversas configurações comuns de reservatório e investigar quais os fatores condicionam o “Paradigma 2Va” ser uma boa prática a ser adotada, e quais não, a partir da análise do comportamento de diversos rios do Nordeste Brasileiro.

As séries sintéticas selecionadas foram simuladas para as condições descritas considerando a capacidade do reservatório o dobro do volume afluente médio anual ( $f_K = 2,0$ ) no programa Simres e os respectivos fatores adimensionais de retirada resultantes estão informados na Tabela 2 para cada um dos quatro valores de  $\alpha$  assumidos.

Mesmo uma análise superficial dos dados obtidos na tabela, sem sequer usar ferramentas de análise mais complexas, revela que a adoção desse critério pode levar a valores bem discrepantes de  $f_M$ . Observa-se na tabela valores de  $f_M$  que correspondem ao máximo possível (que é o valor unitário) nos postos Barra do Corda e Santa Vitória e valores de  $f_M$  que correspondem ao mínimo possível (que é o valor nulo) no posto Malhada.

Mesmo com essa análise superficial, já o suficiente para refutar o “Paradigma 2Va”, uma vez que ele de forma alguma constitui um parâmetro confiável para dimensionamento, pois a variação de seus resultados é igual aos limites possíveis de valores de  $f_M$ . Portanto, adotar esse valor de fator adimensional de capacidade é incorrer em uma grande chance de não se otimizar a eficiência de regularização do reservatório. Como os casos analisados no Nordeste apresentaram grande diversidade de parâmetros ( $\mu$ , CV, El), vários valores de  $f_K$  devem ser testados para determinar o valor ideal para obter o  $f_M$  necessário.

Quando se analisa exclusivamente a evaporação líquida (El), nota-se que a (já esperada) diminuição do  $f_M$  conforme se aumenta o  $\alpha$  é mais acentuada quando os valores de evaporação líquida são superiores a 0,7 m/ano. Abaixo deste limite, a influência do valor de  $\alpha$  parece ser desprezível, pois o valor de  $f_M$  mantém-se praticamente constante para um mesmo posto.

Quando analisado o coeficiente de variação (CV) pode-se observar um grande correlação com  $f_M$ , que denota uma proporcionalidade inversa entre essas duas variáveis. Existe uma clara influência da evaporação líquida que impede que essa proporcionalidade seja perfeita, como pode ser visto nos postos Fazenda Coqueiro e Pedreiras II que possuem o CV semelhante, mas devido a evaporação líquida diferente, geram valores bem diversos de  $f_M$ .

Tabela 2 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$ 

Nome	UF	$\mu$ (hm <sup>3</sup> /ano)	CV	El (m/ano)	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
					$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,33	1,00	1,00	1,00	1,00
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	1,88	0,83	0,73	0,66	0,58
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	-0,53	0,97	0,96	0,96	0,96
Bacabal	MA	3363,88	0,38	-0,53	0,96	0,96	0,96	0,95
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	-0,76	0,94	0,93	0,93	0,92
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,30	0,94	0,94	0,94	0,93
Esperantina	MA	629,62	0,48	-0,53	0,91	0,91	0,91	0,90
Camaçari	PE	238,74	0,53	-0,76	0,87	0,86	0,85	0,84
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	1,84	0,80	0,74	0,69	0,65
Atalaia	BA	739,74	0,61	-0,76	0,87	0,86	0,85	0,84
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,30	0,90	0,89	0,89	0,89
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,13	0,86	0,86	0,86	0,86
Tiuma	SE	573	0,66	-0,74	0,83	0,82	0,81	0,81
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,34	0,84	0,84	0,84	0,84
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,05	0,80	0,80	0,80	0,80
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,34	0,80	0,79	0,79	0,79
Itambé	CE	699,77	0,76	0,53	0,81	0,80	0,80	0,80
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,76	0,76	0,74	0,72	0,71
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,53	0,80	0,79	0,79	0,79
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,30	0,80	0,80	0,80	0,80
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	1,70	0,53	0,40	0,32	0,22
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,72	0,66	0,65	0,64	0,59
Capivara	BA	108,73	1,00	1,17	0,61	0,56	0,53	0,49
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,24	0,67	0,67	0,67	0,67
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,56	0,63	0,62	0,61	0,61
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	1,70	0,54	0,47	0,43	0,38
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,56	0,61	0,60	0,59	0,58
Limoeiro	PI	163,24	1,25	1,22	0,49	0,45	0,42	0,38
Anagé	CE	146,74	1,27	0,53	0,57	0,56	0,55	0,55
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	1,84	0,43	0,36	0,31	0,25
Água Branca	PI	28,5	1,29	1,02	0,49	0,43	0,39	0,34
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	1,97	0,40	0,33	0,27	0,21
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	2,47	0,40	0,31	0,25	0,18
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	1,69	0,47	0,41	0,37	0,33
Caio Prado	AL	142,94	1,34	1,70	0,37	0,27	0,21	0,13
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,38	0,53	0,53	0,52	0,52
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	1,70	0,38	0,30	0,25	0,19
Iguatu	PE	929,67	1,50	1,70	0,38	0,33	0,30	0,26
Groairas	MA	201,88	1,58	1,70	0,30	0,21	0,16	0,09
Guarita	PE	552,05	1,58	0,76	0,43	0,42	0,41	0,40
Malhada	SE	70,07	1,64	2,42	0,02	0,00	0,00	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	1,70	0,23	0,15	0,08	0,01

Fonte: elaborado pelo autor.

Essa influência da evaporação líquida tende a ser mais intensa conforme os valores de  $\alpha$  aumentam e sobretudo quando CV é superior a 1,0. Conforme o CV aumenta as cores da

tabela tornam-se mais quentes (menores  $f_M$ ), principalmente na coluna onde o  $\alpha$  é 5.000. Essa correlação de cores tende a ficar menos evidente nos outros valores de  $\alpha$ , sobretudo quando a evaporação líquida é superior a 0,7m/ano, conforme pode-se observar em postos como Fazenda Coqueiro e Várzea Grande.

Quando o valor de CV é igual ou inferior a 0,83 e o valor da evaporação líquida não ultrapassa 0,76 m/ano, temos um indicativo de excelentes taxas de regularização (cores esverdeadas). Mesmo quando a evaporação é mais alta, como no caso da Fazenda Coqueiro e da Barra do Lance, pode acontecer um médio desempenho em bacias mais planas (cores amareladas).

Os valores médios começam a aparecer a partir do coeficiente de variação por volta de 1,0 e em situações de evaporação líquida menores do que 1,70 m/ano. Quando os valores ultrapassam CV=1,0 e EI = 1,70m/ano, os valores já começam a serem considerados baixos em bacias mais planificadas.

Como valores de CV>1,0 e EI=1,70m/ano são característicos do Semiárido Nordestino fica evidente a importância de escolhas bacias mais íngremes para a implantação dos reservatórios e justifica também a inexistência de grandes reservatórios nos litorais, onde os  $\alpha$  tende a ser maiores. Além disso, para esses valores característicos do Semiárido Nordestino, o paradigma  $f_K = 2,0$  não consegue obter valores de  $f_M$  superiores a 0,6.

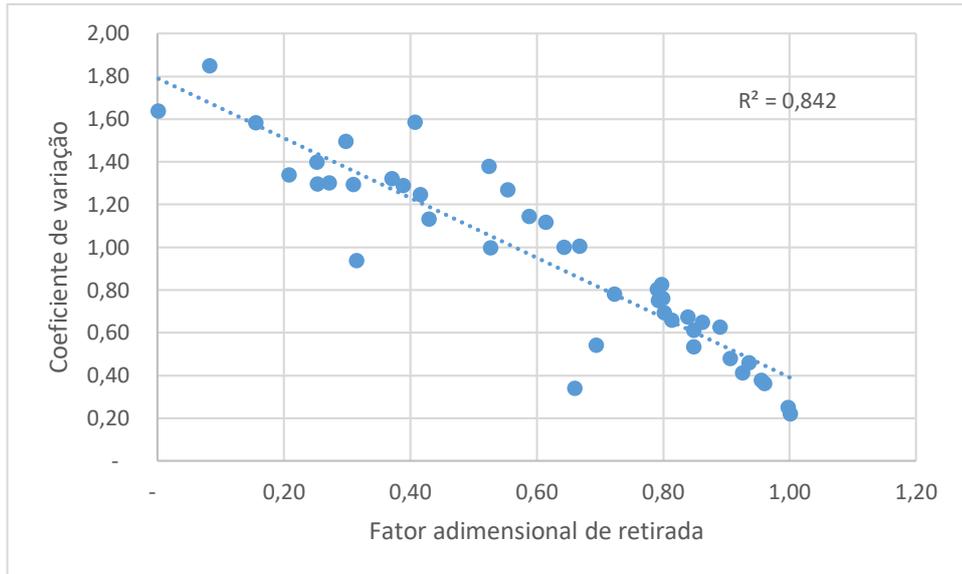
Quando os valores de CV e EI são extremos, como é o caso de Groairas, Malhada e Cristais, há regularizações bem baixas.

Partindo para uma análise mais detalhada e deixando essa prospecção qualitativa e subjetiva de lado, foram escolhidos o coeficiente de variação, evaporação líquida anual e volume afluente médio como parâmetros para avaliar de detalhadamente o paradigma do  $f_K = 2,0$ .

#### **4.1 Influência do coeficiente de variação**

Mesmo com valores de evaporação líquida diferentes, pôde-se observar anteriormente que existe uma certa correlação entre o coeficiente de variação e o fator de adimensional de retirada. Quando se expõe o gráfico correspondente a  $\alpha = 40.000$ , por exemplo, tem-se:

Figura 8 – Fator adimensional de retirada em função do coeficiente de variação para  $fk=2,0$  e  $\alpha=40.000$



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela Figura 8 acima pode-se observar uma forte correlação entre as duas variáveis, uma vez que o  $R^2$  foi maior que 0,7. Quando realizado a regressão para os demais valores de  $\alpha$ , obtém-se os seguintes valores da Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficiente de correlação  $R^2$  entre o fator adimensional de retirada e o coeficiente de variação para diversos valores de fator de forma da bacia e  $fk=2,0$

Fator de forma da bacia ( $\alpha$ )	$R^2$
5.000	0,93
20.000	0,89
40.000	0,84
75.000	0,83

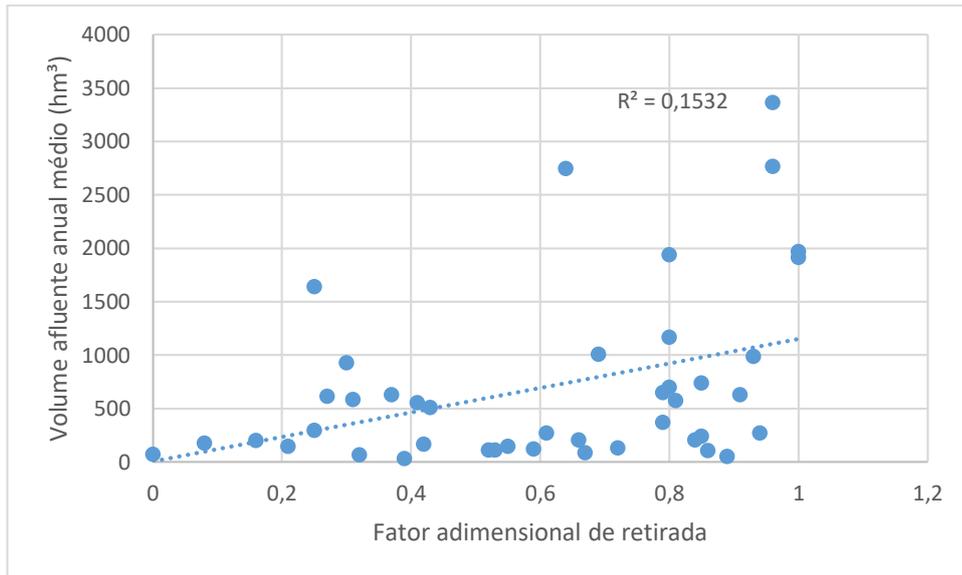
Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da tabela acima, pode-se concluir que, conforme o fator de forma da bacia vai se tornando maior, menor se torna correlação do fator adimensional de retirada e o coeficiente de correlação. Entretanto, mesmo em situações extremas ( $\alpha = 75.000$ ), o coeficiente de variação segue sendo um importante parâmetro para a determinação do fator adimensional de retirada quando se assume o “Paradigma  $fk=2,0$ ”. Caso as barragens aqui simuladas fossem construídas de verdade, seria notado uma enorme variação do fator adimensional de retirada aos quais os valores seriam condicionados fortemente pelo coeficiente de variação.

#### 4.2 Influência do volume afluente médio anual

De forma análoga ao que foi apresentado no item anterior, a Figura 9 representa a plotagem do gráfico do fator adimensional de retirada em função do volume afluente médio anual em um caso que o  $\alpha=40.000$ .

Figura 9 – Fator adimensional de retirada em função do volume afluente médio anual para  $fk=2,0$  e  $\alpha=40.000$



Fonte: elaborado pelo autor.

Pelo gráfico, percebe-se pelo valor de  $R^2$ , como o volume afluente médio anual possui uma influência muito menor no adimensional de retirada se comparado ao coeficiente de variação e, portanto, não é um valor importante para definir o impacto do parâmetro de  $fk$  estudado.

