



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

**JEFFERSON SOUSA ROCHA**

**REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA PARA O ESTADO DO CEARÁ: UMA  
ABORDAGEM ESTATÍSTICA DAS CHEIAS.**

**FORTALEZA**  
**2020**

JEFFERSON SOUSA ROCHA

REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA PARA O ESTADO DO CEARÁ: UMA  
ABORDAGEM ESTATÍSTICA DAS CHEIAS.

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.

Orientador: Prof. Iran Eduardo Lima Neto, Ph.D.

FORTALEZA

2020

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)

---

R573r Rocha, Jefferson Sousa.  
Regionalização hidrológica para o estado do Ceará : uma abordagem estatística das cheias / Jefferson Sousa Rocha. – 2020.  
80 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Regionalização. 2. Cheias. 3. Barragens. I. Título.

CDD 627

---

JEFFERSON SOUSA ROCHA

REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA PARA O ESTADO DO CEARÁ: UMA  
ABORDAGEM ESTATÍSTICA DAS CHEIAS.

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: 14 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Samiria Maria Oliveira Da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Berthyer Peixoto Lima  
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH)

A Deus.

Aos meus pais, Fátima e Raimundo.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela esperança e motivo da minha existência.

Aos meus pais, Fátima e Raimundo, aos meus irmãos, Jean, Jeanny, Jane Mara, Juliana e Jéssica, e à minha namorada, Sterlânia, pelo cuidado, amor, carinho e suporte em todas as dificuldades e obstáculos enfrentados na busca dos meus sonhos.

Ao Prof. Iran Eduardo Lima Neto, pela paciência, dedicação, excelente orientação, pela sensibilidade e prazer em repassar o conhecimento, por ser uma referência como professor e por incentivar a buscar continuamente o conhecimento.

Á Prof Vanda Tereza Costa Malveira, pelo acompanhamento e incentivo à pesquisa científica, desde o período da graduação.

Aos professores participantes da banca examinadora Samiria Maria Oliveira Da Silva e Berthyer Peixoto de Lima pela disponibilidade, pelas valiosas contribuições e sugestões na busca por uma pesquisa de qualidade.

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

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“O sentido da vida é encontrar o seu dom. O propósito da vida é compartilhá-lo.”

(Pablo Picasso)

## RESUMO

Na elaboração de projetos de obras hidráulicas, como as barragens, necessita-se de estudos referentes às possíveis vazões afluentes para um dimensionamento seguro. Por isso, o estudo de cheias tem grande relevância, tanto no dimensionamento de barragens como nos planos de gerenciamento de riscos inerentes a essas estruturas. Entretanto, devido à carência de dados hidrológicos em determinadas regiões, como o nordeste brasileiro, necessita-se transportar informações de regiões monitoradas para não monitoradas. Este trabalho contempla duas abordagens: a primeira propõe um modelo para o cálculo de Hidrogramas Unitários Sintéticos Triangulares (HUST) e a segunda uma metodologia para regionalização de vazões máximas para tempos de retorno de 1.000 e 10.000 anos. A presente dissertação tem como principal objetivo propor modelos de regionalização para o estudo das cheias, por meio de regressões múltiplas, para o estado do Ceará. As características físicas e hidrológicas empregadas na elaboração das equações foram: área de drenagem, tempo de concentração, comprimento do talvegue principal, diferença de cota entre o exutório e o ponto mais remoto da bacia, vazão de pico, tempo de pico e tempo de base. Para o desenvolvimento dos cálculos foram utilizadas planilhas eletrônicas e o software estatístico R. Os resultados obtidos destacaram a boa aproximação entre as equações de regressão e as variáveis observadas, considerando ambas as abordagens supracitadas. Conclui-se que a regionalização definida para essas bacias pode ser considerada consistente, uma vez que todos os modelos foram validados pelos testes estatísticos. Além disso, os modelos propostos são de fácil aplicação e podem ser utilizados como uma análise preliminar em projetos hidráulicos semelhantes.

**Palavras-chave:** regionalização, cheias, barragens.



## ABSTRACT

In the elaboration of hydraulic works projects, such as dams, case studies related to possible affluent flow for a safe dimensioning. For this reason, the study of flood has great relevance, both in the dimensioning of dams and in the risk management plans inherent to these strategies. However, due to the lack of hydrological data in regions, such as northeastern Brazil, it is necessary to transport information from monitored regions to unmonitored regions. This work contemplates two approaches: a first proposes a model for calculating Triangular Synthetic Unit Hydrograph (HUST) and a second application methodology for regionalization of maximum flow rates for return times of 1.000 and 1.0000 years. This dissertation has as main objective to propose regionalization models for the study of floods, through multiple regressions, for the state of Ceará. The physics and hydrological characteristics used in the preparation of the equations were: drainage area, concentration time, length of the river main, difference in elevation between the exutory and the most remote point of the basin, peak flow, peak time and base time. For the development of calculations, electronic plans and statistical software R were used. The results obtained highlight the good approximation between the regression equations and the observed variables, considering both approaches mentioned above. It is concluded that a defined regionalization for these basins can be considered consistent, since all models were validated by statistical tests. In addition, the proposed models are easy to apply and can be used as a preliminary analysis in similar hydraulic projects.

**Keywords:** regionalization, floods, dams.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Metodologia utilizada neste trabalho.....	25
Figura 2.2 – Localização das barragens analisadas no mapa do Ceará.....	27
Figura 2.3 – Relação de Vazão por Área da Bacia das Barragens. Valores em $m^3/s.km^2$ ...	46
Figura 3.1 – Localização do estado do Ceará e suas bacias hidrográficas.....	56
Figura 3.2 – Localização das barragens analisadas.....	58

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Resíduos e os valores calculados de $t_b$ pela equação obtida.....	35
Gráfico 2.2 – Resíduos e os valores calculados de $t_{p0}$ pela equação obtida.....	35
Gráfico 2.3 – Resíduos e os valores calculados de $Q_{máx}$ pela equação obtida.....	37
Gráfico 2.4 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias do Coreaú, Acaraú e Serra da Ibiapaba.....	38
Gráfico 2.5 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Alto Jaguaribe.....	39
Gráfico 2.6 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Salgado.....	40
Gráfico 2.7 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias Metropolitana e Banabuiú.....	41
Gráfico 2.8 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para as barragens da bacia do Litoral.....	42
Gráfico 2.9 – Hidrograma obtido pelo método do SCS e pela regressão para a barragem Figueiredo da bacia do Médio Jaguaribe.....	42
Gráfico 3.1 – Influência do tempo de concentração sobre a vazão máxima de $Tr = 1.000$ anos.....	64
Gráfico 3.2 – Influência do tempo de concentração sobre a vazão máxima de $Tr = 10.000$ anos.....	65
Gráfico 3.3 – Influência da área da bacia hidrográfica sobre a vazão máxima de $Tr = 1.000$ anos.....	66
Gráfico 3.4 – Influência da área da bacia hidrográfica sobre a vazão máxima de $Tr = 10.000$ anos.....	66
Gráfico 3.5 – Influência do comprimento do rio principal sobre a vazão máxima de $Tr = 1.000$ anos.....	67
Gráfico 3.6 – Influência do comprimento do rio principal sobre a vazão máxima de $Tr = 10.000$ anos.....	68

Gráfico 3.7 – Influência da área da diferença de cota sobre a vazão máxima de $Tr = 1.000$ anos.....	69
Gráfico 3.8 – Influência da área da diferença de cota sobre a vazão máxima de $Tr = 10.000$ anos.....	69
Gráfico 3.9 – Influência do CN sobre a vazão máxima de $Tr = 1.000$ anos.....	70
Gráfico 3.10 – Influência do CN sobre a vazão máxima de $Tr = 10.000$ anos.....	70
Gráfico 3.11 – Calibração do método para $Tr = 1.000$ anos em escala logarítmica de base 10.....	73
Gráfico 3.12 – Calibração do método para $Tr = 10.000$ anos em escala logarítmica de base 10.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Localização e bacias hidrográficas das barragens analisadas.....	25
Tabela 2.2	– Áreas de drenagem em km <sup>2</sup> e tempos de concentração em horas.....	28
Tabela 2.3	– Parâmetros físicos e hidrológicos das barragens analisadas.....	29
Tabela 2.4	– Conjunto de equações utilizadas para verificar a regionalização.....	31
Tabela 2.5	– Matriz de correlações para o tempo de base ( $t_b$ ).....	32
Tabela 2.6	– Equações para a variável dependente $t_b$ .....	33
Tabela 2.7	– Matriz de correlações para o tempo de pico ( $t_{p0}$ ).....	34
Tabela 2.8	– Equações para a variável dependente $t_{p0}$ .....	34
Tabela 2.9	– Matriz de correlações para a vazão de pico ( $Q_{máx}$ ).....	35
Tabela 2.10	– Equações para a variável dependente $Q_{máx}$ .....	36
Tabela 2.11	– Sumário das equações de regressão para as variáveis do hidrograma.....	37
Tabela 2.12	– Parâmetros hidrográficos obtidos pelo modelo da regionalização.....	43
Tabela 3.1	– Localização e características das barragens analisadas.....	57
Tabela 3.2	– Dados das barragens obtidos dos projetos executivos.....	59
Tabela 3.3	– Sumário das variáveis adimensionais.....	62
Tabela 3.4	– Conjunto de equações utilizadas para verificar a regionalização.....	63
Tabela 3.5	– Sumário das equações adimensionais.....	71
Tabela 3.6	– Avaliação das equações em função da retirada de barragens ( $Tr = 1.000$ anos).....	74
Tabela 3.7	– Avaliação das equações em função da retirada de barragens ( $Tr = 10.000$ anos).....	75

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$X_1, X_2$ e $X_p$	Variáveis independentes
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ e $\beta_p$	Coefficientes de regressão
$\bar{x}$	Média da variável X
$x_i$	Observações da variável X
$\hat{y}$	Estimativa encontrada para a variável Y.
$\bar{y}$	Média da variável Y
$y_i$	Observações da variável Y
A	Área da bacia hidrográfica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CN	Curva Número
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S. A.
ff	Fator de Forma
Fr	Número de Froude Adaptado
FUNCAP	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
H	Diferença de cota entre o exutório e o ponto mais remoto da bacia
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HU	Hidrograma Unitário
HUS	Hidrograma Unitário Sintético
HUST	Hidrograma Unitário Sintético Triangular
L	Comprimento do rio principal
n	Tamanho da amostra.
P	Número de variáveis independentes da equação
$Q_{m\acute{a}x}$	Vazão máxima
$Q_{p1000}$	Vazão de pico para o Tr de 1.000 anos
$Q_{p10000}$	Vazão de pico para o Tr de 10.000 anos
r	Coefficiente de correlação
$r^2$	Coefficiente de determinação
SCS	Soil Conservation Service
$S_e$	Erro padrão da equação encontrada
SI	Sistema Internacional de Unidades