Tabela 4 – Coeficiente de correlação  $R^2$  entre o fator adimensional de retirada e o volume afluente médio anual para diversos valores de fator de forma da bacia e  $fk=2,0$

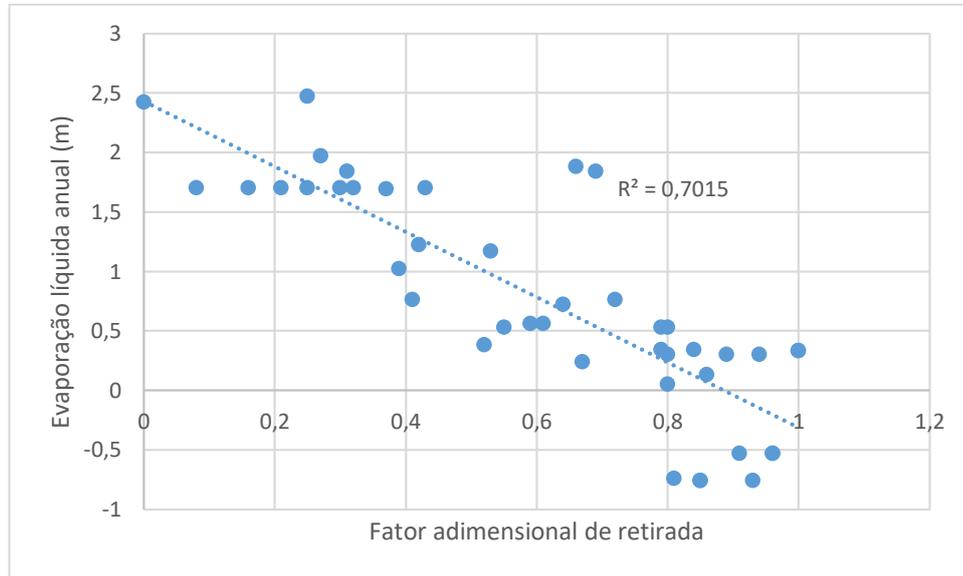
Fator de forma da bacia ( $\alpha$ )	$R^2$
5.000	0,15
20.000	0,15
40.000	0,15
75.000	0,14

Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.3 Influência da evaporação líquida anual

Do mesmo modo que foi apresentado nos itens anteriores, a Figura 10, mostra o comportamento da vazão regularizada para o  $\alpha=40.000$ .

Figura 10 – Fator adimensional de retirada em função da evaporação líquida anual para  $fk=2,0$  e  $\alpha=40.000$



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela forma do gráfico acima, pode-se observar a já esperada tendência de diminuição do fator adimensional de retirada conforme a evaporação líquida aumenta. O valor utilizado para essa correlação é o valor integral anual e, portanto, mesmo não se levando em consideração a suas distribuições sazonais, observou-se uma certa correlação e a utilização da evaporação líquida anual como parâmetro comparativo no Nordeste apresenta um desempenho razoável.

Os valores de correlação para os demais valores de  $\alpha$  encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficiente de correlação  $R^2$  entre o fator adimensional de retirada e a evaporação líquida para diversos valores de fator de forma da bacia e  $fk=2,0$

Fator de forma da bacia ( $\alpha$ )	$R^2$
5.000	0,60
20.000	0,67
40.000	0,70
75.000	0,72

Fonte: elaborado pelo autor.

Como pode ser observado pelo gráfico acima, a evaporação líquida anual cresce em correlação conforme as bacias se tornam mais aplainadas, fenômeno esperado, devido ao aumento do espelho d'água. Portanto, se incorre em maiores erros de dimensionamento ao se desprezar a evaporação líquida em bacias com maiores  $\alpha$ .

Um detalhe importante na tabela de resultado deste trabalho (Tabela 2) é a pouca variação de fator adimensional de retirada quando se altera o  $\alpha$  em certas bacias. No geral, essa certa constância ocorre em valores baixos de evaporação líquida anual (menores que 0,7m/ano) e baixos valores de CV (menores que 1,0). Esses valores, como já discutidos anteriormente representam também altos valores de fator adimensional de retirada e, portanto, altos valores de vazão regularizada.

Para se mensurar de forma matemática tal observação, foi confeccionada a seguinte Tabela 6, onde se exhibe o código e o nome de cada posto estudado, bem como seus coeficientes de variação e evaporação líquida anual (o volume afluente médio anual não foi exibido devido a sua baixa correlação com o fator adimensional de retirada). Por fim, na última coluna, é informada a variação do fator adimensional de retirada correspondentes aos valores extremos de  $\alpha$  utilizados. Em outras palavras, corresponde a perda de fator adimensional de retirada quando se varia o fator de forma da bacia de forma entre os valores escolhidos.

Como explicado anteriormente, o valor de  $\alpha = 75.00$  é valor pouco utilizado, pois representa lagos pouco profundos. Lagos pouco profundos tendem a ser mais sensíveis a evaporação, pois apresentam maior área superficial, portanto, pode-se considerar que se está trabalhando com uma boa margem de segurança ao se estudar essa variação do fator adimensional de regularização com relação ao  $\alpha$ .

Analisando a última coluna, pode-se constatar que o  $\alpha$  só começa a realmente ter impacto significativo em valores altos de evaporação líquida ( $E_l > 0,7\text{m/ano}$ ) e coeficiente de variação ( $CV > 1,0$ ) considerando-se que pode considerar significativo os valores onde a diferença de vazão entre topografias diferente é maior que 5%. Em outras palavras, quando o  $f_k = 2,0$ ,  $E_l < 0,7\text{m/ano}$  e  $CV < 1,0$ , pode-se de fato desconsiderar a topografia sem incorrer em grandes erros de dimensionamento, essa conclusão vai de encontro com a consideração de metodologia de países mais frios e de rios perenes, como o Diagrama de Rippl (1889), que ignoram a topografia da bacia e as taxas evaporativas da região.

Tabela 6 – Variação da vazão regularizada com relação ao  $\alpha=5.000$  e  $\alpha=75.000$  para  $f_k=2,0$ 

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>CV</b>	<b>El(m/ano)</b>	<b><math>\Delta f_M</math> com relação a <math>\alpha</math></b>
33250000	Barra Do Corda	0,22	0,33	0
33260000	Santa Vitória	0,25	0,33	0
46490000	Fazenda Coqueiro	0,34	1,88	0,24
33281000	Pedreiras Ii	0,36	-0,53	0,01
33290000	Bacabal	0,38	-0,53	0,01
39770000	Fazenda Boa Fortuna	0,41	-0,76	0,02
51560000	Nazaré	0,46	0,3	0,01
33170000	Esperantina	0,48	-0,53	0,01
39980000	Camaçari	0,53	-0,76	0,04
34270000	Barra Do Lance	0,54	1,84	0,15
39870000	Atalaia	0,61	-0,76	0,03
51840000	Tesouras	0,63	0,3	0,01
50047000	Rosário Do Catete	0,65	0,13	0
39185000	Tiuma	0,66	-0,74	0,02
50840000	Mata De São João	0,67	0,34	0,01
33620000	Fazenda Sobral	0,69	0,05	0
50755000	Ponte Da Ba-6	0,75	0,34	0,01
53650000	Itambé	0,76	0,53	0,01
38750000	Mulungu	0,78	0,76	0,05
53620000	Cândido Sales	0,8	0,53	0,01
52695000	Vapor	0,83	0,3	0
37220000	Várzea Grande	0,94	1,7	0,31
34770000	Prata Do Piauí	1	0,72	0,07
39540000	Capivara	1	1,17	0,12
50250000	Fazenda Tourão	1	0,24	0,01
51460000	Ponte Rio Branco	1,12	0,56	0,02
37380000	Pau Ferrado	1,13	1,7	0,16
51440000	Riachão Do Jacuípe	1,14	0,56	0,03
39145000	Limoeiro	1,25	1,22	0,11
52370000	Anagé	1,27	0,53	0,02
34480000	Fazenda Talhada	1,29	1,84	0,18
50146000	Água Branca	1,29	1,02	0,15
37080000	Pedra De Abelhas	1,3	1,97	0,19
37470000	Jardim De Piranhas	1,3	2,47	0,22
36580000	Morada Nova Ii	1,32	1,69	0,14
35830000	Caio Prado	1,34	1,7	0,24
38170000	Ceará-Mirim	1,38	0,38	0,01
36470000	Senador Pompeu	1,4	1,7	0,19
36160000	Iguatu	1,5	1,7	0,13
35260000	Groairas	1,58	1,7	0,21
38880000	Guarita	1,58	0,76	0,03
36045000	Malhada	1,64	2,42	0,02
35950000	Cristais	1,85	1,7	0,22

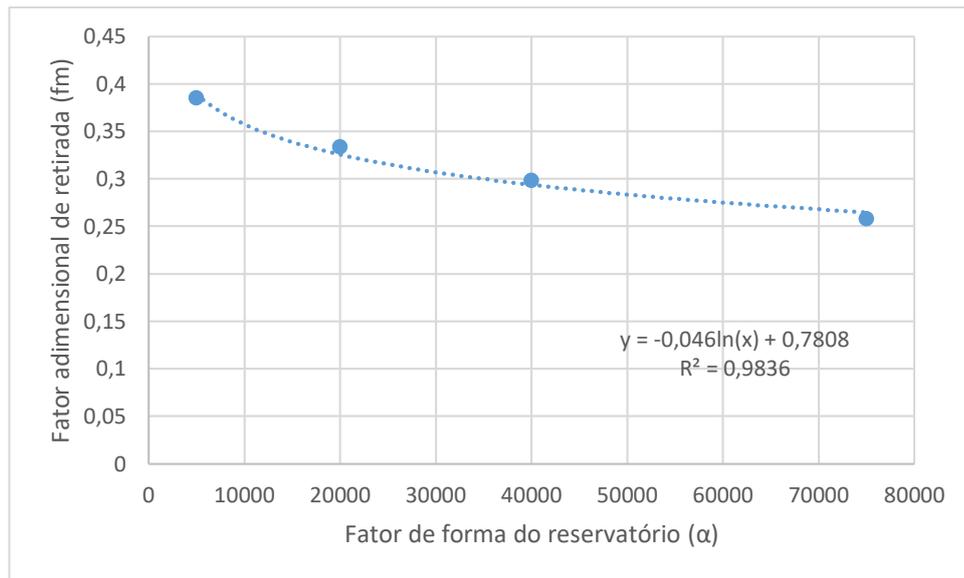
Fonte: elaborado pelo autor.

O posto 36045000 – Malhada, apesar de ter um dos maiores valores de CV e Evaporação Líquida possui diferença de vazões regularizadas por  $\alpha$  pequenos, pois sua taxa de regularização já era baixíssima e tornou-se nula com o  $\alpha$ .

#### 4.4 Influência do fator de forma dos reservatórios

Quanto ao comportamento dos postos estudados quando se varia a topografia do reservatório (aqui representados pelo fator  $\alpha$ ), o fator adimensional de retirada tende a variar em função praticamente logarítmica, como pode ser observado por exemplo no gráfico do posto Iguatu.

Figura 11 – Influência do fator de forma no fator adimensional de retirada do Rio Iguatu para um  $fk=2,0$



Fonte: elaborado pelo autor.

Praticamente todos os demais postos estudados apresentam tal comportamento logarítmico, podendo-se, portanto, caracterizar a vazão regularizada em cada posto com a seguinte equação abaixo:

$$f_M = m \cdot \ln(\alpha) + c \quad (9)$$

Onde “m” e “c” são parâmetros correspondentes à própria estação e podem ser encontradas na Tabela 7, que também informa o coeficiente de correlação  $R^2$  para a equação logarítmica acima.

Tabela 7 – Coeficientes "m" e "c" das bacias estudadas para um  $f_k=2,0$ 

Nome	m	c	R <sup>2</sup>	Nome	m	c	R <sup>2</sup>
Esperantina	-0,004	0,9494	0,97	Guarita	-0,011	0,5234	0,98
Barra do Corda	-0,001	1,0143	0,98	Limoeiro	-0,041	0,8495	0,98
Santa Vitória	-0,001	1,0092	0,95	Tiuma	-0,009	0,905	0,98
Pedreiras II	-0,003	0,9894	0,98	Capivara	-0,043	0,9826	0,98
Bacabal	-0,003	0,9825	0,98	Fazenda Boa Fortuna	-0,008	1,0124	0,98
Fazenda Sobral	-0,0002	0,8038	0,95	Atalaia	-0,009	0,9461	0,98
Barra do Lance	-0,054	1,2643	0,98	Camaçari	-0,013	0,9854	0,98
Fazenda Talhada	-0,064	0,9775	0,98	Fazenda Coqueiro	-0,088	1,588	0,98
Prata do Piauí	-0,023	0,869	0,64	Rosário do Catete	-0,0004	0,8658	0,78
Groairas	-0,076	0,9563	0,98	Água Branca	-0,055	0,9667	0,98
Caio Prado	-0,086	1,1106	0,98	Fazenda Tourão	-0,002	0,6934	0,98
Cristais	-0,08	0,9202	0,98	Ponte da BA-6	-0,002	0,8186	0,98
Malhada	-0,007	0,0772	0,78	Mata de São João	-0,003	0,8693	0,97
Iguatu	-0,043	0,7516	0,98	Riachão do Jacuípe	-0,01	0,6899	0,98
Senador Pompeu	-0,067	0,9612	0,98	Ponte Rio Branco	-0,007	0,6896	0,98
Morada Nova II	-0,052	0,9216	0,98	Nazaré	-0,002	0,959	0,98
Pedra de Abelhas	-0,069	1,0015	0,98	Tesouras	-0,004	0,9284	0,88
Várzea Grande	-0,112	1,4896	0,98	Anagé	-0,008	0,6353	0,98
Pau Ferrado	-0,058	1,0348	0,98	Vapor	-0,001	0,8125	0,96
Jardim de Piranhas	-0,079	1,0854	0,98	Cândido Sales	-0,005	0,8415	0,98
Ceará-Mirim	-0,005	0,5788	0,98	Itambé	-0,005	0,8481	0,98
Mulungu	-0,018	0,9101	0,98				

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme se observa na tabela acima, os valores  $R^2$  são praticamente todos maiores que 0,95, indicando que a equação é um bom parâmetro para representar o comportamento das bacias em função de seu fator de forma do reservatório ( $\alpha$ ). Apenas Prata do Piauí, Malhada, Rosário do Catete e Tesouras não seguem esses valores, entretanto, mesmo esses três últimos citados possuem  $R^2$  maior que 0,7, que é o suficiente para caracterizar uma correlação forte. De fato, apenas a estação Prata do Piauí não ultrapassou esse limite, embora tenha ficado próximo.

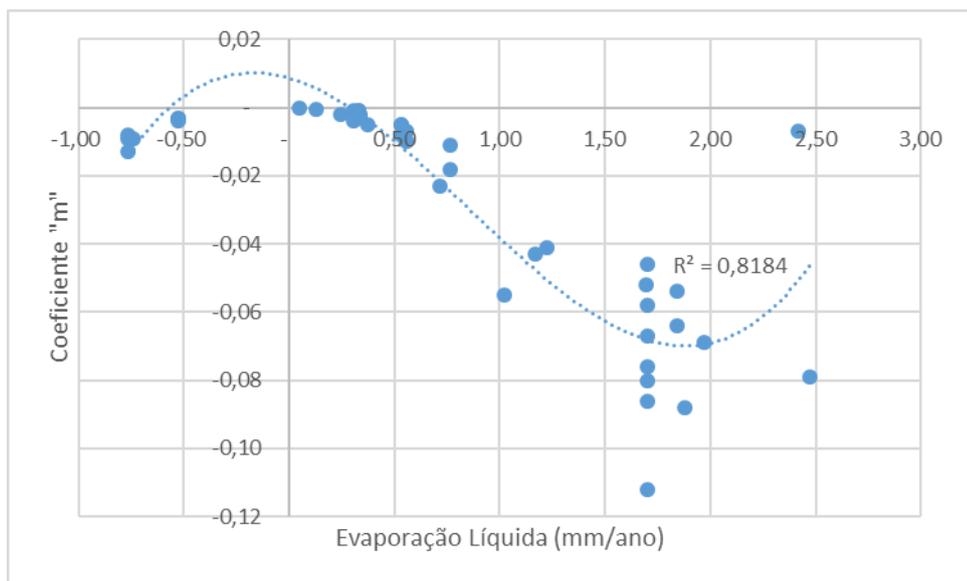
Como os valores analisados neste trabalho consideram a capacidade do reservatório como sendo o dobro do volume afluente anual, não é correto afirmar que os reservatórios que não excedem esses limites de CV e El foram prejudicados por usar esse parâmetro, uma vez que apresentaram alto fator adimensional de retirada. Entretanto, tais valores não se encontram na região mais sensível do Nordeste, que é o Semiárido. De fato, além do valor de  $f_k=2,0$  gerar valores baixos de fator adimensional de retirada ainda são extremamente dependentes de uma determinação correta dos valores de evaporação líquida e da caracterização topográfica da bacia.

Tal conclusão pode ser matematicamente demonstrada quando se analisa o coeficiente "m" das equações características da topografia de cada posto. Esse coeficiente, que é sempre negativo, é o responsável na fórmula pela diminuição do fator adimensional de retirada. A

Figura 12, apresenta o gráfico da relação entre esse coeficiente e a evaporação líquida anual do seu respectivo posto.

O gráfico apresenta a forte correlação entre esses dois fatores (0,8184) e explicita a mudança de comportamento que ocorre quando a evaporação passa de 0,7m/ano: ocorre o “m” cresce consideravelmente e, portanto, aumentando o impacto negativo para com a vazão regularizada e justificando o cuidado que se deve ter com a topografia em regiões semiáridas.

Figura 12 – Correlação entre o coeficiente "m" e a evaporação líquida para os postos estudados

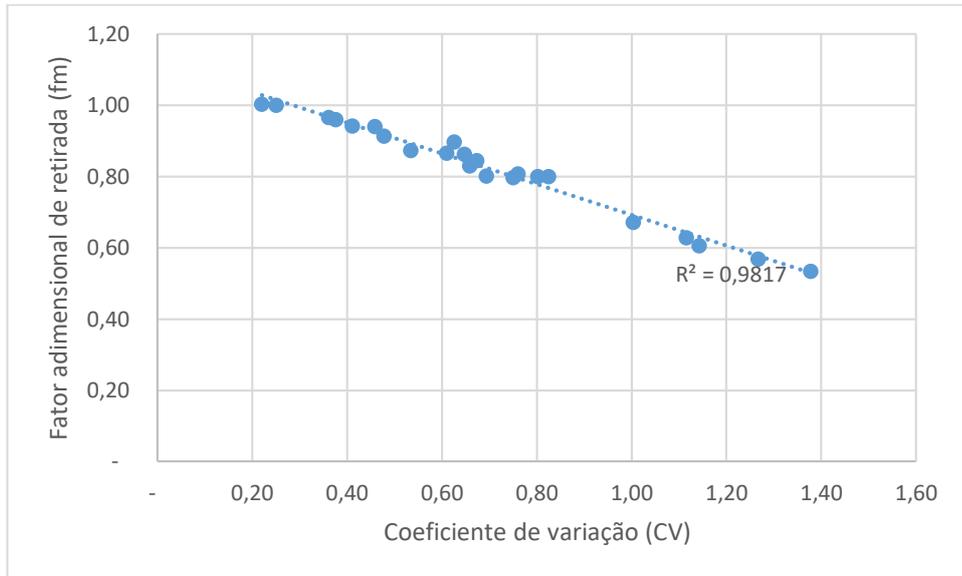


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.5 Estudo do comportamento de reservatório com $fk=2,0$

Como discutido anteriormente o coeficiente de variação parece ter mais influência na regularização quando a evaporação líquida é menor que 0,7m/ano, podendo esse ser considerado o limite pelo qual os fatores topográficos começam a ter influência. Quando analisados os postos que possuem esses valores de evaporação líquida e descartados os demais, percebe-se que a correlação é de fato muito alta e segue um padrão linear, como pode ser depreendido da Figura 13 abaixo, que mostra os valores referente a  $\alpha=5.000$ .

Figura 13 – Correlação entre o coeficiente de variação e o coeficiente regularizado para  $\alpha=5.000$ ,  $El<0,7m/ano$ ;  $fk=2,0$



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 8 abaixo mostra os demais valores de  $R^2$  para os  $\alpha$  analisados. Também são exibidos os valores da regressão linear.

$$(f_M = a \cdot CV + b) \tag{10}$$

Tabela 8 – Regressão linear para  $El<0,7m/ano$

Alfa	a	b	$R^2$
5.000	-0,431	1,1232	0,9817
20.000	-0,4343	1,1205	0,979
40.000	-0,4369	1,1188	0,9769
75.000	-0,4397	1,1167	0,9735

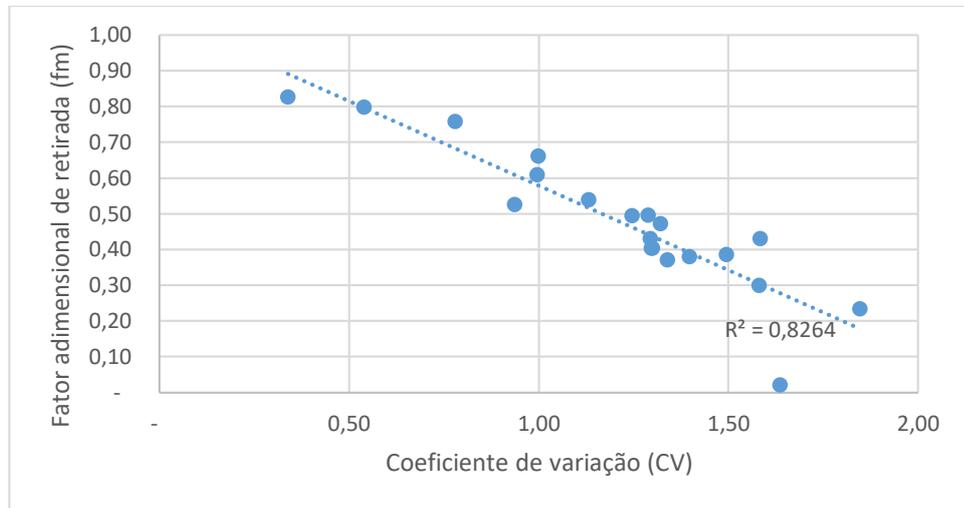
Fonte: elaborado pelo autor.

Além de todos os valores de  $R^2$  serem altos para todos os  $\alpha$ , ao se analisar “a” e “b”, nota-se a semelhança entre esses valores qualquer que seja o  $\alpha$ , explicando, portanto, a pouca variação do fator adimensional de retirada em relação à topografia, para postos com baixa evaporação líquida. Seguindo o princípio da parcimônia, pode-se caracterizar uma equação de dimensionamento válida para o caso  $fk=2,0$ ;  $El<0,7m/ano$ :

$$f_M = (-0,43 \cdot CV) + 1,12 \tag{11}$$

Quando se coloca graficamente os valores correspondentes à evaporação líquida maior que 0,7m/ano, percebe-se que há uma menor correlação entre  $f_M$  e CV, do que quando a evaporação é maior que 0,7 m/ano. A Figura 14 mostra um exemplo para o caso de  $\alpha=5000$ .

Figura 14 – Correlação entre o coeficiente de variação e o fator adimensional de retirada para  $\alpha =5.000$ ;  $E_l > 0,7$  m/ano;  $f_k=2,0$



Fonte: elaborado pelo autor.

A tabela x informa os coeficientes de regressão linear para os demais fatores de forma do reservatório, e seus respectivos  $R^2$ .

Tabela 9 – Regressão linear para  $E_l > 0,7$ m/ano

Alfa	a	b	$R^2$
5.000	-0,4728	1,0517	0,8264
20.000	-0,4654	0,9805	0,7718
40.000	-0,4577	0,9279	0,7184
75.000	-0,4447	0,8611	0,6536

Fonte: elaborado pelo autor.

Se comparados com os valores de “a” e “b”, nota-se que os valores aqui não são mais tão próximos como em evaporações líquidas menores, mostrando matematicamente, portanto, que a topografia é de essencial importância para determinação líquida em regiões com evaporações altas.

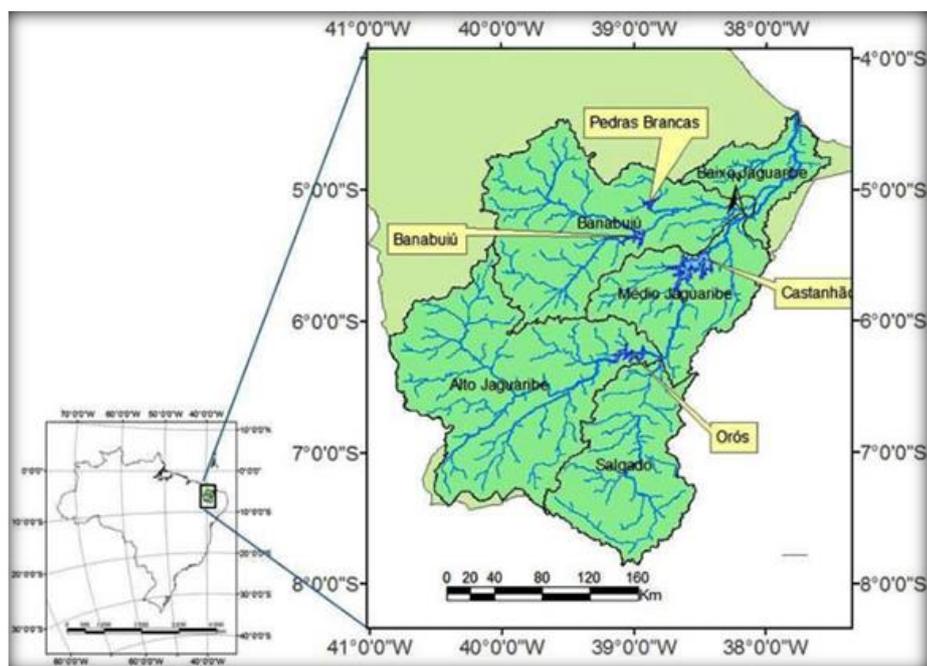
## 5 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS NA BACIA DO RIO JAGUARIBE

O presente capítulo irá tratar do segundo objetivo deste trabalho, que tem como meta descrever o comportamento da vazão regularizada em reservatórios na Bacia do Rio Jaguaribe, gerando uma metodologia de dimensionamento de reservatório apropriada para a região, que leve em consideração a influência de cada característica hidroclimática e morfológica.

### 5.1 Caracterização da Bacia do Rio Jaguaribe

A Bacia do Rio Jaguaribe (FIGURA 15) transporta a quase totalidade de suas águas para o abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza, correspondendo a uma população atendida de mais de quatro milhões de pessoas (ANA, 2010). O rio tem a extensão de 633 quilômetros e drena uma área que corresponde a 45% da área total do Ceará, e é dividida para fins de gerenciamento em cinco regiões: Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Salgado e Banabuiú (CSBH Médio Jaguaribe, 2019). Nesta bacia se encontram os três açudes com maior capacidade do Estado: Castanhão, Orós e Banabuiú, respectivamente.

Figura 15 – Bacia do Rio Jaguaribe



Fonte: Leão et al (2013)

Quanto aos aspectos climáticos, existem quatro normais climatológicas do INMET

(2010) presentes na bacia. Nessa região, as precipitações são tipicamente ocorrem nos primeiros meses do ano, causada essencialmente pela presença da ZCIT (TABELA 10). A sua posição equatorial combinada com seu clima semiárido ocasiona enormes taxas de evaporação (TABELA 11), aos quais, como pode se ver pela sua Tabela 12 de evaporação líquida, quase sempre superam o volume precipitado.