$S_o$	Declividade
$SQ \text{ Reg}(X_p)$	Diferença entre o somatório quadrático da regressão com $X_p$ e sem $X_p$ .
SRH	Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará
$S_Y$	Desvio padrão amostral da variável dependente
$t_b$	Tempo de base
$T_c$	Tempo de concentração
$t_{p0}$	Tempo de pico
$T_r$	Tempo de Retorno
USA	Estados Unidos da América
$X$	Variável independente
$X_p$	Uma das variáveis independentes
$Y$	Variável dependente
$\lambda$	Parâmetro de Fluxo
$\pi$	Vazão Adimensionalizada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1	Contextualização.....	17
1.2	Objetivos.....	19
1.3	Estrutura do trabalho.....	19
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CEARÁ.....</b>	<b>21</b>
2.1	Introdução .....	23
2.2	Metodologia.....	25
2.2.1	<i>Área de estudo</i> .....	25
2.2.2	<i>Obtenção dos HUST's</i> .....	27
2.2.3	<i>Regionalização dos HUST's</i> .....	28
2.3	Resultados e Discussão.....	31
2.4	Conclusões.....	45
2.5	Agradecimentos.....	46
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>3</b>	<b>MODELO DE REGIONALIZAÇÃO ADIMENSIONAL DE VAZÕES MÁXIMAS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CEARÁ.....</b>	<b>50</b>
3.1	Introdução.....	52
3.2	Metodologia.....	55
3.2.1	<i>Área de estudo</i> .....	55
3.2.2	<i>Dados utilizados</i> .....	58
3.2.3	<i>Adimensionalização</i> .....	60
3.2.4	<i>Avaliação da equação de regressão</i> .....	62
3.3	Resultados e Discussão.....	64
3.3.1	<i>Análise de influência dos parâmetros sobre a vazão máxima</i> .....	64
3.3.2	<i>Obtenção e análise das equações regionalizadas</i> .....	71
3.4	Conclusões.....	75
3.5	Agradecimentos.....	76
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>80</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As barragens são essenciais para armazenar os recursos hídricos e atender aos diferentes usos da sociedade, seja doméstico, dessedentação de animais, industrial ou irrigação. Desta forma, pode-se presumir que a construção de reservatórios implica em desenvolvimento econômico e afeta na qualidade de vida da população, principalmente para as regiões com pouca oferta desse recurso (HE, WANG e HUANG, 2008). Porém, em caso de falha, os efeitos podem ser devastadores, desde perdas de vida até impactos irreversíveis no meio ambiente.

Devido aos recentes acontecimentos com os desastres envolvendo barragens de rejeitos em Mariana e Brumadinho, a sociedade brasileira e os poderes públicos aumentaram sua preocupação com a segurança dessas estruturas.

Anualmente, desde 2011, a Agência Nacional de Águas (ANA) apresenta o Relatório de Segurança de Barragens para que a sociedade possa acompanhar a evolução da segurança de barragens e informar-se sobre as atuais condições dessas infraestruturas. No ano de 2018, esse relatório indicou que o Ceará apresentava nove barragens de alto risco, a maioria de responsabilidade do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) (ANA, 2018). Isso indica uma preocupação existente no estado, já que essas barragens apresentam problemas em suas estruturas e devem ser monitoradas constantemente devido ao seu alto dano potencial.

A principal grandeza que caracteriza um escoamento superficial é a vazão (VILLELA e MATTOS, 1975). Através dela é possível dimensionar os elementos mais importantes dos projetos de obras hidráulicas, logo, o descuido com os cálculos envolvendo essa grandeza pode acarretar consequências danosas ao meio ambiente e ao homem. Ainda segundo Villela e Mattos (1975), as enchentes, que são grandes vazões no escoamento de um rio, e as inundações, que se caracterizam pelo extravasamento do canal natural do rio, são exemplos das consequências das cheias. Portanto, é necessário realizar estudos cuidadosos de formação e propagação das cheias para diminuir os riscos inerentes desse fenômeno hidrológico.

No ano de 1960, a barragem Orós, no Ceará, rompeu causando a morte de 50 pessoas e provocando vários prejuízos na região do Baixo Jaguaribe (DNOCS, 2010). O acidente foi causado pelo galgamento da barragem provocado por uma cheia excepcional

naquele ano. O galgamento ou overtopping corresponde à passagem da água sobre a estrutura, devido a um evento hidrológico extremo, de modo que o barramento e o vertedouro não são suficientes para deter essa onda de cheia.

Foster, Fell e Spannagle (2000) apontaram que 46% das falhas em grandes barragens, até o ano de 1986, foram provocadas por galgamento. Além disso, Zhang et al. (2016) utilizaram 1065 casos de falhas em todo o mundo para constatar que falhas por galgamento são a segunda maior causa de acidentes com barragens. Tais percentuais indicam que os fenômenos de cheias são importantes para a segurança de barragens e devem-se buscar os melhores métodos para o seu dimensionamento.

A hidrologia tenta prever o comportamento hidrológico numa bacia através de modelos. Esses modelos incorporam diferentes variáveis no espaço e no tempo de modo a permitir uma simulação mais próxima da realidade. Desse modo, existem alguns modelos e métodos que tentam prever as cheias, como o método da regionalização.

A regionalização consiste em aproveitar informações de regiões monitoradas para as regiões com pouco ou nenhum monitoramento. Portanto, a regionalização é o conjunto de procedimentos que exploram ao máximo as informações existentes numa região e buscam estimar características hidrológicas num local com poucos dados (BARBOSA et al., 2005). Essa técnica é bastante utilizada para prever vazões máximas em vários lugares do mundo, indicando, assim, sua boa aceitação por parte da comunidade científica.

A regionalização pode utilizar os métodos de regressão para a obtenção de modelos. A regressão, segundo Naghettini e Pinto (2007), consiste na análise do comportamento de variáveis dependentes, como a vazão e os elementos de um hidrograma, em função de uma ou mais variáveis explicativas, como as características da bacia. Essa técnica possui bastante adesão em estudos de regionalização por ser de fácil utilização e por apresentar bons resultados.

Diante do exposto, os fenômenos extremos, como as cheias, são complexos e necessitam de ferramentas para sua previsão. Alguns estudos apontam que o galgamento é uma das principais causas de ruptura em barragens ao redor do mundo. Além disso, existem poucas estações pluviométricas e fluviométricas no território cearense, dificultando, assim, a obtenção de dados importantes para a previsão de cheias. Entretanto, como o Ceará destaca-se pelo seu elevado número de reservatórios construídos (LIMA NETO, WIEGAND, ARAÚJO, 2011; CAMPOS et al., 2016), podem-se aproveitar as informações de projetos dessas estruturas e utilizar para regiões com pouco monitoramento.

## **1.2 Objetivos**

Como forma de contribuir para os estudos de regionalização e análise de bacias hidrográficas com pouco monitoramento, propõe-se neste trabalho duas contribuições envolvendo a regionalização hidrológica de bacias onde estão inseridas barragens cearenses. A primeira contribuição visa regionalizar um método proposto pelo Soil Conservation Service (SCS), chamado de Hidrograma Unitário Sintético Triangular. A segunda contribuição propõe regionalizar vazões máximas utilizando equações adimensionais.

Portanto, este trabalho pretende contribuir para a regionalização hidrológica do Ceará, bem como para regiões semelhantes com poucos dados. Dessa forma, órgãos gestores dos recursos hídricos dessas regiões podem empregar essas ferramentas como um cálculo expedito para o dimensionamento de barragens.

## **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho encontra-se assim estruturado: o Capítulo 1 disserta sobre a contextualização, a justificativa e o objetivo; o Capítulo 2 apresenta a regionalização de Hidrogramas Unitários Sintéticos em relação ao método SCS; no Capítulo 3 desenvolve-se uma regionalização de vazões máximas utilizando equações adimensionais para diferentes períodos de retorno. Destaca-se que nestes dois capítulos últimos encontram-se tópicos relacionados ao resumo, introdução, metodologia, resultados, discussões, conclusões, agradecimentos e referências.

## REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. **Relatório de Segurança de Barragens 2018**. Brasília: ANA, 2019.
- BARBOSA, S. E. S.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; RODRIGUES, V. C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, média de longo período e mínimas de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 64-71, 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/S-141341522005000100008>
- 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. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>
- DNOCS. Departamento Nacional de Obras Contra a Seca. **Transbordamento das águas no Orós completa 50 anos**. 2010. Disponível em: <[https://www.dnocs.gov.br/php/comunicacao/noticias.php?f\\_registro=2006&f\\_opcao=imprimir&p\\_view=short&f\\_header=1](https://www.dnocs.gov.br/php/comunicacao/noticias.php?f_registro=2006&f_opcao=imprimir&p_view=short&f_header=1)>. Acesso em: 31 jan. 2020.
- FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 37, n. 5, p. 1025–1061, 2000. doi:10.1139/t00-029
- HE, X. Y.; WANG, Z. Y.; HUANG, J. C. Temporal and spatial distribution of dam failure events in China. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, n. 4, p. 398-405, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(09\)60010-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(09)60010-X).
- LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C.; ARAÚJO, J. C. Sediment redistribution due to a dense reservoir network in a large semi-arid Brazilian basin. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 56, n. 2, p. 319-333, 2011.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- VILLELA, S. Marcondes; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- ZHANG, L.; PENG, M.; CHANG, D.; XU, Y. **Dam failure: mechanisms and risk assessment**. Singapore: John Wiley, 2016.

## **2. MODELO DE REGIONALIZAÇÃO DE HIDROGRAMAS UNITÁRIOS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CEARÁ**

### **RESUMO**

Entender as características hidrológicas de uma região é essencial para compreender seus problemas e, assim, propor soluções quanto à gestão dos recursos hídricos. Por isso, o presente trabalho elaborou um modelo de regionalização para a obtenção de hidrogramas unitários triangulares de bacias hidrográficas localizadas em barragens do semiárido cearense. As variáveis empregadas nas equações de regressão não linear foram: área de drenagem da bacia hidrográfica, comprimento do rio principal, vazão de pico, tempo de pico e tempo de base. Foram utilizados dados de projeto das barragens e pesquisas de caráter bibliográfico com significativas contribuições para os estudos hidrológicos. Nos resultados obtidos verificou-se boa aproximação entre as equações de regressão não linear e o método do hidrograma unitário sintético triangular, fato comprovado pelos testes estatísticos para cada caso. Concluiu-se que a regionalização definida para essas bacias pode ser considerada consistente e de fácil aplicação para análises preliminares em projetos hidráulicos similares.

**Palavras-chave:** Regionalização. Regressão. Hidrograma. Semiárido.

## **2. REGIONALIZATION MODEL FOR UNIT HYDROGRAPH FOR WATERSHEDS IN CEARÁ**

### **ABSTRACT**

Understanding the hydrological characteristics of a region is essential to understand its problems and, therefore, propose solutions regarding water resources management. Therefore, the present study elaborated a regionalization model to obtain triangular unitary hydrographs from watershed located in dams of Ceará semiarid region, Brazil. The variables used in the non-linear regression equations were: drainage area of the watershed, main river length, peak flow, peak time and base time. Dam design data and bibliographic research with significant contributions to hydrological studies were used. In the obtained results it was verified good approximation between the non-linear regression equations and the triangular synthetic unit hydrograph method, fact confirmed by the statistical tests for each case. It is concluded that the regionalization defined for these basins can be considered consistent and easy to apply for preliminary analysis in similar hydraulic projects.