Tabela 10 – Precipitação média mensal (mm)

Posto	UF	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
IGUATU	CE	133,8	167,3	221,2	196,8	102,7	27,6	12,6	14,4	12,3	19	7,9	67,5	983,1
JAGUARUANA	CE	62,9	92	192,1	186,8	107,3	43,6	17,3	7,1	2,6	2,2	0,8	9,4	724,1
MORADA NOVA	CE	83,6	99,6	168,5	177,8	104,8	66,1	22,3	10	1,5	3	1,7	27	765,9
QUIXERAMOBIM	CE	87,7	77,8	146,2	173,1	105,2	55,3	23,4	16,3	2,3	1,3	3,3	20,9	712,8

Fonte: INMET (2010)

Tabela 11 – Evaporação média mensal (mm)

Posto	UF	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
IGUATU	CE	198,7	132,5	111,7	92,3	137,3	205,7	277,9	331,9	319,6	301,6	303,3	273,4	2685,9
JAGUARUANA	CE	213	167	137,1	100,4	113,2	145,9	194,5	249	275,6	278,5	258,1	249,1	2381,4
MORADA NOVA	CE	218,3	165,1	135	118	134,5	160,5	208,8	236	268,7	284,2	268,4	261,8	2459,3
QUIXERAMOBIM	CE	224,3	183,3	144,2	125,9	120,6	149,5	197,6	239,3	307,1	292,9	278,8	266,2	2529,7

Fonte: INMET (2010)

Tabela 12 – Evaporação líquida média mensal (mm)

Posto	UF	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
IGUATU	CE	64,9	-34,8	-109,5	-104,5	34,6	178,1	265,3	317,5	307,3	282,6	295,4	205,9	1702,8
JAGUARUANA	CE	150,1	75	-55	-86,4	5,9	102,3	177,2	241,9	273	276,3	257,3	239,7	1657,3
MORADA NOVA	CE	134,7	65,5	-33,5	-59,8	29,7	94,4	186,5	226	267,2	281,2	266,7	234,8	1693,4
QUIXERAMOBIM	CE	136,6	105,5	-2	-47,2	15,4	94,2	174,2	223	304,8	291,6	275,5	245,3	1816,9

Fonte: INMET (2010)

Quanto aos fatores topográficos, Campos (2005) apresenta uma boa amostragem de reservatório (quarenta) já construídos e com seu respectivo fator de forma do reservatório ( $\alpha$ ), aos quais encontram-se reproduzidos na Tabela 13, onde os valores variam entre aproximadamente cem até em torno de quarenta mil.

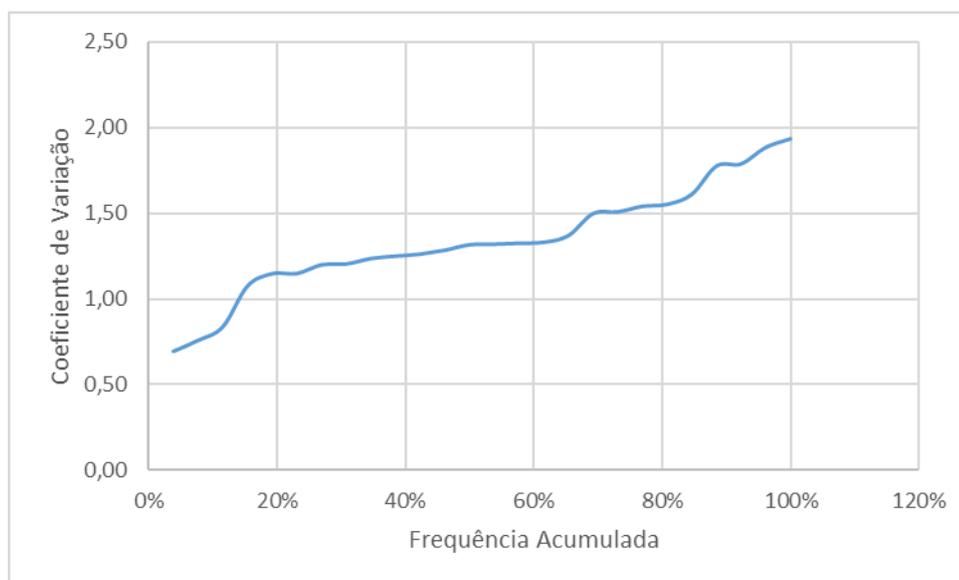
Tabela 13 – Fator de Forma da Bacia ( $\alpha$ ) de barragens na bacia Jaguaribe

Nome	$\alpha$	Nome	$\alpha$	Nome	$\alpha$
Atalho II	2.524,78	Lima Campos	34.204,49	Riacho dos Tanques	7.395,83
Banabuiú	10.529,16	Nobre	10.054,62	Riacho Verde	2.985,96
Boa Viagem	3.008,00	Nova Floresta	2.007,16	Rivaldo de Carvalho	14.858,32
Broco	6.377,55	Olho D'Água	1.792,39	Santo Ant. de Russas	29.700,00
Canafístula	9.857,25	Orós	37.097,24	São José II	5.933,24
Canoas	870,99	Patu	2.659,26	Serafim Dias	39.929,77
Cedro	37.333,33	Pedras Brancas	22.049,48	Thomas Osterne	1.842,56
Cipoada	12.997,75	Poço da Pedra	4.695,72	Trapiá II	1.315,83
Ema	5.324,80	Poço de Barro	15.407,41	Trici	3.673,09
Favelas	10.969,39	Prazeres	338,29	Trussu	7.661,36
Fogareiro	5.025,82	Quixabinha	1.476,40	Varzea do Boi	23.577,61
Gomes	121,42	Quixeramobim	14.501,02	Vinícios Berredo	22.052,02
Ingazeiro	2.763,67	R do Carneiros	945,96		
Joaquim Tavora	8.622,45	Riacho do Sangue	12.501,53		

Fonte: adaptado de Campos (2005)

O clima extremamente variável reflete também em seus regimes fluviais. Utilizando uma amostra aleatória de 26 postos fluviométricos medidores de vazão espalhados pela bacia hidrográfica, obtidos no site do Hidroweb, foi confeccionado a seguinte curva de frequências acumuladas.

Figura 16 – Frequência acumulada de vazões afluentes na Bacia do Rio Jaguaribe



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela curva acima, pode-se concluir que a mais de 80% dos postos da amostra possuem o coeficiente de variação maior que 1,0, que significa uma região de vazões altamente variáveis e de bastante risco hidrológico associado.

As altas taxas de evaporação líquida e os grandes valores de coeficiente de variação são os grandes responsáveis por baixas regularizações de vazão, e, portanto, os estudos dessa natureza jamais devem negligenciar tais características. É extremamente necessário que se produzam estudos contínuos para o aperfeiçoamento dessa técnica muito importante para essa região do mundo tão fragilizada em termos hidrológicos e sociais.

## 5.2 Vazões regularizadas na Bacia do Rio Jaguaribe

As séries escolhidas foram simuladas em vinte reservatórios, cada um caracterizado com um valor de par ordenado diferente  $(f_K; \alpha)$  onde  $f_K$  pode assumir os valores do conjunto  $\{1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 6,0\}$  e  $\alpha$  do conjunto  $\{5.000, 20.000, 40.000, 75.000\}$ . Os valores de  $f_K = 6,0$  e  $\alpha = 75.000$  são valores não usuais e exagerados, mas foram utilizados para contemplar um amplo comportamento da vazão regularizada na Bacia do Rio Jaguaribe. Portanto, foram realizadas 860 simulações.

Devido à grande correlação que existe entre o coeficiente de variação e o fator adimensional de retirada, todos os dados dos 43 postos estudados foram “transportados” para as condições climáticas da região da Bacia do Rio Jaguaribe. A evaporação líquida atuante considerada nas simulações em cada série histórica foi realizada com a normal climatológica de evaporação líquida de Iguatu, que aqui é considerada representativa do vale do Jaguaribe (1,7m/ano) ao invés da respectiva normal climatológica. Portanto, as conclusões deste trabalho só serão válidas para condições hidroclimáticas semelhantes.

A Tabela 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os respectivos resultados para cada valor de  $f_K$  assumido.

Tabela 14 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$  para  $f_K = 1,0$ 

Nome	UF	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	CV	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
				$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,94	0,92	0,90	0,88
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,93	0,91	0,89	0,87
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	0,90	0,80	0,76	0,72
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	0,87	0,84	0,83	0,81
Bacabal	MA	3363,88	0,38	0,84	0,82	0,81	0,79
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	0,80	0,77	0,75	0,73
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,77	0,72	0,69	0,65
Esperantina	MA	629,62	0,48	0,74	0,69	0,67	0,63
Camaçari	PE	238,74	0,53	0,70	0,65	0,62	0,58
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	0,71	0,68	0,65	0,63
Atalaia	BA	739,74	0,61	0,68	0,65	0,62	0,60
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,63	0,54	0,48	0,41
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,61	0,55	0,50	0,45
Tiuma	SE	573	0,66	0,64	0,60	0,57	0,54
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,61	0,56	0,53	0,49
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,58	0,55	0,53	0,50
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,57	0,53	0,50	0,46
Itambé	CE	699,77	0,76	0,60	0,57	0,55	0,52
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,51	0,45	0,41	0,36
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,58	0,55	0,52	0,49
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,62	0,59	0,58	0,55
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	0,44	0,36	0,30	0,23
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,45	0,42	0,40	0,38
Capivara	BA	108,73	1,00	0,39	0,33	0,28	0,23
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,38	0,31	0,26	0,20
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,37	0,32	0,29	0,25
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	0,43	0,38	0,35	0,31
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,33	0,27	0,22	0,17
Limoeiro	PI	163,24	1,25	0,31	0,25	0,21	0,16
Anagé	CE	146,74	1,27	0,32	0,26	0,22	0,17
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	0,32	0,28	0,25	0,22
Água Branca	PI	28,5	1,29	0,24	0,14	0,06	0,00
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	0,30	0,26	0,24	0,21
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	0,34	0,31	0,29	0,27
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	0,34	0,30	0,28	0,25
Caio Prado	AL	142,94	1,34	0,26	0,20	0,15	0,11
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,26	0,20	0,15	0,10
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	0,26	0,21	0,18	0,14
Iguatu	PE	929,67	1,50	0,26	0,22	0,20	0,17
Groairas	MA	201,88	1,58	0,20	0,15	0,11	0,06
Guarita	PE	552,05	1,58	0,24	0,20	0,17	0,14
Malhada	SE	70,07	1,64	0,15	0,07	0,02	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	0,16	0,10	0,06	0,02

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$  para  $f_K = 1,5$ 

Nome	UF	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	CV	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
				$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,95	0,92	0,90	0,87
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,94	0,91	0,89	0,87
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	0,86	0,79	0,75	0,69
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	0,90	0,88	0,86	0,84
Bacabal	MA	3363,88	0,38	0,89	0,87	0,85	0,83
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	0,85	0,82	0,79	0,76
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,81	0,75	0,70	0,66
Esperantina	MA	629,62	0,48	0,79	0,74	0,71	0,67
Camaçari	PE	238,74	0,53	0,75	0,68	0,64	0,59
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	0,78	0,74	0,71	0,67
Atalaia	BA	739,74	0,61	0,76	0,71	0,68	0,65
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,67	0,56	0,48	0,39
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,67	0,59	0,53	0,46
Tiuma	SE	573	0,66	0,71	0,66	0,62	0,59
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,68	0,61	0,57	0,51
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,67	0,63	0,60	0,56
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,65	0,59	0,55	0,51
Itambé	CE	699,77	0,76	0,68	0,63	0,60	0,56
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,58	0,51	0,45	0,38
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,66	0,61	0,58	0,54
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,69	0,66	0,63	0,61
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	0,49	0,39	0,31	0,23
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,55	0,51	0,49	0,47
Capivara	BA	108,73	1,00	0,47	0,39	0,32	0,26
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,45	0,36	0,29	0,22
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,45	0,39	0,34	0,29
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	0,49	0,44	0,40	0,36
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,40	0,32	0,26	0,19
Limoeiro	PI	163,24	1,25	0,37	0,30	0,25	0,19
Anagé	CE	146,74	1,27	0,38	0,30	0,25	0,19
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	0,39	0,34	0,30	0,26
Água Branca	PI	28,5	1,29	0,28	0,15	0,05	0,00
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	0,38	0,33	0,29	0,25
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	0,41	0,38	0,35	0,32
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	0,42	0,37	0,33	0,29
Caio Prado	AL	142,94	1,34	0,32	0,24	0,18	0,12
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,32	0,24	0,18	0,11
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	0,33	0,27	0,22	0,17
Iguatu	PE	929,67	1,50	0,33	0,29	0,26	0,22
Groairas	MA	201,88	1,58	0,26	0,19	0,14	0,08
Guarita	PE	552,05	1,58	0,30	0,25	0,22	0,18
Malhada	SE	70,07	1,64	0,19	0,09	0,02	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	0,20	0,13	0,07	0,02