**Keywords:** Regionalization. Regression. Hydrograph. Semiarid.

## 2.1 Introdução

O escoamento superficial pode ser considerado uma das fases mais importantes dentro do ciclo hidrológico para a engenharia, por isso, os estudos hidrológicos se concentram basicamente em como aproveitar esse recurso e como se proteger contra seu potencial de destruição. De acordo com Pádua (2015), esses estudos utilizam os princípios da hidrologia para projetar, planejar e operar estruturas físicas que lidam diretamente com os recursos hídricos, como é o caso das barragens.

Devido à importância das barragens para a região do semiárido brasileiro, pela falta de observações pluviométricas e pelos riscos inerentes dessas estruturas, é fundamental que haja uma busca contínua no aperfeiçoamento de métodos que possam prever, com o mínimo de erro possível, as cheias nas bacias (PAGANO et al., 2014).

A simples aplicação dos métodos tradicionais de obtenção de hidrogramas pode gerar problemas relacionados à falta de parâmetros importantes que contribuem significativamente para as cheias nas bacias. Além disso, a maioria desses métodos foi desenvolvida para bacias de outros países, dificultando, assim, a aplicabilidade para bacias com as características brasileiras (TUCCI, 2003).

Os métodos para estimar a ocorrência de fenômenos extremos na hidrologia necessitam de dados pluviométricos e fluviométricos. Porém, sem a devida manutenção nos poucos equipamentos existentes e até mesmo devido à falta deles, a obtenção dos dados de monitoramento das bacias brasileiras se torna um processo bastante exigente para o engenheiro (PORTO, 1977). Além dessa precariedade no monitoramento, mesmo existindo dados referentes às bacias, é necessário que essas amostras tenham um tamanho suficiente para a análise, requerendo um tempo de monitoramento adequado. Para tentar estimar esses valores extremos e tornar os projetos viáveis com o mínimo de erro possível, os hidrólogos recorreram à regionalização.

A regionalização tem como característica principal a transferência de informações de locais monitorados para bacias com pouco ou nenhum monitoramento (PÁDUA, 2015). Entretanto, segundo Tucci (2003), os métodos de regionalização apenas tentam minimizar a falta de informações para melhor ajustar os modelos hidrológicos, ou seja, não é utilizado para substituir valores existentes. Há vários métodos de regionalização hidrológica, como os descritos por Dalrymple (1960), ELETROBRÁS (1985), Baena et al. (2004), Laaha e Blöschl (2006), Isik e Singh (2008), Sarhadi e Modarres (2011) e Wolff (2017).

Segundo Tucci (2009), os modelos que tentam representar o escoamento apresentam algumas limitações decorrentes às variações do relevo, disponibilidade de informações e características numéricas de solução das equações. Dentre os principais modelos, o hidrograma unitário é um dos mais utilizados (SILVA, PALÁCIO JÚNIOR e CAMPOS, 2014). Conforme Campos, Rabelo e Lima Neto (2019), Sherman, em 1932, foi o primeiro a apresentar o hidrograma unitário ou método HU, que passaria por vários aperfeiçoamentos ao longo dos anos. O HU, de acordo com Naghettini (2012), é um hidrograma para uma precipitação efetiva constante, de certa duração, distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia e com altura de precipitação igual a uma unidade pluviométrica.

Para regiões onde os dados históricos são insuficientes ou inexistentes, o hidrograma é estimado pelo hidrograma unitário sintético ou HUS. Esse modelo baseia-se em parâmetros empíricos para estimar valores de vazões e de alguns tempos característicos, como o tempo de pico e o tempo de base. A simplicidade, a facilidade e a necessidade de menos dados, caracterizam o hidrograma unitário sintético (BHUNYA, PANDA e GOEL, 2011).

O Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUST) foi proposto pelo Departamento de Conservação do Solo (Soil Conservation Service) dos EUA (SCS, 1972). De acordo com Campos, Rabelo e Lima Neto (2019), esse modelo consiste num gráfico de vazão pelo tempo com uma chuva efetiva unitária de determinada duração. Esse gráfico é chamado de hidrograma e possui um formato triangular devido às relações propostas pelo método entre os parâmetros necessários.

Como forma de contribuir para os estudos de regionalização e análise de bacias hidrográficas com pouco monitoramento, propõe-se neste trabalho a regionalização do Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUST) em bacias onde estão inseridas algumas barragens cearenses. Propõe-se elaborar um método de regressão consistente para a determinação de vazões de pico para projetos de estruturas hidráulicas. As principais diferenças deste trabalho em relação aos estudos de Zaman, Rahman e Haddad (2011), Liu, Xie e Zeng (2016) e Virães e Cirilo (2019) são: a incorporação de várias características da bacia no cálculo das vazões; a aplicação do método do hidrograma para um número significativo de amostras e a utilização de dados reais de projetos.



## 2.2 Metodologia

A metodologia aplicada neste trabalho foi dividida em três partes: i) Obtenção dos dados, ii) Cálculo dos HUST's de acordo com o método SCS e iii) Regionalização dos HUST's utilizando a regressão múltipla não linear. A Figura 2.1 ilustra a metodologia utilizada.

Figura 2.1 – Metodologia utilizada neste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.1 Área de estudo

A seguir estão listadas as barragens analisadas, suas respectivas cidades, rios barrados e as bacias hidrográficas cearenses nas quais estão inseridas.

Tabela 2.1 – Localização e bacias hidrográficas das barragens analisadas.

Barragem	Município	Rio/Riacho	Bacia
Aracoiaba	Aracoiaba	Aracoiaba	Metropolitana
Benguê	Aiuaba	Umbuzeiro	Alto Jaguaribe
Figueiredo	Iracema	Figueiredo	Médio Jaguaribe
Gameleira	Itapipoca	Mundaú	Litoral
Gangorra	Granja	Gangorra	Coreaú
Germinal	Palmácia	Pacoti	Metropolitana
Jaburu I	Ubajara	Jaburu	Serra da Ibiapaba
Jatobá	Ipueiras	Jatobá	Acaraú
Jenipapeiro	Baixio	Jenipapeiro	Salgado
Malcozinhado	Cascavel	Mal Cozinhado	Metropolitana
Mamoeiro	Antonina do Norte	Conceição	Alto Jaguaribe
Missi	Miraíma	Missi	Litoral
Olho D'água	Várzea Alegre	Machado	Salgado

Barragem	Município	Rio/Riacho	Bacia
Parambu	Parambu	Puiú	Alto Jaguaribe
Poço da Pedra	Campos Sales	Conceição	Alto Jaguaribe
Rosário	Lavras da Mangabeira	Rosário	Salgado
Taquara	Cariré	Jaibaras	Acaraú
Ubalzinho	Cedro	São Miguel	Salgado
Umari	Madalena	Barrigas	Banabuiú

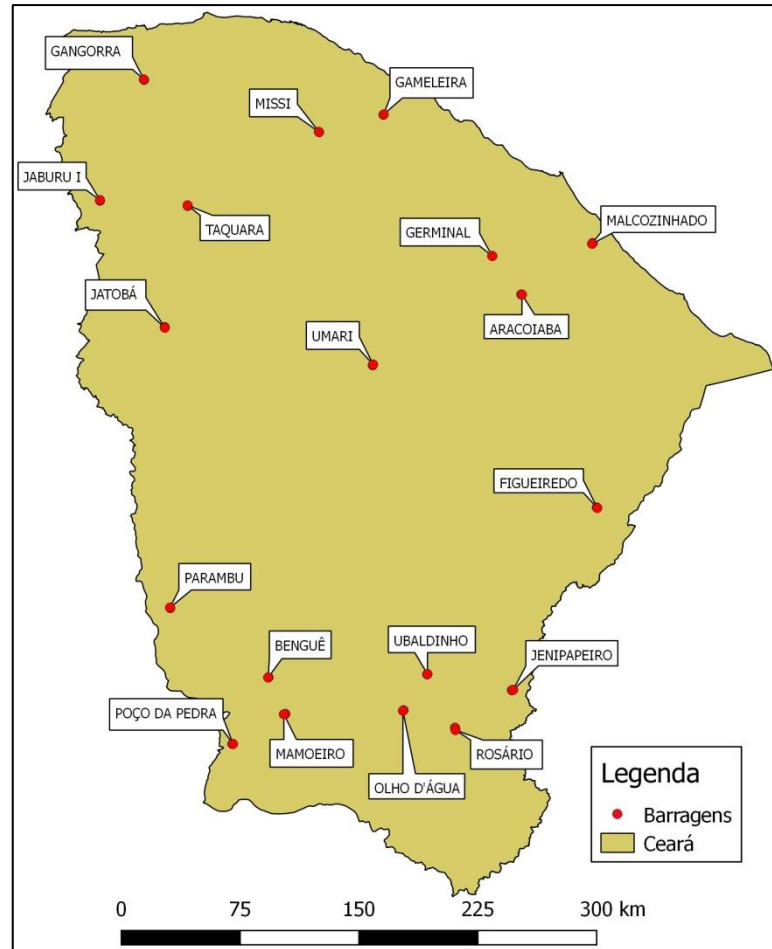
Fonte: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará.

As informações aqui apresentadas foram extraídas dos estudos executivos dos projetos das barragens e do Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. O acesso deu-se por meio da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH).

A maioria das barragens analisadas pertence a municípios que estão inseridos no clima semiárido. Esse clima é caracterizado pela baixa umidade e baixos índices pluviométricos (CAMPOS et al., 2016; RABELO e LIMA NETO, 2018). Tamanha aridez permite entender a preocupação existente com a água e com as estruturas hídricas do estado.

Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (2018), existem 12 bacias hidrográficas gerenciadas pelo estado, das quais 9 foram abordadas neste trabalho, exceto as bacias do Curu, Baixo Jaguaribe e Sertões de Crateús. Isso acarreta numa análise mais variada e abrangente de estudo, fazendo com que a regionalização consiga englobar características importantes do semiárido cearense. Além disso, na Figura 2.2 está representado o mapa cearense com as barragens que compõem este estudo.

Figura 2.2 – Localização das barragens analisadas no mapa do Ceará.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 2.2.2 Obtenção dos HUST's

Para a obtenção dos hidrogramas unitários, foi utilizado o método do SCS. Esse método consiste em encontrar a vazão máxima e os tempos do hidrograma por meio apenas do tempo de concentração e da área da bacia de drenagem.

Na Tabela 2.2 são apresentados o tempo de concentração, a área da bacia de drenagem e a ferramenta utilizada na aplicação do método. Na maioria dos projetos dessas barragens foi utilizado o software HEC-HMS, os demais empregaram diretamente as fórmulas do método SCS. Esses dados foram obtidos pelos projetos executivos dessas barragens.

Tabela 2.2 – Áreas de drenagem em km<sup>2</sup> e tempos de concentração em horas.

Barragem	A (km <sup>2</sup> )	Tempo de Concentração (h)	Ferramenta
Taquara	565,73	14,00	HEC-HMS
Jatobá	41,38	2,93	HEC-HMS
Gameleira	519,77	1,10	HEC-HMS
Mamoeiro	1887,60	12,03	HEC-HMS
Poço da Pedra	800,00	21,03	HEC-HMS
Figueiredo	1621,00	36,00	HEC-HMS
Rosário	329,00	9,80	HEC-HMS
Olho D'água	71,80	4,10	Direto
Jaburu I	314,10	7,09	HEC-HMS
Ubalzinho	176,00	5,60	HEC-HMS
Gangorra	104,70	5,95	HEC-HMS
Benguê	1062,30	15,00	Direto
Malcozinhado	240,00	13,30	HEC-HMS
Parambu	104,00	3,50	Direto
Aracoiaba	588,60	8,00	Direto
Missi	652,60	6,40	HEC-HMS
Umari	975,00	10,50	HEC-HMS
Jenipapeiro	186,40	4,05	HEC-HMS
Germinal	94,00	3,00	HEC-HMS

Fonte: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará.

### 2.2.3 Regionalização dos HUST's

Nesta etapa, o modelo utilizado para a obtenção dos HUST's foi estudado para a obtenção de modelos regionais que tentassem descrever o comportamento da bacia hidrográfica diante de um evento chuvoso, por meio de um hidrograma de cheia, em função das suas características físicas e hidrológicas.

Como o número de barragens analisadas é relativamente baixo, optou-se por organizá-las em um único grupo. Além disso, o principal critério utilizado para tentar homogeneizar a amostra foi a proximidade espacial, levando em consideração que a maioria delas pertencem ao semiárido cearense.

Para a regionalização do HUST foi utilizada a Regressão Múltipla Não Linear. Para tal, foram realizados estudos de correlação entre as variáveis físicas das bacias em função dos parâmetros de entrada do método utilizado. As variáveis utilizadas foram: área da bacia hidrográfica (A), comprimento do talvegue principal (L), tempo de concentração ( $T_c$ ), vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), tempo de pico ( $t_{p0}$ ) e tempo de base ( $t_b$ ) do hidrograma.

Foram analisadas as variáveis que melhor se correlacionassem com as características físicas escolhidas. Essas análises foram feitas por meio do coeficiente de determinação, variância da variável explicada e o erro padrão de estimativa.

Todos os cálculos e análises foram realizados por meio de planilha eletrônica. Os parâmetros dependentes e independentes dos HUST obtidos dos projetos são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Parâmetros físicos e hidrológicos das barragens analisadas.

Barragem	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	A (km <sup>2</sup> )	$t_{p0}$ (h)	$t_b$ (h)	$T_c$ (h)	L (km)
Aracoiaba	21,87	588,60	5,60	14,95	8,00	53,10
Benguê	21,05	1062,30	10,50	28,03	15,00	73,00
Figueiredo	13,38	1621,00	25,20	67,28	36,00	88,30
Gameleira	12,84	519,77	8,42	22,48	1,10	59,00
Gangorra	5,23	104,70	4,16	11,12	5,95	18,00
Germinal	9,31	94,00	2,10	5,61	3,00	23,00
Jaburu I	13,17	314,10	4,96	12,30	7,09	36,37
Jatobá	11,18	41,38	0,77	2,06	2,93	9,60
Jenipapeiro	13,68	186,40	2,84	7,57	4,05	27,80
Malcozinhado	5,36	240,00	9,31	24,86	13,30	22,50
Mamoeiro	26,68	1887,60	14,72	39,30	12,03	107,63
Missi	30,31	652,60	4,48	11,96	6,40	57,57
Olho D'água	5,20	71,80	2,87	7,66	4,10	21,50
Parambu	8,83	104,00	2,45	6,54	3,50	16,80
Poço da Pedra	25,06	800,00	6,64	17,72	21,03	44,90
Rosário	9,98	329,00	6,86	18,32	9,80	52,30
Taquara	12,01	565,73	9,80	26,17	14,00	42,75
Ubalzinho	9,34	176,00	3,92	10,47	5,60	27,00
Umari	27,60	975,00	7,35	19,62	10,50	65,50

Fonte: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará.

A primeira etapa consiste em determinar as correlações entre as variáveis independentes e dependentes. A avaliação foi feita pelo coeficiente de correlação linear, cujos valores variam entre 1 e -1. Esse coeficiente mede a dependência linear entre as variáveis.

Destaca-se a utilização da técnica de linearização logarítmica para transformar as equações não lineares em lineares, de modo a tornar mais fáceis os cálculos dos coeficientes de regressão e os testes estatísticos. (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Após a elaboração da tabela de correlação, selecionaram-se duas variáveis com maiores coeficientes em relação à variável dependente utilizada. As variáveis independentes que apresentaram coeficiente de correlação maior que 0,85 entre si foram analisadas e, conforme recomendação de Naghettini e Pinto (2007), uma das duas variáveis era eliminada, já que variáveis colineares não fornecem novas informações à equação. Neste trabalho, as variáveis dependentes escolhidas foram o tempo de base ( $t_b$ ), o tempo de pico ( $t_{p0}$ ) e a vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ).

Dois importantes técnicas utilizadas para avaliar as equações obtidas foram o F total e F parcial. A análise do F total permite avaliar a capacidade do conjunto de variáveis independentes em explicar a variável dependente. O valor encontrado deve ser comparado com o teste de hipótese, modelado pela distribuição Snedecor. Se o valor do F total for maior que o valor encontrado para a distribuição de Snedecor, então, a variável independente contribui de modo significativo para a regressão. Já o F parcial avalia a contribuição de uma única variável independente em explicar a variável dependente. O valor encontrado também deve ser maior que o modelado pela distribuição Snedecor.

Por fim, a última análise realizada consiste na comparação do erro padrão da equação encontrada ( $S_e$ ) com o desvio padrão amostral da variável dependente ( $S_Y$ ). O erro padrão deve ser menor que o desvio padrão da variável dependente para que a equação de regressão seja considerada de bom ajuste.

Na Tabela 2.4 estão listados os testes estatísticos utilizados para a avaliação das equações de regressão com suas respectivas fórmulas.

Tabela 2.4 – Conjunto de equações utilizadas para verificar a regionalização.

Símbolo	Fórmula
$r$	$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
$r^2$	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
F total	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}{\sum (y_i - \hat{y})^2 / (n - P - 1)}$
F parcial	$\frac{SQ Reg (X_p)}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}$
$S_e$	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n - P - 1}}$
$S_Y$	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

$x_i$  e  $y_i$  são as observações das variáveis X e Y, respectivamente;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias de cada variável X e Y, respectivamente;

$\hat{y}$  é a estimativa encontrada para a variável Y;

P é o número de variáveis independentes da equação;

n é o tamanho da amostra;

$X_p$  é uma das variáveis independentes;

SQ Reg( $X_p$ ) é a diferença entre o somatório quadrático da regressão com  $X_p$  e o somatório quadrático da regressão sem  $X_p$ .

### 2.3 Resultados e Discussão

Seguindo a metodologia, foram obtidos os gráficos dos HUST, de acordo com o método do SCS. Após a construção dos hidrogramas pelo método do SCS, deu-se início à regionalização desses hidrogramas pelos métodos de regressão.

Antes de iniciar os cálculos das equações de regressão, foi necessário encontrar os valores da distribuição F de Snedecor para o nível de significância de  $\alpha = 0,05$ . Para equações envolvendo uma e duas variáveis independentes, os valores encontrados foram, respectivamente, 4,45 e 3,63. Já os valores para as equações envolvendo três e quatro

variáveis independentes foram, respectivamente, 3,29 e 3,11. Esses valores foram obtidos pela distribuição F de Snedecor. Além disso, o desvio padrão das variáveis  $t_b$ ,  $t_{p0}$  e  $Q_{m\acute{a}x}$  foi, respectivamente, 0,789, 0,789 e 0,561.

A primeira variável dependente escolhida para iniciar os cálculos foi o tempo de base ( $t_b$ ) do hidrograma. Inicialmente foi elaborada a matriz de correlação entre as variáveis desejadas buscando encontrar as melhores variáveis independentes que se correlacionassem com a variável dependente.

Tabela 2.5 – Matriz de correlações para o tempo de base ( $t_b$ ).

MATRIZ DE CORRELAÇÕES					
Variável	$t_b$ (h)	$T_c$ (h)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	A (km <sup>2</sup> )	L (km)
$t_b$ (h)	1				
$T_c$ (h)	0,858	1			
$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	0,217	0,235	1		
A (km <sup>2</sup> )	0,835	0,692	0,657	1	
L (km)	0,778	0,560	0,672	0,953	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Tabela 2.5, os resultados obtidos mostraram uma maior correlação linear entre as variáveis independentes  $T_c$ , A e a variável dependente  $t_b$ . Além disso, percebeu-se uma colinearidade entre A e L. O coeficiente de correlação entre ambas foi de 0,953, por isso, todas as equações envolvendo as variáveis A e L ao mesmo tempo, foram descartadas.

Na sequência, foram inseridas uma a uma as demais variáveis independentes. A cada inserção, era calculado o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), F total, F parcial e o erro padrão. Na Tabela 2.6 são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.



Tabela 2.6 – Equações para a variável dependente  $t_b$ .

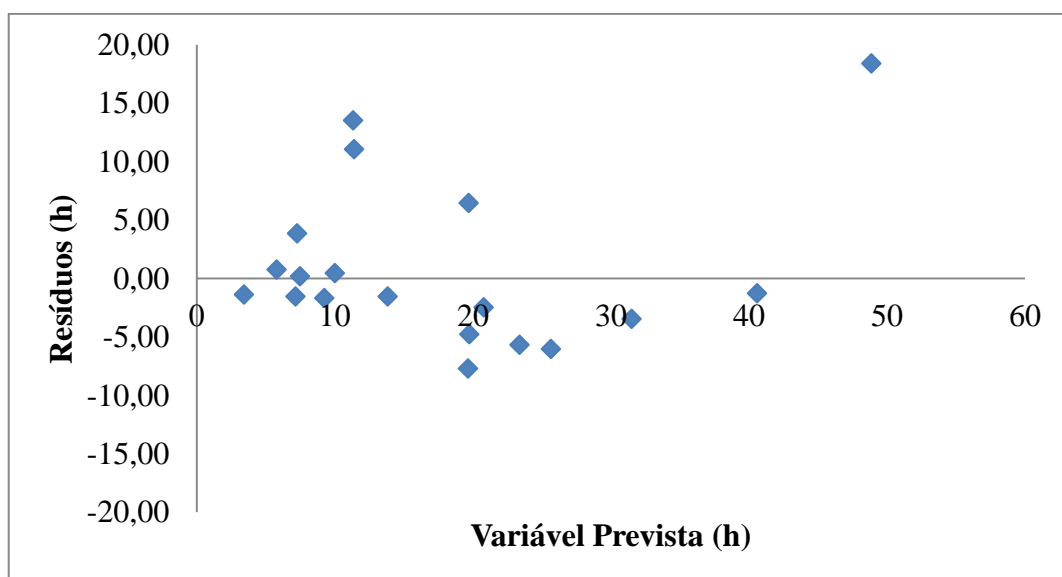
Equação	$r^2$	F Total	F parcial	$S_e$
$t_b = 3,93.T_c^{0,652}$	0,455	14,169	-	0,600
$t_b = 0,374.A^{0,627}$	0,767	55,867	-	0,392
$t_b = 0,433.T_c^{0,189}.A^{0,538}$	0,789	29,992	25,443	0,384
$t_b = 0,368.T_c^{0,320}.L^{0,835}$	0,792	30,422	25,913	0,382

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, a equação que atendeu a todos os testes de verificação e com o maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,792$ ) foi:

$$t_b = 0,368.T_c^{0,32}.L^{0,835} \quad (2.1)$$

O Gráfico 2.1 representa os resíduos gerados entre o  $t_b$  observado e o  $t_b$  previsto. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barragem Figueiredo com 18,4 h e o menor na barragem de Olho D'água com 0,17 h. Portanto, a barragem Figueiredo distanciou-se mais dos valores encontrados pelo método SCS, diferentemente da barragem Olho D'água que apresentou forte semelhança com o método. Tal resultado indica que o tempo de base pode ser induzido por outros fatores que não foram considerados na equação 2.1.