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$  para  $f_K = 2,0$ 

Nome	UF	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	CV	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
				$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,94	0,91	0,88	0,85
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,94	0,90	0,88	0,85
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	0,86	0,78	0,72	0,65
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	0,92	0,88	0,86	0,83
Bacabal	MA	3363,88	0,38	0,91	0,88	0,86	0,83
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	0,88	0,83	0,80	0,76
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,82	0,75	0,69	0,64
Esperantina	MA	629,62	0,48	0,82	0,77	0,72	0,68
Camaçari	PE	238,74	0,53	0,77	0,69	0,64	0,57
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	0,81	0,76	0,72	0,68
Atalaia	BA	739,74	0,61	0,79	0,74	0,70	0,66
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,68	0,54	0,45	0,34
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,69	0,59	0,52	0,44
Tiuma	SE	573	0,66	0,75	0,69	0,65	0,60
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,71	0,63	0,57	0,51
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,72	0,67	0,64	0,60
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,69	0,62	0,57	0,52
Itambé	CE	699,77	0,76	0,72	0,67	0,63	0,58
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,63	0,53	0,47	0,39
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,71	0,66	0,62	0,57
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,74	0,70	0,67	0,64
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	0,53	0,40	0,32	0,22
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,61	0,57	0,54	0,51
Capivara	BA	108,73	1,00	0,52	0,41	0,34	0,26
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,49	0,38	0,30	0,21
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,51	0,43	0,38	0,32
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	0,54	0,47	0,43	0,38
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,45	0,35	0,28	0,20
Limoeiro	PI	163,24	1,25	0,42	0,33	0,27	0,20
Anagé	CE	146,74	1,27	0,42	0,33	0,26	0,19
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	0,45	0,39	0,34	0,30
Água Branca	PI	28,5	1,29	0,31	0,14	0,03	0,00
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	0,44	0,38	0,33	0,29
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	0,48	0,44	0,41	0,37
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	0,47	0,41	0,37	0,32
Caio Prado	AL	142,94	1,34	0,37	0,27	0,21	0,13
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,37	0,26	0,19	0,11
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	0,38	0,30	0,25	0,19
Iguatu	PE	929,67	1,50	0,38	0,33	0,30	0,26
Groairas	MA	201,88	1,58	0,30	0,21	0,16	0,09
Guarita	PE	552,05	1,58	0,35	0,29	0,24	0,20
Malhada	SE	70,07	1,64	0,22	0,10	0,01	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	0,23	0,15	0,08	0,01

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$  para  $f_K = 2,5$ 

Nome	UF	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	CV	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
				$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,94	0,89	0,86	0,83
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,93	0,89	0,86	0,83
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	0,84	0,75	0,68	0,61
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	0,92	0,88	0,86	0,83
Bacabal	MA	3363,88	0,38	0,92	0,88	0,86	0,83
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	0,88	0,83	0,79	0,75
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,83	0,74	0,68	0,61
Esperantina	MA	629,62	0,48	0,89	0,77	0,72	0,67
Camaçari	PE	238,74	0,53	0,77	0,68	0,62	0,55
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	0,90	0,77	0,73	0,68
Atalaia	BA	739,74	0,61	0,81	0,75	0,71	0,66
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,56	0,52	0,41	0,29
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,71	0,59	0,51	0,41
Tiuma	SE	573	0,66	0,78	0,71	0,66	0,61
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,73	0,64	0,57	0,50
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,84	0,70	0,66	0,62
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,72	0,64	0,59	0,53
Itambé	CE	699,77	0,76	0,76	0,69	0,64	0,59
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,65	0,54	0,46	0,38
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,75	0,68	0,63	0,58
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,78	0,73	0,70	0,66
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	0,54	0,40	0,30	0,19
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,66	0,61	0,59	0,55
Capivara	BA	108,73	1,00	0,55	0,43	0,35	0,25
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,51	0,39	0,30	0,20
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,55	0,46	0,40	0,33
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	0,58	0,51	0,45	0,39
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,49	0,37	0,29	0,20
Limoeiro	PI	163,24	1,25	0,45	0,35	0,28	0,20
Anagé	CE	146,74	1,27	0,46	0,35	0,27	0,19
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	0,49	0,42	0,37	0,32
Água Branca	PI	28,5	1,29	0,32	0,13	0,00	0,00
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	0,49	0,42	0,37	0,32
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	0,53	0,48	0,44	0,41
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	0,51	0,44	0,39	0,34
Caio Prado	AL	142,94	1,34	0,41	0,30	0,22	0,14
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,40	0,28	0,19	0,10
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	0,42	0,33	0,27	0,20
Iguatu	PE	929,67	1,50	0,43	0,37	0,33	0,29
Groairas	MA	201,88	1,58	0,33	0,24	0,17	0,09
Guarita	PE	552,05	1,58	0,38	0,32	0,27	0,21
Malhada	SE	70,07	1,64	0,24	0,10	0,01	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	0,26	0,16	0,09	0,01

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 18 – Fator adimensional de retirada com relação ao  $\alpha$  para  $f_K = 6,0$ 

Nome	UF	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	CV	Fator adimensional de retirada ( $f_M$ ) para			
				$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha = 75.000$
Barra do Corda	MA	1911,21	0,22	0,88	0,80	0,75	0,69
Santa Vitória	BA	1970,25	0,25	0,88	0,81	0,75	0,69
Fazenda Coqueiro	BA	203,33	0,34	0,74	0,57	0,45	0,32
Pedreiras II	MA	2764,3	0,36	0,89	0,83	0,78	0,72
Bacabal	MA	3363,88	0,38	0,90	0,84	0,79	0,74
Fazenda Boa Fortuna	PB	988,57	0,41	0,85	0,75	0,68	0,60
Nazaré	CE	269,1	0,46	0,76	0,61	0,50	0,38
Esperantina	MA	629,62	0,48	0,82	0,70	0,62	0,53
Camaçari	PE	238,74	0,53	0,74	0,58	0,47	0,34
Barra Do Lance	BA	1006,84	0,54	0,84	0,74	0,66	0,58
Atalaia	BA	739,74	0,61	0,82	0,71	0,64	0,55
Tesouras	CE	49,74	0,63	0,55	0,28	0,09	0,00
Rosário Do Catete	BA	106,26	0,65	0,65	0,44	0,29	0,13
Tiuma	SE	573	0,66	0,80	0,68	0,60	0,50
Mata De São João	CE	206,05	0,67	0,71	0,55	0,43	0,29
Fazenda Sobral	AL	1166,96	0,69	0,82	0,72	0,65	0,58
Ponte Da Ba-6	RN	368,69	0,75	0,75	0,61	0,51	0,40
Itambé	CE	699,77	0,76	0,80	0,68	0,60	0,51
Mulungu	PB	131,92	0,78	0,65	0,46	0,32	0,17
Cândido Sales	CE	648,66	0,80	0,79	0,67	0,59	0,50
Vapor	PB	1937,37	0,83	0,85	0,77	0,71	0,65
Várzea Grande	BA	65,7	0,94	0,53	0,28	0,11	0,00
Prata Do Piauí	AL	2746,47	1,00	0,78	0,71	0,66	0,61
Capivara	BA	108,73	1,00	0,56	0,35	0,20	0,04
Fazenda Tourão	RN	86,71	1,00	0,55	0,32	0,16	0,00
Ponte Rio Branco	RN	271,09	1,12	0,62	0,47	0,36	0,24
Pau Ferrado	PB	506,48	1,13	0,67	0,54	0,46	0,36
Riachão Do Jacuípe	CE	119,88	1,14	0,54	0,34	0,20	0,04
Limoeiro	PI	163,24	1,25	0,54	0,36	0,23	0,09
Anagé	CE	146,74	1,27	0,53	0,34	0,21	0,06
Fazenda Talhada	MA	585,97	1,29	0,64	0,52	0,43	0,34
Água Branca	PI	28,5	1,29	0,30	0,00	0,00	0,00
Pedra De Abelhas	BA	614,98	1,30	0,64	0,52	0,44	0,34
Jardim de Piranhas	BA	1641,7	1,30	0,69	0,61	0,55	0,48
Morada Nova II	MA	630,33	1,32	0,65	0,53	0,45	0,35
Caio Prado	AL	142,94	1,34	0,50	0,31	0,18	0,03
Ceará-Mirim	BA	112,24	1,38	0,47	0,26	0,12	0,00
Senador Pompeu	BA	296,1	1,40	0,55	0,40	0,29	0,17
Iguatu	PE	929,67	1,50	0,60	0,50	0,42	0,34
Groairas	MA	201,88	1,58	0,45	0,28	0,16	0,03
Guarita	PE	552,05	1,58	0,54	0,41	0,33	0,23
Malhada	SE	70,07	1,64	0,31	0,07	0,00	0,00
Cristais	BA	174,28	1,85	0,37	0,19	0,06	0,00

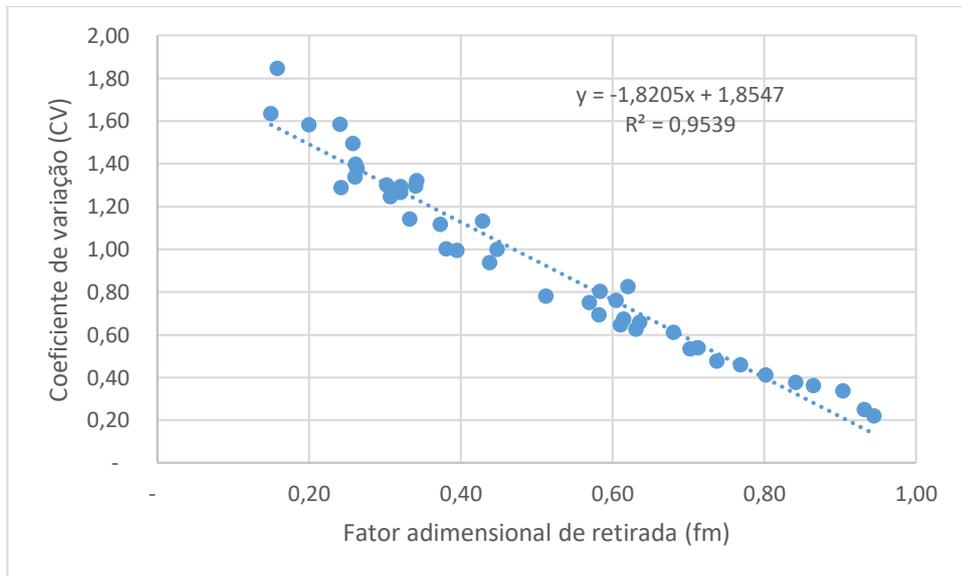
Fonte: elaborado pelo autor.

### 5.3 Estudo do comportamento da vazão regularizada

Com os 43 valores de fator adimensional de retirada obtidos para cada configuração de reservatório ( $f_K; \alpha$ ), foram elaboradas 20 curvas características de reservatórios por meio de regressão linear, relacionando o coeficiente de variação ao fator adimensional de retirada. Com o uso destas curvas, pode-se dimensionar um reservatório na Bacia do Rio Jaguaribe.

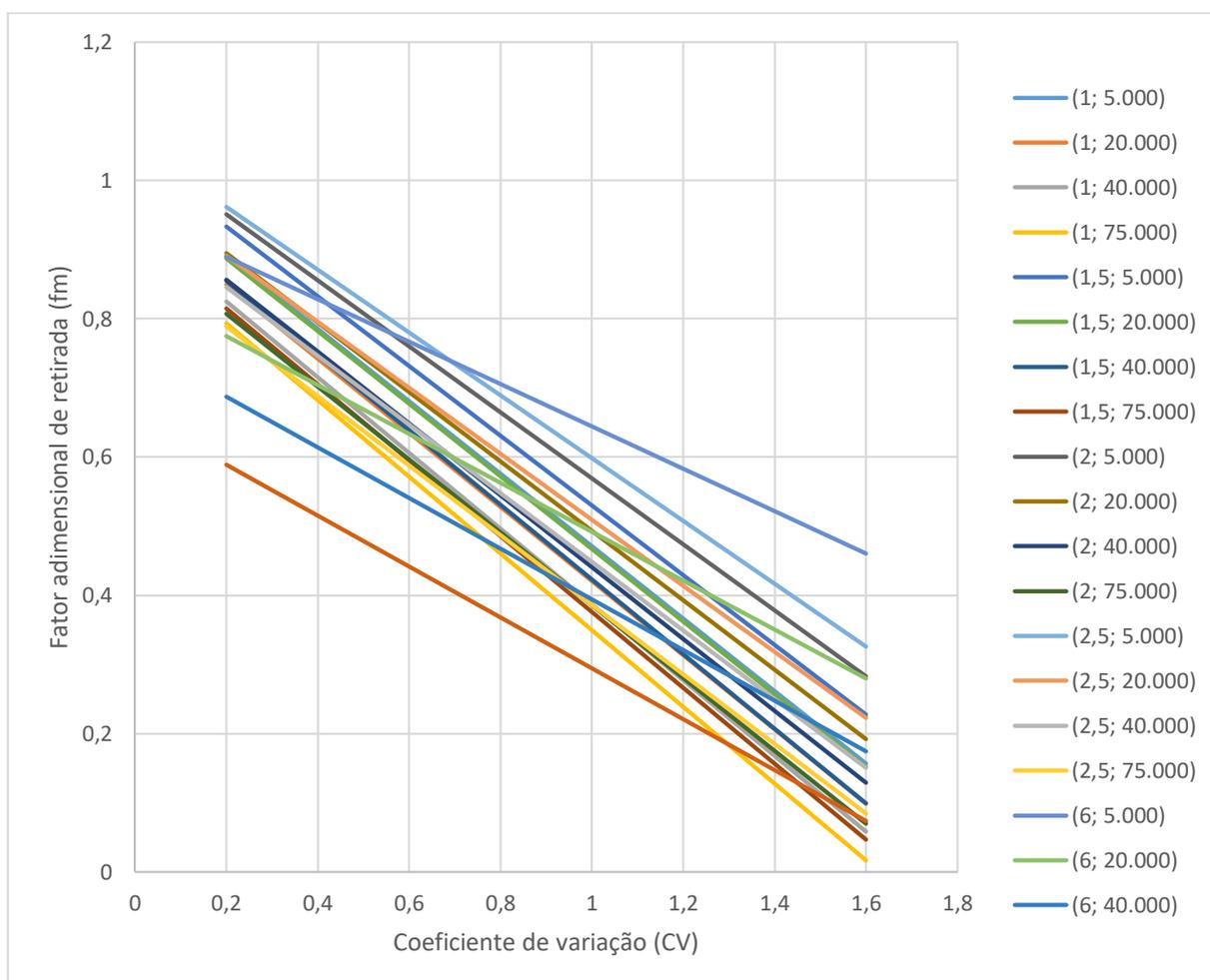
A Figura 17 mostra uma das 20 curvas geradas por regressão linear, no caso, correspondente ao coeficiente de variação e ao fator adimensional de retirada do par ordenado (1,0; 5.000).