Gráfico 2.1 – Resíduos e os valores calculados de  $t_b$  pela equação obtida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda variável dependente escolhida para os cálculos foi o tempo de pico ( $t_{p0}$ ) do hidrograma. Inicialmente foi elaborada a matriz de correlação entre as variáveis.

Tabela 2.7 – Matriz de correlações para o tempo de pico ( $t_{p0}$ ).

MATRIZ DE CORRELAÇÕES					
	$t_{p0}$ (h)	$T_c$ (h)	$Q_{m\acute{a}x}$ ( $m^3/s$ )	$A$ ( $km^2$ )	$L$ (km)
$t_{p0}$ (h)	1				
$T_c$ (h)	0,858	1			
$Q_{m\acute{a}x}$ ( $m^3/s$ )	0,217	0,235	1		
$A$ ( $km^2$ )	0,834	0,692	0,657	1	
$L$ (km)	0,778	0,560	0,672	0,953	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Tabela 2.7, os resultados obtidos mostraram novamente uma maior correlação linear entre as variáveis independentes  $T_c$ ,  $A$  e a variável dependente  $t_{p0}$ . Na Tabela 2.8 são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.

Tabela 2.8 – Equações para a variável dependente  $t_{p0}$ .

Equação	$r^2$	F Total	F parcial	$S_e$
$t_{p0} = 1,478.T_c^{0,652}$	0,455	14,204	-	0,599
$t_{p0} = 0,141.A^{0,627}$	0,767	56,142	-	0,391
$t_{p0} = 0,163.T_c^{0,189}.A^{0,537}$	0,790	30,162	25,580	0,383

Fonte: Elaborado pelo autor.

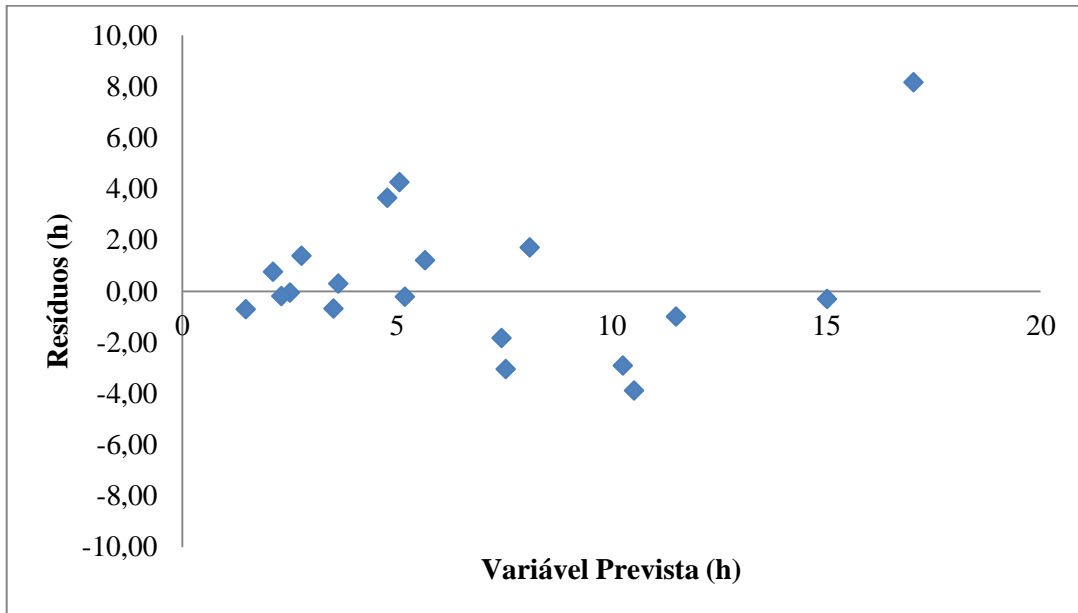
A regressão com o maior coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,790$ ) e que atende aos testes estatísticos foi:

$$t_{p0} = 0,163.T_c^{0,189}.A^{0,537} \quad (2.2)$$

O Gráfico 2.2 representa os resíduos gerados entre o  $t_{p0}$  observado e o  $t_{p0}$  previsto pelos valores da equação de regressão encontrada. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barragem Figueiredo com 8,16 h e o menor na barragem de

Parambu com -0,055 h. Novamente os valores indicam um considerável distanciamento da barragem Figueiredo em relação aos valores do método SCS.

Gráfico 2.2 – Resíduos e os valores calculados de  $t_{p0}$  pela equação obtida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A última variável dependente escolhida para os cálculos foi a vazão ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) do hidrograma.

Tabela 2.9 – Matriz de correlações para a vazão de pico ( $Q_{m\acute{a}x}$ ).

MATRIZ DE CORRELAÇÕES					
	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	A (km <sup>2</sup> )	$t_{p0}$ (h)	$T_c$ (h)	L (km)
$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	1				
A (km <sup>2</sup> )	0,657	1			
$t_{p0}$ (h)	0,217	0,834	1		
$T_c$ (h)	0,235	0,692	0,858	1	
L (km)	0,672	0,953	0,778	0,560	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 2.9, os resultados obtidos mostraram uma maior correlação linear entre as variáveis independentes A, L e a variável dependente  $Q_{m\acute{a}x}$ . Além disso, essas mesmas variáveis independentes possuem alto grau de colinearidade. O

coeficiente de correlação entre ambas foi de 0,953, por isso, todas as equações envolvendo as variáveis A e L ao mesmo tempo, foram descartadas.

A eliminação de A ou de L não foi baseada somente na maior correlação de L com  $Q_{\text{máx}}$  (0,672). Foi analisado também o coeficiente de determinação utilizando somente essas variáveis em função de  $Q_{\text{máx}}$ . A variável área (A) mostrou o melhor resultado para o coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,539$ ). Na Tabela 2.10 são apresentados somente os resultados que passaram nos testes de verificação.

Tabela 2.10 – Equações para a variável dependente  $Q_{\text{máx}}$ .

Equação	$r^2$	F Total	$S_e$
$Q_{\text{máx}} = 1,401.L^{0,613}$	0,485	16,040	0,414
$Q_{\text{máx}} = 1,476.A^{0,373}$	0,539	19,902	0,392

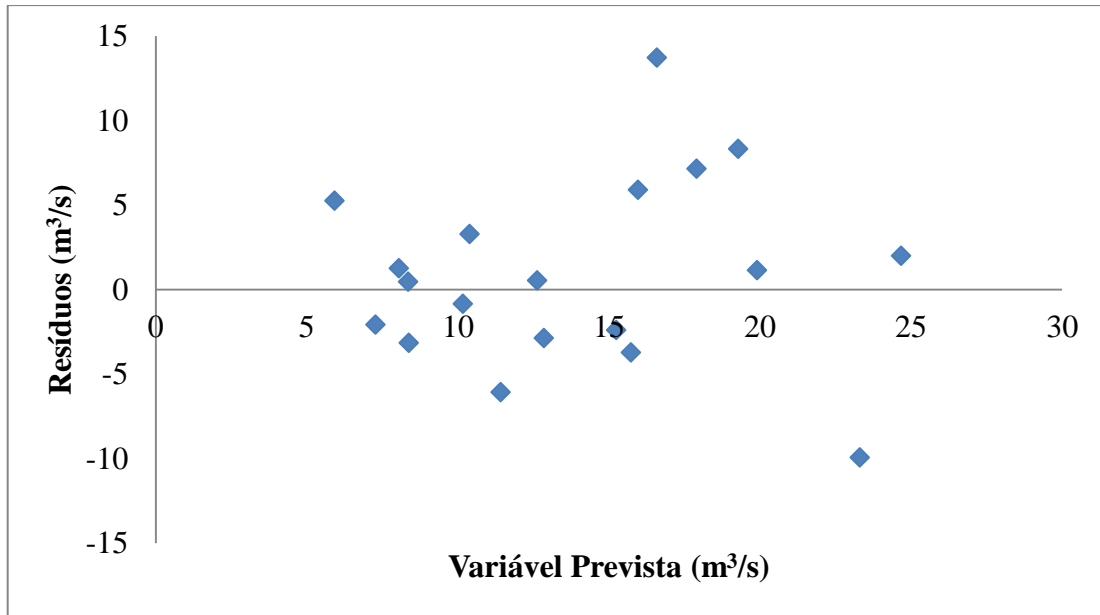
Fonte: Elaborado pelo autor.

A regressão escolhida para representar a variável  $Q_{\text{máx}}$  foi a seguinte:

$$Q_{\text{máx}} = 1,476.A^{0,373} \quad (2.3)$$

Portanto, a vazão máxima ficou em função da área da bacia. De modo geral, a área é a variável independente com maior peso na regressão e incorpora informações de outras características físicas da bacia (TUCCI, 2000; POLITANO e PISSARA, 2003). Além disso, Andrade et al. (2004) também regionalizou vazões para o Estado do Ceará utilizando apenas as áreas das bacias.

O Gráfico 2.3 representa os resíduos gerados entre o  $Q_{\text{máx}}$  observado e o  $Q_{\text{máx}}$  previsto pelos valores da equação de regressão encontrada. De acordo com os resultados, o maior resíduo encontrado foi na barragem Missi com 13,72 m<sup>3</sup>/s e o menor na barragem de Parambu com 0,47 m<sup>3</sup>/s. Portanto, Missi apresentou um maior distanciamento entre os métodos analisados, enquanto Parambu o menor.

Gráfico 2.3 – Resíduos e os valores calculados de  $Q_{\text{máx}}$  pela equação obtida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

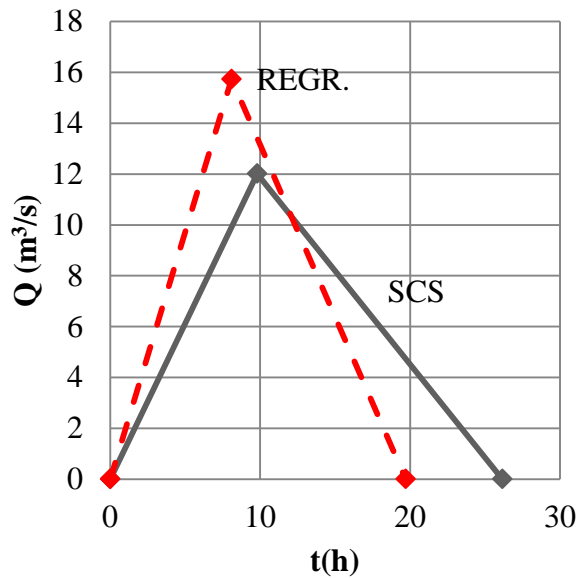
Tabela 2.11 – Sumário das equações de regressão para as variáveis do hidrograma.

Equação	$r^2$	F total	F parcial	$S_e$	$S_Y$
$t_b = 0,368.T_c^{0,32}.L^{0,835}$	0,792	30,422	25,913	0,382	0,789
$t_{p0} = 0,163.T_c^{0,189}.A^{0,537}$	0,790	30,162	25,580	0,383	0,789
$Q_{\text{máx}} = 1,476.A^{0,373}$	0,539	19,902	-	0,392	0,561

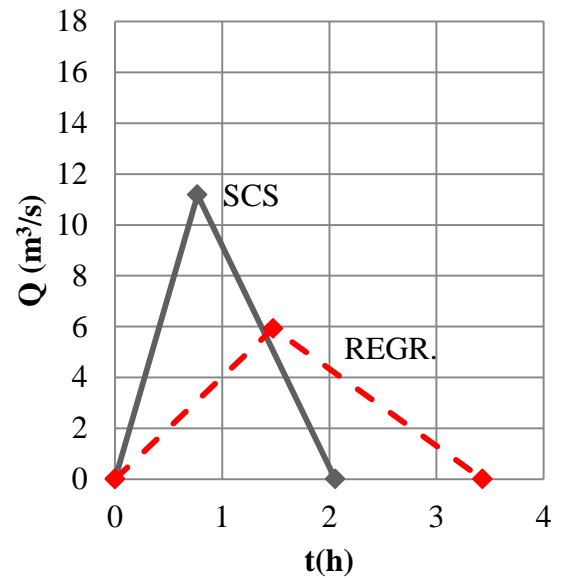
Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção das equações de regressão para os três parâmetros do HUST, foram elaborados gráficos comparativos para cada barragem. Os gráficos a seguir sintetizam os hidrogramas gerados pelo método do SCS e os hidrogramas gerados pelas equações de regressão obtidas.

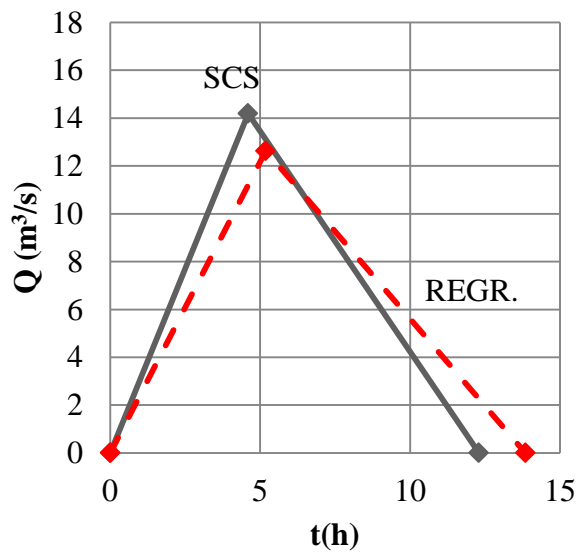
Gráfico 2.4 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias do Coreaú, Acaraú e Serra da Ibiapaba



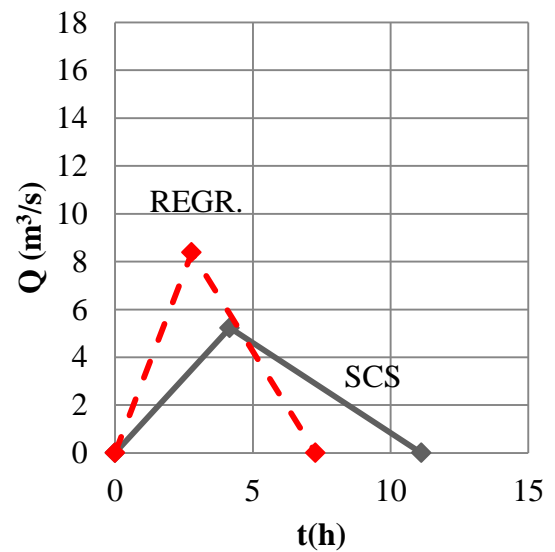
a) Taquara



b) Jatobá



c) Jaburu I



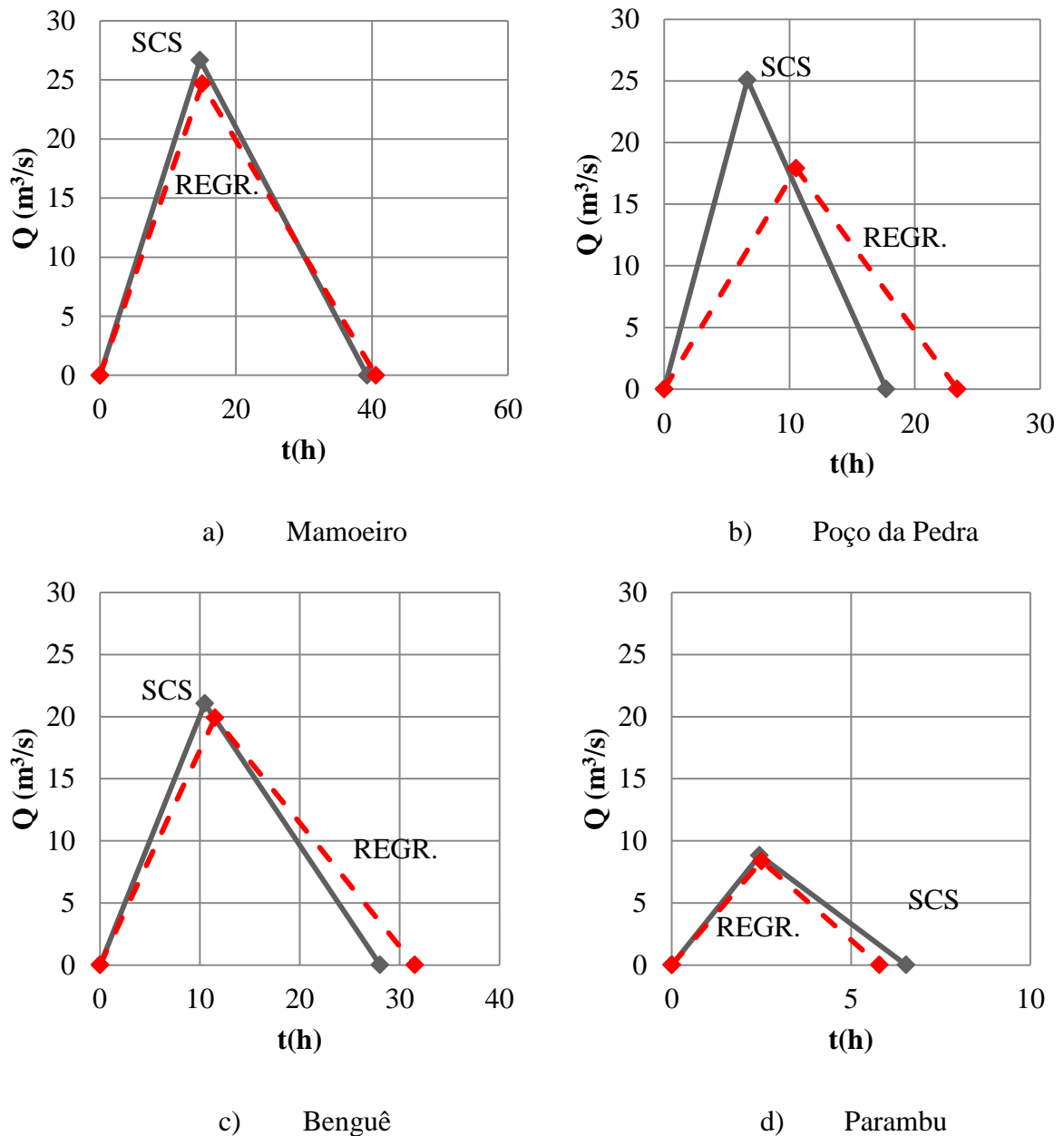
d) Gangorra

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 2.4 representa os hidrogramas das bacias que estão a Noroeste do Ceará. Na barragem Jaburu I é possível perceber que as equações de regressão obtiveram resultados próximos com as equações do método SCS. De acordo com Leme et al. (2017), a barragem Jaburu I está sob rocha sedimentar, assim, o fluxo subterrâneo desenvolve-se e faz

com que a taxa de esvaziamento do reservatório seja reduzida. Portanto, esse pode ser um dos motivos das regressões apresentarem bons resultados para essa barragem.

Gráfico 2.5 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Alto Jaguaribe.

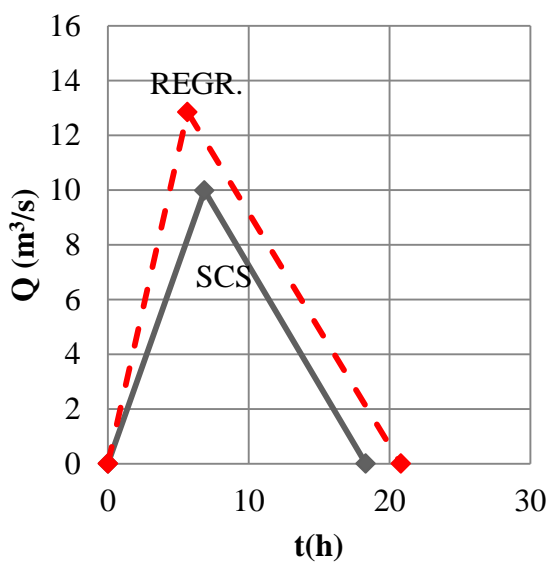


Fonte: Elaborado pelo autor.

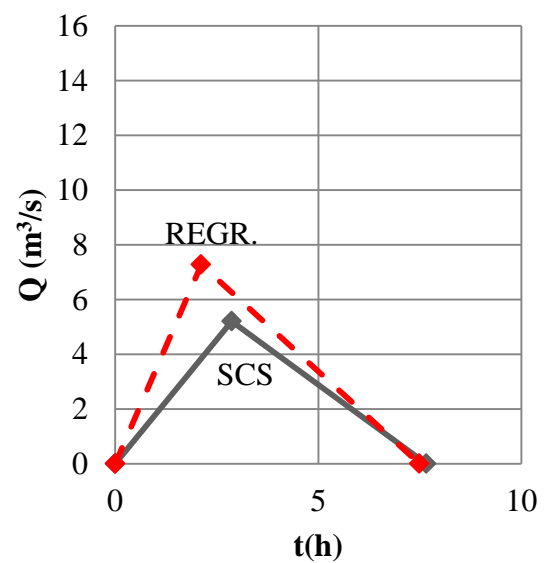
O Gráfico 2.5 representa os hidrogramas das bacias que estão a Sudoeste do Ceará. É possível notar que as equações de regressão obtiveram resultados próximos com as equações do método SCS para as três primeiras barragens. Porém, observou-se uma considerável diferença entre as regressões e o método SCS na barragem Poço da Pedra. Além

disso, todas as vazões de pico foram menores do que as vazões do método SCS, indicando, assim, uma tendência do modelo proposto em reduzir as vazões máximas para os reservatórios do Alto Jaguaribe. Esta tendência pode ser em decorrência da bacia do Alto Jaguaribe ser constituída de rochas do embasamento cristalino (cerca 81,28 % do seu território), contribuindo, assim, para o aumento da evaporação de água devido à dificuldade em infiltrar no solo (CEARÁ, 2009a).