Figura 17 – Fator de regularização por coeficiente de variação em barragens (1,0; 5.000).  
Sendo  $EI=1,7\text{m/ano}$  e  $G=90\%$



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela imagem, pode-se concluir o alto grau de correlação entre o coeficiente de variação ( $R^2=95,39\%$ ). A figura abaixo mostra as todas as 20 regressões lineares obtidas nas simulações.

Figura 18 – Regularização de vazão na bacia do Rio Jaguaribe, para um  $G=90\%$ 

Fonte: elaborado pelo autor.

Pela figura acima, conclui-se que, na Bacia do Jaguaribe, o fator de capacidade e o fator de forma dos reservatórios são extremamente importantes para se determinar a vazão regularizada, devido à grande inclinação das curvas. Se levado em conta a média de valores de CV do rio Jaguaribe, podemos notar que em situações mais favoráveis com o  $CV=1,0$ , o fator de adimensional de retirada máximo é aproximadamente 0,6.

Quanto ao arranjo da barragem (sua combinação de fator adimensional de capacidade e fator de forma da bacia), podemos ter como exemplo o  $CV=1,6$ , que não é incomum para a região, onde o fator adimensional de retirada pode variar entre 0,5 e praticamente 0,0. Portanto, esses valores devem ser bem definidos para se determinar com precisão o volume regularizado por uma barragem.

A Tabela 19 abaixo mostra a correlação para cada uma dessas retas traçadas anteriormente.

Tabela 19 – Correlação  $R^2$  das regressões lineares

	$f_K = 1,0$	$f_K = 1,5$	$f_K = 2,0$	$f_K = 2,5$	$f_K = 6,0$
$\alpha=5.000$	95%	96%	95%	90%	67%
$\alpha=20.000$	93%	93%	90%	86%	52%
$\alpha=40.000$	92%	90%	86%	81%	46%
$\alpha=75.000$	89%	87%	82%	77%	41%

Fonte: elaborado pelo autor.

Pelo conceito de correlação pelo  $R^2$ , onde verifica-se correlação em valor acima de 70%, pode-se concluir que as relações desse estudo não são válidas para casos em que o volume acumulado é 6 vezes o valor de  $\mu$  ( $f_k=6,0$ ), mas válida para os demais valores de  $f_k$ , que são valores de comum utilização no Nordeste.

A Tabela 20 apresenta os valores das curvas de regressão agrupados em quatro tabelas com os valores de fator de forma do reservatório, contendo o valor de fator adimensional de retirada em função do coeficiente de variação e do fator de capacidade da bacia.

Tabela 20 – Regularização de vazões com relação ao  $f_k$  para uma  $EI = 1,7$  m/ano

	$\alpha=5.000$						$\alpha=20.000$				
	$f_k=1,0$	$f_k=1,5$	$f_k=2,0$	$f_k=2,5$	$f_k=6,0$		$f_k=1,0$	$f_k=1,5$	$f_k=2,0$	$f_k=2,5$	$f_k=6,0$
CV=0,2	0,89	0,93	0,95	0,96	0,89	CV=0,2	0,85	0,89	0,90	0,89	0,77
CV=0,4	0,79	0,83	0,86	0,87	0,83	CV=0,4	0,74	0,78	0,79	0,80	0,70
CV=0,6	0,68	0,73	0,76	0,78	0,77	CV=0,6	0,64	0,68	0,69	0,70	0,63
CV=0,8	0,58	0,63	0,66	0,69	0,71	CV=0,8	0,53	0,57	0,59	0,60	0,56
CV=1,0	0,47	0,53	0,57	0,60	0,64	CV=1,0	0,42	0,47	0,49	0,51	0,49
CV=1,2	0,37	0,43	0,47	0,51	0,58	CV=1,2	0,31	0,36	0,39	0,41	0,42
CV=1,4	0,26	0,33	0,38	0,42	0,52	CV=1,4	0,21	0,26	0,29	0,32	0,35
CV=1,6	0,16	0,23	0,28	0,33	0,46	CV=1,6	0,10	0,15	0,19	0,22	0,28

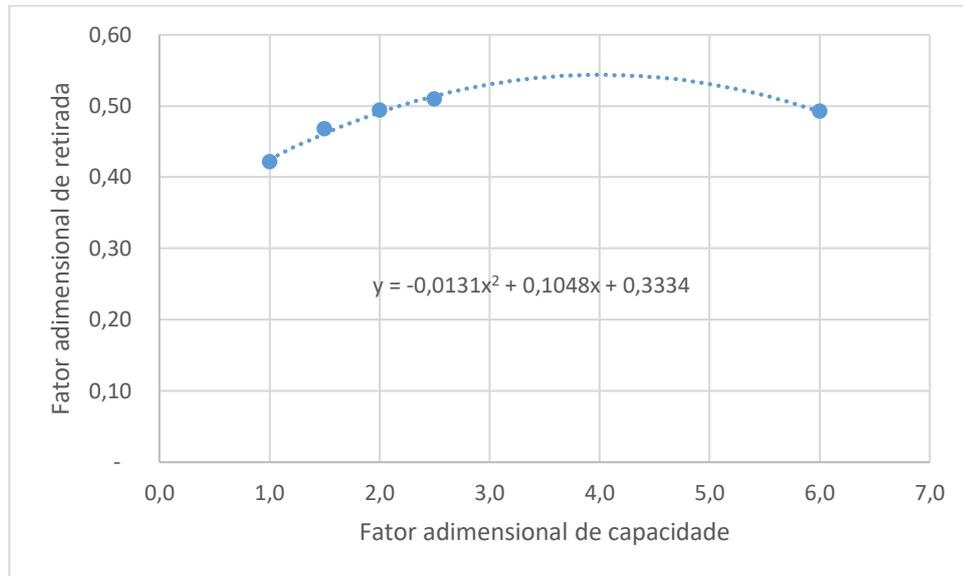
  

	$\alpha=40.000$						$\alpha=75.000$				
	$f_k=1,0$	$f_k=1,5$	$f_k=2,0$	$f_k=2,5$	$f_k=6,0$		$f_k=1,0$	$f_k=1,5$	$f_k=2,0$	$f_k=2,5$	$f_k=6,0$
CV=0,2	0,82	0,85	0,86	0,85	0,69	CV=0,2	0,79	0,81	0,81	0,79	0,59
CV=0,4	0,72	0,75	0,75	0,75	0,61	CV=0,4	0,68	0,71	0,70	0,69	0,52
CV=0,6	0,61	0,64	0,65	0,65	0,54	CV=0,6	0,57	0,60	0,60	0,59	0,44
CV=0,8	0,50	0,53	0,54	0,55	0,47	CV=0,8	0,46	0,49	0,49	0,49	0,37
CV=1,0	0,39	0,42	0,44	0,45	0,39	CV=1,0	0,35	0,38	0,39	0,39	0,29
CV=1,2	0,28	0,31	0,34	0,35	0,32	CV=1,2	0,24	0,27	0,28	0,29	0,22
CV=1,4	0,17	0,21	0,23	0,25	0,25	CV=1,4	0,13	0,16	0,17	0,19	0,15
CV=1,6	0,06	0,10	0,13	0,15	0,17	CV=1,6	0,02	0,05	0,07	0,08	0,07

Fonte: elaborado pelo autor.

Nela, percebe-se o caráter ascendente e descendente dos fatores de regularização ao se aumentar o fator de capacidade da bacia, ao qual assume uma relação de equação semelhante a polinomial de ordem dois. A Figura 19 abaixo mostra um exemplo para o caso de  $CV=1,0$  e  $\alpha=5.000$ .

Figura 19 – Fator adimensional de retirada em função do fator de capacidade para  $CV=1,0$ ;  $\alpha=5.000$  e  $El=1,7m/ano$



Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se então, estabelecer o fator adimensional de retirada como uma curva polinomial de ordem 2 em função do fator adimensional de capacidade.

$$f_M = a \cdot f_k^2 + b \cdot f_k + c \quad (12)$$

Onde “a”, “b” e “c” são coeficientes que dependem de  $CV$  e  $\alpha$ , obtidos pelo mesmo procedimento mostrado na figura acima, aplicado aos valores de  $CV$  entre 0,2 e 1,6 e  $\alpha$  entre 5.000 e 75.000. Todos valores de “a”, “b” e “c” podem ser obtidos pela Tabela 21 abaixo.

#### 5.4 Valor ideal do fator de capacidade

Por sua natureza parabólica, a relação entre fator adimensional de retirada e o fator adimensional de capacidade indica que há um pico de fator adimensional de retirada, ou seja, um máximo fator adimensional de retirada em cada uma das situações de  $CV$  e  $\alpha$  apresentadas. Esse valor máximo de vazão está associado à um “valor ótimo” de  $f_K$ .

Tabela 21 – Coeficientes "a", "b" e "c"

	$\alpha=5.000$				$\alpha=20.000$		
	a	b	c		a	b	c
CV=0,2	-0,0138	0,0957	0,8134	CV=0,2	-0,0127	0,0721	0,7973
CV=0,4	-0,014	0,1057	0,6985	CV=0,4	-0,0128	0,0803	0,6814
CV=0,6	-0,0142	0,1158	0,5835	CV=0,6	-0,0129	0,0885	0,5654
CV=0,8	-0,0144	0,1258	0,4686	CV=0,8	-0,013	0,0967	0,4494
CV=1,0	-0,0146	0,1359	0,3536	CV=1,0	-0,0131	0,1048	0,3334
CV=1,2	-0,0148	0,1459	0,2387	CV=1,2	-0,0132	0,113	0,2174
CV=1,4	-0,0149	0,1559	0,1237	CV=1,4	-0,0133	0,1212	0,1015
CV=1,6	-0,0151	0,166	0,0088	CV=1,6	-0,0134	0,1294	0,0145
	$\alpha=40.000$				$\alpha=75.000$		
	a	b	c		a	b	c
CV=0,2	-0,0123	0,0573	0,7866	CV=0,2	-0,0112	0,0362	0,7757
CV=0,4	-0,0121	0,0634	0,6701	CV=0,4	-0,011	0,0424	0,6575
CV=0,6	-0,012	0,0696	0,5535	CV=0,6	-0,0108	0,0486	0,5393
CV=0,8	-0,0118	0,0757	0,437	CV=0,8	-0,0106	0,0548	0,421
CV=1,0	-0,0116	0,0819	0,3025	CV=1,0	-0,0104	0,061	0,3028
CV=1,2	-0,0114	0,088	0,2039	CV=1,2	-0,0102	0,0672	0,1846
CV=1,4	-0,0113	0,0942	0,0874	CV=1,4	-0,01	0,0734	0,0664
CV=1,6	-0,0111	0,1003	0,0292	CV=1,6	-0,0098	0,0796	-0,0519

Fonte: elaborado pelo autor.

Aprofundando mais esse conceito, pode-se dizer que esse “valor ótimo” de  $f_K$  não precisa necessariamente ser o empregado no dimensionamento, tendo em vista que um valor menor desse  $f_K$  já pode prover a vazão necessária ao projeto, sendo, nessa situação, antieconômico usar o  $f_K$ . Portanto não é um valor necessariamente “ótimo” economicamente. Entretanto o “valor ótimo” de  $f_K$  tem duas utilizações básicas: 1) por corresponder ao ponto de inflexão da curva, equivale aquele valor que a partir dele, qualquer incremento de  $f_K$  deixa de significar um aumento de  $f_M$  para significar uma diminuição (devido ao aumento do espelho d’água e conseqüentemente muito aumento de evaporação). 2) por estar vinculado a um valor máximo de  $f_M$ , indica qual a máxima intervenção que um homem pode fazer (que é escolher o  $f_K$ ) em uma situação natural já determinada por força alheias a vontade do homem (um exutório ao qual se conhece o CV do rio,  $\alpha$  da bacia e El da normal climatológica).

Para determinar o “valor ótimo” de regularização do  $f_K$ , aplicou-se a metodologia de Cálculo Diferencial para achar os máximos (ou mínimos) da equação: derivou-se a equação e igualou-se a 0. Portanto:

$$f_{K\acute{o}timo} = \frac{-b}{2a} \quad (13)$$

Tal fórmula pode ser aplicada a Bacia do Jaguaribe gerando a seguinte Tabela 22.

Tabela 22 - O "valor ótimo" de  $f_K$

	$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha=75.000$
CV=0,2	3,47	2,84	2,33	1,62
CV=0,4	3,78	3,14	2,62	1,93
CV=0,6	4,08	3,43	2,90	2,25
CV=0,8	4,37	3,72	3,21	2,58
CV=1,0	<b>4,65</b>	<b>4,00</b>	<b>3,53</b>	2,93
CV=1,2	<b>4,93</b>	<b>4,28</b>	<b>3,86</b>	3,29
CV=1,4	<b>5,23</b>	<b>4,56</b>	<b>4,17</b>	3,67
CV=1,6	<b>5,50</b>	<b>4,83</b>	<b>4,52</b>	4,06

Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores na tabela, destacados mostram as situações mais comum encontradas na bacia (CV's superiores a 1,0 e  $\alpha$  inferiores a 40.000), onde pode-se inferir, portanto que são valores de  $f_K$  muitos superiores aos normalmente utilizados em dimensionamentos na bacia. Conclui-se que nas situações gerais dos dimensionamentos na bacia do Jaguaribe, o  $f_K$  é normalmente proporcional ao  $f_M$ .

Pode-se achar o fator adimensional de retirada máximo para cada caso usando o após a substituição do valor do fator adimensional de capacidade ótimo (Equação 12) gerando a Equação 14. Esse  $f_{Mmáx}$  significa o potencial de regularização para uma dada topografia e um dado CV do rio. A Tabela 23 apresenta tais valores.

$$f_{Mmáx} = a \cdot f_{Kótimo}^2 + b \cdot f_{Kótimo} + c \quad (14)$$

Tabela 23 – Valores máximos de  $f_M$  na bacia do Jaguaribe para uma garantia de 90%

	$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha=75.000$
CV=0,2	0,98	0,90	0,85	0,80
CV=0,4	0,90	0,81	0,75	0,70
CV=0,6	0,82	0,72	0,65	0,59
CV=0,8	0,74	0,63	0,56	0,49
CV=1,0	0,67	0,54	0,45	0,39
CV=1,2	0,60	0,46	0,37	0,30
CV=1,4	0,53	0,38	0,28	0,20
CV=1,6	0,47	0,33	0,26	0,11

Fonte: elaborado pelo autor.

Para situações comuns na Bacia do Rio Jaguaribe (CV=1,0) observa-se o baixo valor fator adimensional de retirada máximo. Além disso, nota-se a enorme importância do fator de

forma da bacia hidráulica, que varia bastante para uma mesma faixa de CV, o que indica a delicada tomada de decisão em escolher o ponto do eixo do barramento.

### 5.5 Sugestão para dimensionar um reservatório

Para uma estação fluviométrica na Bacia do Rio Jaguaribe, pode-se dimensionar um reservatório de um rio com CV e  $\mu$  conhecido em uma bacia com  $\alpha$  conhecido para suprir uma determinada vazão anual (M) para uma garantia de 90%.

- Determina-se o  $f_M$  pela fórmula  $f_M = M/\mu$ . Pode-se verificar pela Tabela 21 se o a bacia consegue regularizar esse  $f_M$ .
- Determinar os coeficientes “a”, “b” e “c” pela Tabela 23.
- Aplica-se a Equação 12 usando interação para determinar o  $f_K$  necessário para a relação.
- Calcula-se a capacidade da barragem pela Equação 7.
- Calcula-se a altura da barragem pela Equação 8.

### 5.6 Testando a fórmula

A fórmula apresentada neste trabalho foi submetida a três testes para verificar sua eficiência e validade, bem como as suas limitações. No primeiro destes testes, foi selecionada uma série histórica de vazão na Bacia do Rio Jaguaribe que não tenha sido utilizada para gerar as linhas de regressão linear e foram determinados os fatores adimensionais de retirada para as 20 modulações selecionadas tanto pelo método apresentado neste trabalho quanto pela utilização do software Simres para se comparar os resultados. No segundo teste foi escolhida uma barragem que já existe e com dados de regularização conhecidos e tentou-se dimensionar uma barragem pelo método deste trabalho, e em seguida comparou-se os resultados. No terceiro teste, o procedimento foi exatamente o mesmo do segundo teste, mas se escolheu uma barragem que não fora construída dentro da Bacia do Rio Jaguaribe, mas possui evaporação líquida anual semelhante.

Os três próximos itens deste trabalho abordaram cada um dos testes respectivamente.

#### 5.6.1 Série histórica na Bacia do Rio Jaguaribe

A escolhida foi a estação fluviométrica Icó, cujo a medição de descarga líquida teve

início em janeiro de 1957, possui  $\mu = 934,24\text{hm}^3/\text{ano}$  e  $CV = 1,05$  (no trato das fórmulas considerou-se  $CV=1,0$ ). Foi gerada uma série sintética de 5.000 anos pelo mesmo método das demais no trabalho.

A simulação ocorreu cada um dos 20 pares ordenados de características da barragem propostos por esse trabalho, sendo submetidos as condições normais de evaporação líquida (1,7m/ano) e garantia (90%). Na Tabela 24, a terceira coluna informa o resultado no Simres, a quarta coluna mostra o resultado obtido pela fórmula e a última coluna mostra o erro percentual.

Tabela 24 – Simulações na estação Icó

fk	$\alpha$	$f_M$ Simres	$f_M$ Fórmula	Erro
1,0	5000	0,43	0,47	5%
1,0	20000	0,39	0,43	4%
1,0	40000	0,36	0,37	1%
1,0	75000	0,34	0,35	2%
1,5	5000	0,51	0,52	2%
1,5	20000	0,46	0,46	0%
1,5	40000	0,43	0,40	-3%
1,5	75000	0,40	0,37	-3%
2,0	5000	0,57	0,57	0%
2,0	20000	0,51	0,49	-2%
2,0	40000	0,47	0,42	-6%
2,0	75000	0,43	0,38	-5%
2,5	5000	0,61	0,60	-1%
2,5	20000	0,55	0,51	-4%
2,5	40000	0,51	0,43	-7%
2,5	75000	0,46	0,39	-7%
6,0	5000	0,72	0,64	-8%
6,0	20000	0,62	0,49	-12%
6,0	40000	0,54	0,38	-17%
6,0	75000	0,46	0,29	-17%

Fonte: elaborado pelo autor.

A equação de dimensionamento apresenta baixo erro quando comparados a simulação real, exceto nos casos  $f_K=6,0$ , onde já era esperado, uma vez que a fórmula não apresenta boa correlação  $R^2$ , fora desse espectro os valores de erro foram baixos para uma equação de dimensionamento, mesmo os valores que apresentaram os maiores erros relativos (2,5; 75.000) apresentaram um valor subestimado, primando pela segurança.

### 5.6.2 Barragem construída na Bacia do Rio Jaguaribe

A barragem escolhida para o segundo teste foi o Açude Arneiroz, que foi construído na

Bacia do Rio Jaguaribe. O reservatório possui as seguintes características:

Tabela 25 – Dados do Açude Arneiroz

<b>Açude</b>	<b><math>\mu</math> (<math>\text{hm}^3/\text{ano}</math>)</b>	<b><math>\sigma</math> (<math>\text{hm}^3/\text{ano}</math>)</b>	<b>K (<math>\text{hm}^3</math>)</b>	<b>H (m)</b>	<b>M (<math>\text{hm}^3/\text{ano}</math>)</b>	<b>EI (m/ano)</b>
Arneiroz	175,29	222,23	197	23,44	46,00	1,65

Fonte: elaborado pelo autor.

Os fatores adimensionais são calculados a partir dos dados da tabela acima e descritos na Tabela 26. O valor da última coluna é o fator adimensional de retirada real do açude.

Tabela 26 – Fatores adimensionais do Açude Arneiroz

<b>Açude</b>	<b>CV</b>	<b><math>f_K</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>f_M</math></b>
Arneiroz	1,31	1,12	15.296	0,26

Fonte: elaborado pelo autor.

Para utilização da fórmula, foram adotados os valores arredondados de  $CV=1,4$ ;  $f_K=1,0$  e  $\alpha=20.000$ . Os coeficientes da equação e seu respectivo o fator adimensional de retirada calculado esta apresentado nas Tabela 27. A última coluna de cada tabela apresenta o erro em relação ao fator adimensional de retirada real.

Tabela 27 – Fator de regularização em Arneiroz calculado pela fórmula

<b>Açude</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b><math>f_M</math></b>	<b>Erro</b>
Arneiroz	-0,0133	0,1212	0,1015	0,22	-4%

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao se dimensionar o Açude Arneiroz pelo método deste trabalho e comparar com o  $f_M$  real, se obtém um erro negativo de 4%. Tal subestimação provavelmente deve-se ao fator de que a evaporação líquida real na bacia seja menor que a empregada na elaboração da fórmula.

### **5.6.3 Barragem construída fora Bacia do Rio Jaguaribe**

Além das situações acima, testou-se também a fórmula para um caso de barragem construída que não estivesse na Bacia do Rio Jaguaribe, mas que tivesse um regime de evaporação líquida semelhante. A barragem escolhida foi o Açude Armando Ribeiro Gonçalves, cuja características são:

Tabela 28 – Dados do Açude Armando Ribeiro Gonçalves

Açude	$\mu$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	$\sigma$ ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	K ( $\text{hm}^3$ )	H (m)	M ( $\text{hm}^3/\text{ano}$ )	El ( $\text{m}/\text{ano}$ )
Armando Ribeiro Gonçalves	2566,62	2519,16	2400	55,00	975	1,81

Fonte: elaborado pelo autor.

Os fatores adimensionais são calculados pela tabela acima e descritos na Tabela 29. O valor da última coluna é o fator adimensional de retirada real do açude.

Tabela 29 – Fatores adimensionais do Açude Armando Ribeiro Gonçalves

Açude	CV	$f_K$	$\alpha$	$f_M$
Armando Ribeiro Gonçalves	0,98	0,94	14.425	0,38

Fonte: elaborado pelo autor.

Para utilização das fórmulas, foram adotados os valores arredondados de  $CV=1,0$ ;  $f_K=1,0$  e  $\alpha=20.000$ . Os coeficientes da equação e seu respectivo o fator adimensional de retirada esta apresentado na Tabela 30. A última coluna de cada tabela apresenta o erro em relação a regularização real.

Tabela 30 – Fator de regularização do Açude Armando Ribeiro Gonçalves calculado pela fórmula

Açude	a	b	c	$f_M$	Erro
Armando Ribeiro Gonçalves	-0,0131	0,1048	0,3334	0,42	4%

Fonte: elaborado pelo autor.

A fórmula apresentou um bom desempenho, mesmo fora da Bacia do Rio Jaguaribe. A superestimação dos valores provavelmente foi devido a evaporação líquida considerada na elaboração da fórmula (1,7 m/ano).

### 5.7 Análise do desempenho do “Paradigma 2Va” na Bacia do Rio Jaguaribe

A Tabela 22 apresenta para condições normais dos Rios da Bacia do Jaguaribe (onde o coeficiente de variação é maior que 1,0), os pontos de inflexão da curva se encontram por volta de  $f_{Kótimo} \geq 4,0$ , Portanto, pode-se concluir que a utilização de  $f_K = 2,0$  podem gerar

fatores de regularização não satisfatórios e ainda deixam de usar um certo potencial associado à altura da barragem para reduzir as perdas.

Para medir os valores médios de fator adimensional de retirada, foi aplicado o valor de  $f_K = 2,0$  na Equação 12 para o caso dos 20 tipos de barragem estudadas. O resultado encontra-se na Tabela 31.

Tabela 31 – Fator adimensional de retirada para  $f_K = 2,0$  e  $El=1,7\text{m/ano}$

	$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha=75.000$
CV=0,2	0,95	0,89	0,85	0,80
CV=0,4	0,85	0,79	0,75	0,70
CV=0,6	0,76	0,69	0,64	0,59
CV=0,8	0,66	0,59	0,54	0,49
CV=1,0	0,57	0,49	0,42	0,38
CV=1,2	0,47	0,39	0,33	0,28
CV=1,4	0,38	0,29	0,23	0,17
CV=1,6	0,28	0,22	0,19	0,07

Fonte: elaborado pelo autor.

Quando se compara os valores da tabela acima com os valores da Tabela 23 (que apresenta os valores máximo de fator adimensional de retirada de cada caso) têm-se uma ideia do não aproveitamento do potencial regulador da bacia quando se adota um fator adimensional de retirada igual a  $f_K = 2,0$  (Tabela 32).

Pode-se observar que, principalmente em valores menores de fator de forma do reservatório, o valor máximo é muito maior do aquele obtido quando se considera o  $f_K = 2,0$ , refutando, portanto, o “Paradigma do 2Va” em situações comuns no Semiárido Nordestino.

Tabela 32 – Diferença entre fator adimensional de retirada máximo para  $El=1,7\text{m/ano}$  e o fator adimensional de retirada para  $f_K = 2,0$  e  $El=1,7\text{m/ano}$

	$\alpha=5.000$	$\alpha=20.000$	$\alpha=40.000$	$\alpha=75.000$
CV=0,2	0,03	0,01	0,00	0,00
CV=0,4	0,05	0,02	0,00	0,00
CV=0,6	0,06	0,03	0,01	0,00
CV=0,8	0,08	0,04	0,02	0,00
CV=1,0	0,10	0,05	0,03	0,01
CV=1,2	0,13	0,07	0,04	0,02
CV=1,4	0,15	0,09	0,05	0,03
CV=1,6	0,19	0,11	0,07	0,04

Fonte: elaborado pelo autor.

## 6 CONCLUSÃO

Utilizar o parâmetro  $f_K=2,0$  em dimensionamento de reservatórios no Nordeste Brasileiro pode gerar valores de fator adimensional de retirada que variam entre todos os resultados possíveis deste parâmetro (0,0 a 1,0), sendo dependentes de fatores como  $\alpha$ , El e CV para se determinar exatamente o valor de  $f_M$ . Portanto a conjuntura desses fatores hidroclimáticos e morfológicos devem ser considerados para determinar um  $f_K$  que corresponda a um  $f_M$  que supra as necessidades de volumes regularizados.

Nos postos analisados, a relação entre o fator adimensional de retirada e o fator de forma do reservatório é altamente correlacionada a uma função logarítmicas. A evaporação líquida anual possui uma certa correlação com o fator adimensional de retirada no Nordeste Brasileiro, mesmo quando não considerado sua distribuição mensal.

Quando a simulação apresenta  $El < 0,7\text{m/ano}$  e  $CV < 1,0$ , os valores do fator adimensional de retirada tendem a serem altos (superiores a 0,7) e a tendem a não variar significativamente conforme se modifica a topografia ( $\alpha$ ) ou a evaporação líquida anual, portanto, não são fatores de grande impacto nessa faixa. Neste caso, o fator adimensional de retirada pode ser caracterizado por meio de uma equação linear. Essa relação simplista está em sintonia com metodologias normalmente empregados em lugares mais frios e de rios perene, que tendem a desprezar em seu dimensionamento o impacto da evaporação líquida.