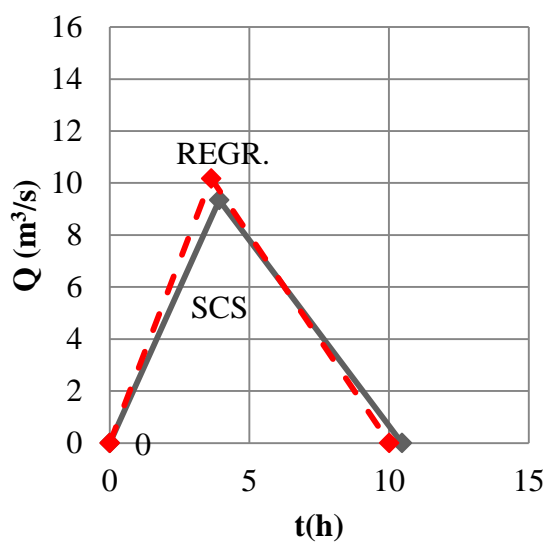
Gráfico 2.6 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens da bacia do Salgado.



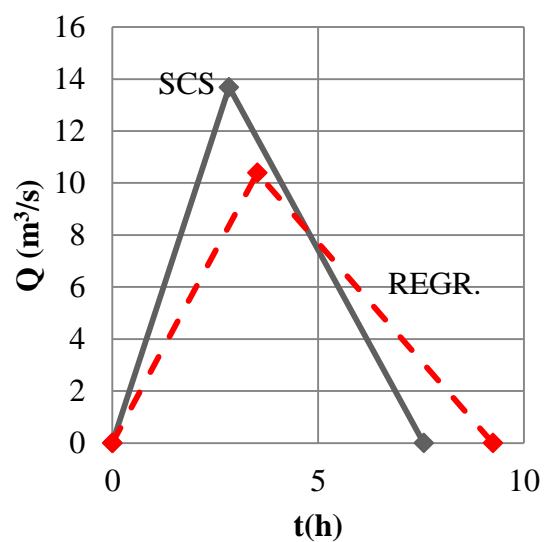
a) Rosário



b) Olho D'água



c) Ubaldinho



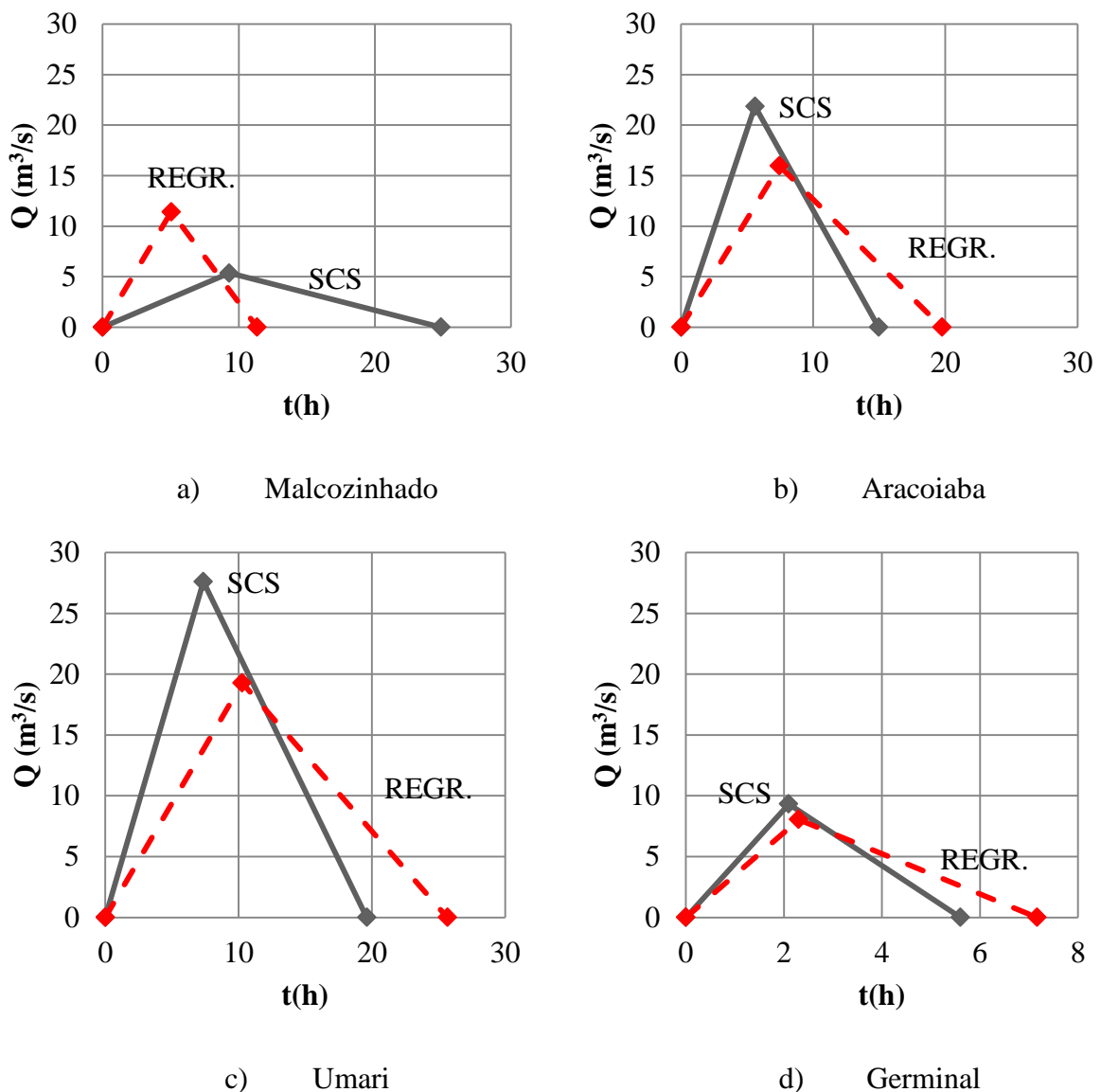
d) Jenipapeiro

Fonte: Elaborado pelo autor.



O Gráfico 2.6 representa os hidrogramas das bacias que estão a Sudeste do Ceará. Percebe-se que os resultados obtidos para as barragens da bacia do Salgado estão bem próximos do método SCS. Entretanto, nota-se que as vazões de pico do modelo proposto estão maiores nas três primeiras barragens.

Gráfico 2.7 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para barragens das bacias Metropolitana e Banabuiú.

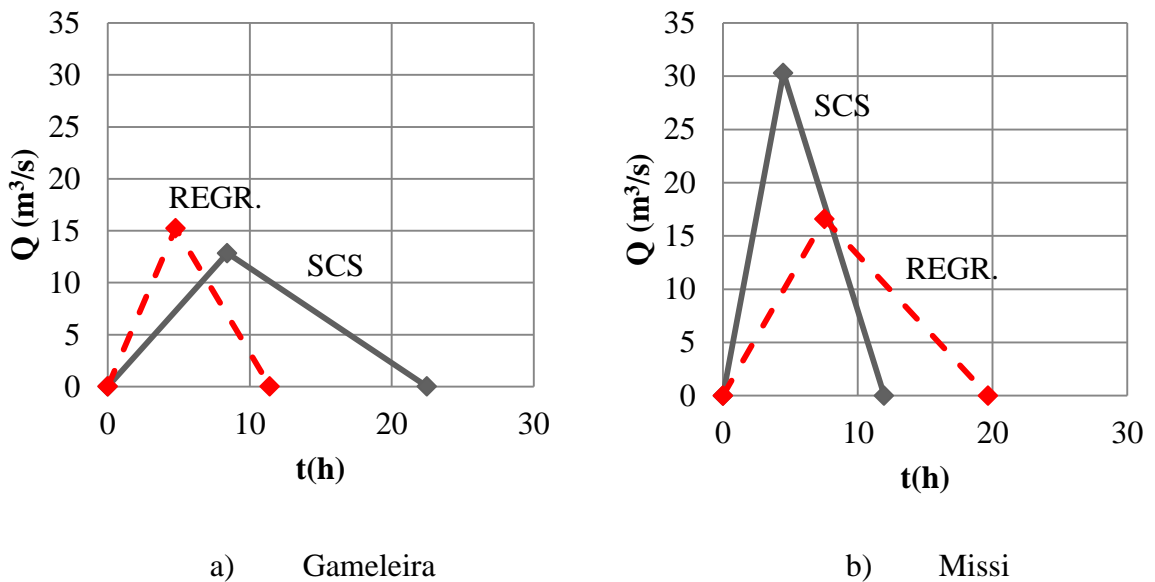


Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 2.7 apresenta os resultados obtidos para a bacia Metropolitana e bacia do Banabuiú. Essas bacias são consideradas estratégicas para o gerenciamento dos recursos hídricos do estado (RODRIGUES, AQUINO, THOMAZ, 2017). Percebe-se graficamente que

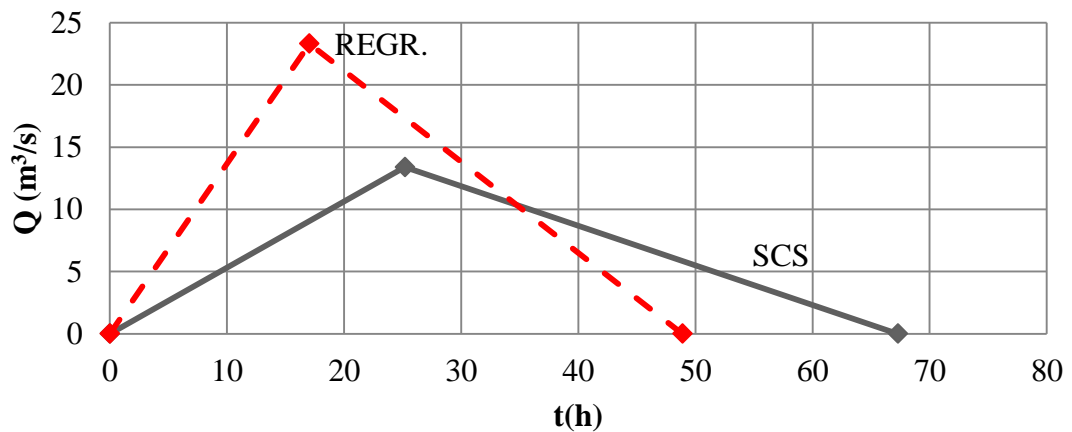
para essas barragens os resultados não foram próximos dos valores encontrados pelo método SCS.

Gráfico 2.8 – Hidrogramas obtidos pelo método do SCS e pela regressão para as barragens da bacia do Litoral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2.9 – Hidrograma obtido pelo método do SCS e pela regressão para a barragem Figueiredo da bacia do Médio Jaguaribe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 2.8 e 2.9 apresentam os hidrogramas da bacia do Litoral e do Médio Jaguaribe. Nota-se para essas barragens o seguinte comportamento: quando o modelo possui

uma vazão de pico maior que o método SCS, seus tempos de pico e de base são inferiores ao do método SCS.

Os resultados das simulações para regionalização do HUST para as 19 barragens estudadas são resumidos na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Parâmetros hidrográficos obtidos pelo modelo da regionalização.