Entretanto, os valores comumente apresentados nas regiões semiáridas da área em estudo possuem valores de  $El < 0,7\text{m/ano}$  e  $CV < 1,0$ , a topografia é determinante no fator adimensional de topografia, uma vez que influencia nas perdas por evaporação. A partir deste ponto, uma regressão linear entre o coeficiente de variação e o fator adimensional de retirada já não possui tanta precisão e torna-se imprópria, uma vez que dependem dos valores de El e  $\alpha$ , aos quais podem fazer o  $f_M$  variar entre 0,0 e 0,7. Os métodos de dimensionamento de reservatórios em regiões semiáridas devem ser mais robustos e levar em consideração todas essas variáveis, além de se estudar demais valores de  $f_K$ , para determinar qual o ideal, e não somente usar o parâmetro  $f_K=2,0$  indiscriminadamente.

Devido as altas taxas evaporativas da bacia, que quase sempre superam a precipitação, os valores de vazão regularizada são muito dependentes dos fatores de forma da bacia. Em condições normais de regimes de rios (CV maiores que 1,0) a bacia tende a regularizar apenas metade da vazão afluente, devido as perdas.

Com a equação de dimensionamento descrita neste trabalho (Equação 12), espera-se contribuir com uma fórmula que pode dar informações expeditas para as estimativas de vazão regularizada durante a fase de projeto. A fórmula proposta apresentou boa correlação com os dados de vazão utilizados, exceto em fatores de capacidade muito grandes, como 6,0. Além disso apresentou baixo erro nos testes realizados e podem ser uma boa ferramenta para escolhas de eixos de barramento e alturas viáveis de barragem, que, como lembram Chow et al. (1988) são as primeiras variáveis determinadas no projeto de reservatório.

### **6.1 Sugestão de trabalho futuro**

Como sugestão para trabalho futuro, o estudo dos coeficientes aqui apresentados para outras regiões do Brasil, com diferentes regimes hidrológicos.

Uma outra sugestão, diz respeito ao aprimoramento do próprio SIMRES, que tem uma preparação de dados muito demoradas e laboriosas, principalmente quando se trata das séries históricas de vazão. Os passos realizados no SisCAH e Excel são exatamente os mesmos para qualquer série histórica, e é de conhecimento comum que a solução para trabalhos repetitivos remete a utilização de automação, logo, uma automação que transformasse o arquivo do Hidroweb direto para um compatível com o SIMRES seria uma grande adição ao programa.

## REFERÊNCIAS

ADELOYE, A; MONTASERI, M. Adaptation of a single reservoir technique for multiple reservoir storarage-yield-reability analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WORLD WATER RESOURCES AT THE BEGINNING OF THE 21ST CENTURY, 1998. **Proceedings of Water: a looming crisis**. Paris: UNESCO, 1998. p. 349-355.

ADELOYE, A. Predictive models of reservoir storage-yield-reliability functions: inter-comparison of regression and multi-layer perceptron artificial neural network paradigms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM: QUANTIFICATION AND REDUCTION OF PREDICTIVE UNCERTAINTY FOR SUSTAINABLE WATER RESOURCES MANAGEMENT, 2007. **Proceedings of IAHS-AISH Publication - Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management**. Perugia: IAHS Press, 2007. p. 479-486.

ALRAYESS, H; ZEYBRKOGLU, U; ULKE, A. Different design techniques in determining reservoir capacity. **European Water**, v. 60, p. 107-115, 2017.

ANA. **Região Metropolitana de Fortaleza**. 2010. Disponível em: <<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/analise/RegiaoMetropolitana.aspx?rme=9>>. Acesso em: 28 de mar. de 2019.

ANA. **Divisões Hidrográficas**. 2018. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/divisooes-hidrograficas>>. Acesso: 12 de jan. de 2018.

ANDRADE, J. P. M. **O Processo de Armazenamento em um Reservatório em seu Estado Transiente e o Volume Inicial de Máxima Convergência**. 2004. Monografia de Graduação – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

ARAÚJO, J. K. **Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios**. 1991. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

BARCELOS, D, G; STUDART, T. M.C; CAMPOS, J, N, B; NASCIMENTO, L. S. V. Relações matemáticas entre vazões regularizadas com diferentes garantias. In: CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Hidrologia de Reservatórios: a construção de uma teoria**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica e Editora, 2006.

BUARQUE, D. C; TUCCI, C. E. M. Determinação das perdas por evaporação na regionalização da curva de regularização. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo: Video Congress, 2005.

CAMPOS, J. N. B. Processo de estocagem de águas em reservatórios: o papel da variabilidade dos deflúvios. In: CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Hidrologia de Reservatórios: a construção de uma teoria**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica e Editora, 2006.

CAMPOS, J. N. B. **Dimensionamento de Reservatórios: o método do diagrama triangular**.

Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005.

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica e Editora, 2009.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Hidrologia de Reservatórios**: a construção de uma teoria. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica e Editora, 2006.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. O Ensino e a Avaliação de Incertezas Hidrológicas Usando Simulação de Monte Carlo. **Revista de Ensino de Engenharia**, Brasília, v. 20, n.1, p. 57-61, 2001.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Método Monte Carlo e Simres: laboratório computacional para análise de reservatórios. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande: Video Congress, 2009.

CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA SILVA, M. G.; SILVIA DIAS, M. A. F. (ORG). **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de Textos, 2009.

CONNOR, R.; COATES, D.; UHLRN BROOK, S.; KONCAGUL, E. **Soluções baseadas na natureza para a gestão da água**. 2018. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/relatorio-da-unesco-indica-solucoes-baseadas-na-natureza-para-uma-melhor-gestao-da-agua/>>. Acesso: 25 de ago. de 2018.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. Singapore: McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

CSBH do Médio Jaguaribe-CE. **Conheça nossa bacia hidrográfica**. 2019. Disponível em: <<http://www.csbhmj.com.br/conheca/>>. Acesso em: 27 de mar. de 2019.

FERRARI, M. M. **A migração nordestina para São Paulo no segundo governo Vargas (1951 - 1954) - seca e desigualdades regionais**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

GHISI, E. Potential for Potable Water Savings by Using Rainwater in the Residential Sector of Brazil. **Building and Environment**, v. 41, n. 11, p. 1544-1550, 2006.

GIACCGINI, M. O Método de Rippl para dimensionamento de reservatórios de sistemas de aproveitamento da água de chuva. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTIFICO DA ENGENHARIA E AGRONOMIA, 3, 2016. **Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e Agronomia**. Foz do Iguaçu: CONFEA, 2016.

GOULD, B.W. Effect of variability of stream-flow on optimum storage capacity. In: WATER RESOURCES USE AND MANAGEMENT, 1964. **Proceedings of a symposium held in Canberra**. Melbourne: Melbourne University Press, Melbourne, 1964, p. 161–164.

IBGE. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>>. Acesso: 5 de abr. 2019.

IBGE. **Mapas Regionais**. Disponível em: <<https://mapas.ibge.gov.br/politico-administrativo/regionais>>. Acesso: 4 de abr. 2019.

INMET. **Normais climatológicas**. 2010. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso: 1 de ago. de 2018.

INSA. **Nova delimitação expande o Semiárido até o Maranhão: 73 novos municípios foram incluídos**. 2017. Disponível em: <<https://portal.insa.gov.br/noticias/1070-nova-delimitacao-expande-o-semiarido-ate-o-maranhao-73-novos-municipios-foram-incluidos>>. Acesso: 27 de abr. de 2019.

KELMAN, J. **Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos**. In: BARTH, F.T. (ORG), Modelos para Gerenciamento de Recursos Hidricos. São Paulo: Editora Nobel/ABRH, 1987.

KURIA, F; VOGEL, R. Global Storage-Reability-Yield Relationships for Water Suplly Reservoirs. **Water Resour Manage**, n. 29 p. 1591-1605, 2014.

KURIA, F; VOGEL, R. Uncertainty analysis for water supply reservoir yields. **Journal of Hydrology**., n. 529, p. 257-264, 2015.

LANNA, A. E. L. Introdução. In: PORTO, R. L. L (Org.). **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2002.

LANNA, A. E. L. Elementos de Estatística e Probabilidade. In: PORTO, R. L. L (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2007.

LEÃO, R. A. O; SOARES, A. A; TEIXEIRA, A. S; SILVA, D. D. Georeferenced database generation with the purpose of hydrologic molding in reservoirs of the hydrographic basin of Jaguaribe river in the state of Ceará, Brazil. **Eng. Agric**. v. 33, n. 2, p. 388-401, 2013.

MARTON, D; KAPELAN, Z. Risk and Realiability of Open Reservoir Water Shortages Using Optimization. **Procedia Engineering**, n.89, p. 1478-1485, 2014.

MEES, A. **Qualidade de Água em Reservatórios**. 2018. Disponível em: <<https://capacitacao.ead.unesp.br/index.php/temas/65-hidrologia-e-qualidade-da-agua/124-qualidade-da-agua-em-reservatorios>>. Acesso: 26 de dez. 2018

MUSY, A.; HIGY, C. **Hydrologie, une Science de la nature**. Lausanne: Presses

polytechniques et universitaires romandes, 2004.

McMAHON, T. A. Preliminary estimation of reservoir storage for Australian streams. **Civil Engineering Transactions**, n. 18, p. 55-59, 1976.

McMAHON, T. A., ADELOYE, A. J. **Water Resources Yield**. Water Resources Publications, LLC, p. 220, 2005.

McMAHON, T. A.; ADELOYE, A.; ZHOU, S. Understanding performance measures of reservoirs. **Journal of Hydrology**, n. 324, p. 359-382. 2006.

McMAHON, T. A.; PEGRAM, G. G. S.; VOGEL, R. M.; PEEL, M. C. Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database. **Advances in Water Resources**, n. 30, p. 1858-1872, 2007.

McMAHON, T. A.; MEIN, R. G. **Reservoir Capacity and Yield**. Clayton: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

MORAN, P. A. P. A Probability Theory of Dams and Storage System. **Australian Journal of Applied Science**, v. 5, 1954.

PATSKOSKI, J.; SANKARASUBRAMANIAN, A. Improved reservoir sizing utilizing observed and reconstructed streamflows within a Bayesian combination framework. **Water Resour. Res.**, n. 51, p. 567-5697, 2015.

PHIEN, H. N. Reservoir storage capacity with gamma inflows. **Journal of Hydrology**, n. 146 p. 383-389, 1993.

PORTELA, M. M.; QUINTELA, A. C. Preliminary design of the storage capacity of reservoirs based on a flow regionalization parameter, 2006. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON "WATER OBSERVATION AND INFORMATION SYSTEM FOR DECISION SUPPORT". **Proceedings of BAWOIS**. Ohrid, 2006.

PRETTO, P. B.; CHIEW, F. H. S.; McMAHON, T. A.; VOGEL, R. M.; STEDINGER, J. R. The (mis)behavior of behavior analysis for storage estimates. **Water Resour Res**, n. 33, p. 703-709, 1997.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: principles, analysis and design**. 2nd ed. New Delhi: New Age International publishers, 2006.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos Avançados**, v. 11, n. 29, p. 127-154, Abril. 1997. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40141997000100007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40141997000100007&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 31 de dez. 2018.

REBOUÇAS, F. **Rio Intermitente – Pense Green**. 2014. Disponível em: <<https://gazanews.com/rio-intermitente-pense-green/>>. Acesso em: 5 de abr. 2019.

RIPPL, W. Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply. **Proceedings of The Institution of Civil Engineers** v. 71, 1883.

- SILVA, A. T; PORTELA, M. M. Stochastic Assessment of Reservoir Storage-Yield Relationships in Portugal. Reston: **Jornal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 5, p. 568-575, maio de 2013.
- SOUZA, H. T; PRUSKI, F. F; BOF, L. H. N; CECON, P. R; SOUZA, J. R. C. **SisCAH 1.0: sistema computacional para análises hidrológicas**. Brasília: ANA; Visçosa: UFV, 2009.
- STEPHENSON, D. Reservoir Management during Drought, 1997. In: MANAGING WATER: COPING WITH SCARCITY AND ABUNDANCE. **Proceedings of 27th IARH Congress**. San Francisco, 1997.
- STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B; VIEIRA NETO, J.; SOUSA FILHO, F. A. Gestão das Águas na Bacia do Jaguaribe: Diagnóstico e Propostas. **Revista Inter Água**., 1999.
- STUDART, T. M. C. **Análises de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-Áridos**. 2000. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.
- STUDART, T. M. C. A Outorga do Direito de Uso da Água em um Cenário de Incertezas: o Caso do Nordeste Semi-Árido. In: HOFMEISTER, W (Org.). **Água e desenvolvimento sustentável no Semi-Árido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002.
- SUDLER, C. E. Storage Required for the Regulation of Streamflow. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**. v. 91, 1927.
- SVANIDZE, G. G. **Mathematical Modeling of Hydrologic Series**. Fort Collins: Water Resources Publications, 1980.
- THOMAS JR., H. A., BURDEN, R. P. **Operations Research in Water Quality Management**. Cambridge: Harvard Water Resources Group, 1963.
- TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J. C.; ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir networks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.
- TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.
- VOGEL, R. M.; STEDINGER, J. R. Generalized storage-reliability-yield relationships. **Jornal of Hydrology**, n. 89, p. 303-327, 1987.
- VOGEL, R. M. The value of stochastic stream flow models in over-year reservoir design applications. **Water Resour. Res**, v. 24, n.9, p. 1483-1490, 1988.
- VIEIRA, V. P. P. B.; GOUVEIA NETO, A. **Roteiro para projeto de pequenos açudes**. 2. ed. Fortaleza: DNOCS, 1983.
- YEVJEVICH, V. **Stochastic Processes in Hydrology**. Fort Collins: Water Resources, 1972.

ZUFFO, A. C; ZUFFO, M. S. R. **Gerenciamento de Recursos Hídricos: Conceituação e Contextualização**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.