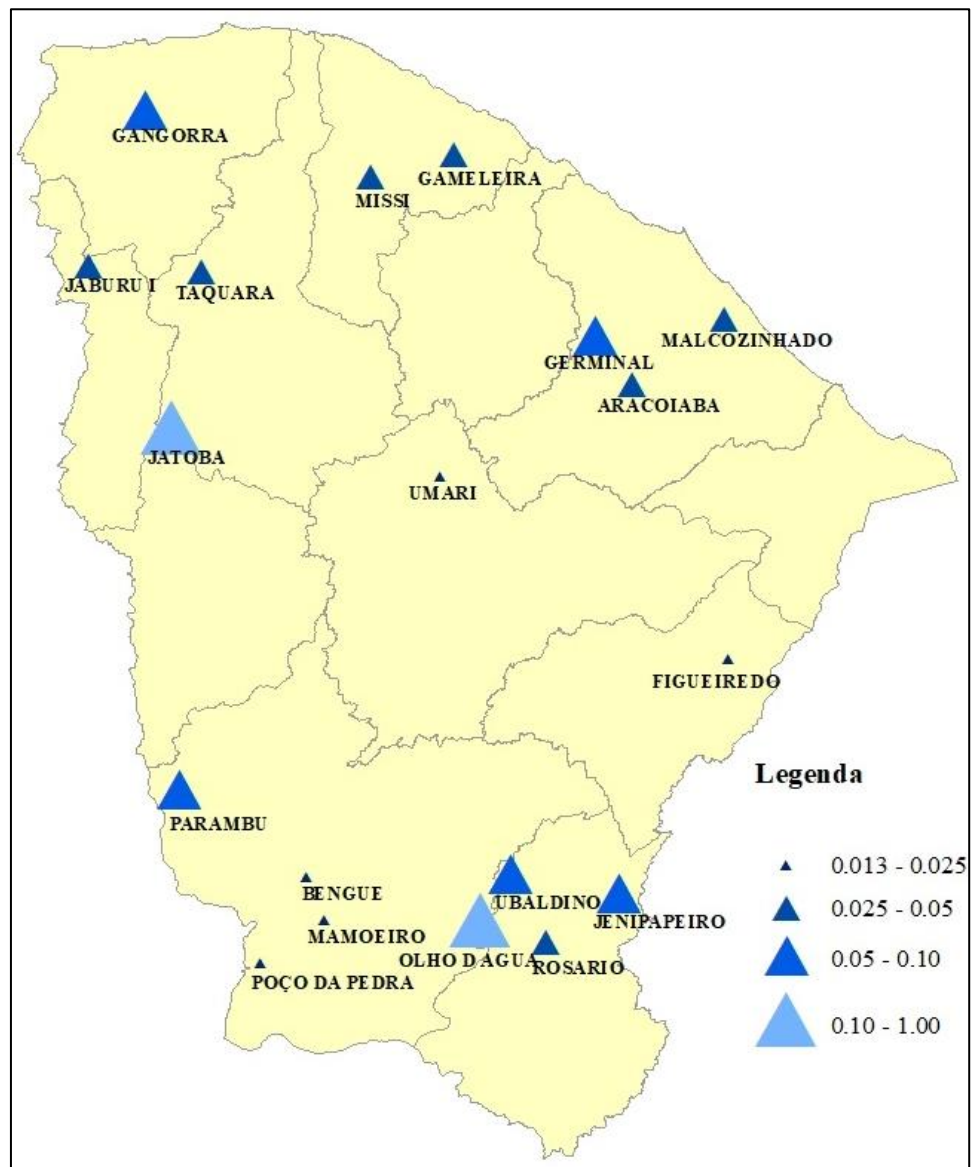
Barragem	$t_b$ (h)	$t_p$ (h)	$Q_{m\acute{a}x}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{m\acute{a}x}/A$ (m/s)
Taquara	19,7132	8,0931	15,7319	$2,78.10^{-8}$
Jatobá	3,4317	1,4762	5,9246	$1,43.10^{-7}$
Gameleira	11,4169	4,7778	15,2420	$2,93.10^{-8}$
Mamoeiro	40,5925	15,0269	24,6709	$1,31.10^{-8}$
Poço da Pedra	23,3980	10,5301	17,9049	$2,24.10^{-8}$
Figueiredo	48,8898	17,0389	23,3073	$1,44.10^{-8}$
Rosário	20,8078	5,6531	12,8492	$3,91.10^{-8}$
Olho D'água	7,4924	2,1154	7,2783	$1,01.10^{-7}$
Jaburu I	13,8504	5,1863	12,6288	$4,02.10^{-8}$
Ubalzinho	10,0140	3,6331	10,1725	$5,78.10^{-8}$
Gangorra	7,2782	2,7800	8,3792	$8,00.10^{-8}$
Benguê	31,5050	11,5038	19,9049	$1,87.10^{-8}$
Malcozinhado	11,3471	5,0556	11,4216	$4,76.10^{-8}$
Parambu	5,7964	2,5053	8,3582	$8,04.10^{-8}$
Aracoiaba	19,7463	7,4364	15,9664	$2,71.10^{-8}$
Missi	19,6670	7,5354	16,5938	$2,54.10^{-8}$
Umari	25,6703	10,2684	19,2776	$1,98.10^{-8}$
Jenipapeiro	9,2490	3,5240	10,3930	$5,58.10^{-8}$
Germinal	7,1714	2,3046	8,0486	$8,56.10^{-8}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados correspondentes às vazões por área da bacia estão apresentados na Figura 2.3 através do mapa temático elaborado por software de plataforma de geoprocessamento. Os limites desenhados na Figura 2.3 correspondem às 12 bacias hidrográficas do Ceará. Essa relação demonstra o comportamento das vazões por unidade de área da bacia hidrográfica da barragem. Nota-se que a vazão por unidade de área é maior para

a bacia da barragem do Jatobá (menor área), com  $1,43.10^{-7}$  m/s. Enquanto a menor vazão/área encontra-se na bacia da barragem do Mamoeiro (maior área) com  $1,31.10^{-8}$  m/s. Esses valores indicam que a área de drenagem contribui significativamente para o escoamento superficial em pequenas bacias (ANDRADE et al., 2004). Uma das possíveis explicações para tal comportamento está na relação direta entre a distribuição espacial das precipitações e a área da bacia. Além disso, quanto maior a bacia hidrográfica maior as interações existentes em seu interior, podendo diminuir, assim, o efeito da área de drenagem e aumentar a participação de outros fatores, como as águas subterrâneas, no balanço hídrico, conforme relatado por Tucci (2009).

Figura 2.3 – Relação de Vazão por Área da Bacia das Barragens. Valores em  $m^3/s.km^2$ .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Alguns estudos envolvendo a regionalização em regiões semiáridas são discutidos a seguir. Zaman, Rahman e Haddad (2011) utilizaram as técnicas de regressão juntamente com a distribuição de Pareto para encontrar equações de vazões médias anuais de séries de duração parcial de alguns estados da Austrália. Entretanto, os autores usaram apenas duas variáveis independentes: a intensidade de precipitação e a área da bacia hidrográfica, enquanto neste trabalho foram levadas em consideração outras características importantes da bacia, como o comprimento do rio principal e o tempo de concentração. Já Liu, Xie e Zeng (2016) propuseram regionalizar por regressão a vazão de pico da seção do rio Heihe, inserido na região semiárida da China. Os ótimos resultados foram comprovados utilizando outras quatro regiões não monitoradas, apesar de aplicarem apenas um estudo de caso. Porém, é necessário empregar mais estudos de casos para uma melhor regionalização de áreas semiáridas, assim como foi realizado neste trabalho. Virões e Cirilo (2019) desenvolveram uma regionalização de vazão envolvendo quatro estados do Brasil. Os autores utilizaram o método MODHAC (Modelo Hidrológico Autocalibrável) em algumas estações fluviométricas. Embora tenham encontrado índices satisfatórios na regionalização, os autores destacaram a dificuldade encontrada com a qualidade dos dados das estações, enquanto neste trabalho os dados não estavam susceptíveis a esses erros, pois foram usados somente dados de projetos reais.

## **2.4 Conclusões**

Este trabalho teve como objetivo principal a modelagem de Hidrograma Unitário Sintético Triangular do SCS para regionalização, baseado em dados físicos e hidrológicos de algumas bacias hidrográficas cearenses. Os estudos descritos tiveram como principais etapas: obtenção dos dados físicos e hidrológicos das bacias das barragens; elaboração dos hidrogramas pelo método do SCS e regionalização através da regressão múltipla dos parâmetros que apresentaram os melhores resultados.

Portanto, destaca-se neste trabalho a boa aproximação entre as equações de regressão e o método do hidrograma unitário sintético triangular, fato comprovado pelos testes estatísticos em cada caso. Conclui-se que a regionalização definida para essas bacias pode ser considerada consistente, uma vez que todos os modelos foram validados pelos testes estatísticos ( $r^2$ , F total, F parcial e  $S_e$ ). Os parâmetros que apresentaram os melhores resultados foram: área da bacia, tempo de concentração e comprimento do rio principal. Além

disso, o modelo proposto é de fácil aplicação e pode ser utilizado como uma análise preliminar em projetos hidráulicos semelhantes.

As equações não consideraram outras características físicas importantes das bacias, como a declividade e a área da bacia hidráulica. No caso da declividade não foi possível inseri-la devido à falta de dados para as barragens analisadas. Já para a área hidráulica, os dados foram obtidos e calculados as equações de regressão, porém os resultados envolvendo essa variável ou não passaram nos testes estatísticos ou não obtiveram grande significância se comparado com as outras variáveis. Além disso, recomenda-se utilizar outros modelos de obtenção de hidrogramas, como o método de Snyder e o modelo de Taylor/Schwartz. Portanto, os resultados obtidos permitem concluir que os modelos definidos são confiáveis e com boa representação dos parâmetros  $Q_{máx}$ ,  $t_{p0}$  e  $t_b$  para as bacias propostas.

## **2.5 Agradecimentos**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa concedida ao primeiro autor e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP (Processo PNE-0112-00042.01.00/16) pelo apoio financeiro para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M.; PORTO, M. M.; COSTA, R. N. T.; MEIRELES, M.; NETO, J. A. C. Regionalização de modelos de vazões medias de longo período para o Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.35, p. 139-148, 2004.
- BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 612-624, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>.
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. **The Open Hydrology Journal**, Bentham Open, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2011. DOI: 10.2174/18-74378101105010001
- 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. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>
- CAMPOS, J. N. B.; RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. The bell-shaped unit hydrograph by the overland plane. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. No prelo.
- CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Instituto de Estudos e Pesquisas Para Desenvolvimento Do Estado Do Ceará. **Caderno Regional da Sub-Bacia do Alto Jaguaribe**. Fortaleza: INESP, 2009a.
- DALRYMPLE, T., Manual of Hydrology: Part. 3. Flood-frequency analyses. Flood-flow Techniques, **Geological Survey Water Supply Paper 1543-A**, Washington, D.C., p. 1-80, 1960. <https://doi.org/10.3133/wsp1543A>
- ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1985.
- INNOCENTE, C.; CHAFFE, P. L. B. Uma revisão preliminar sobre a aplicação do hidrograma unitário na pesquisa, no ensino e na engenharia. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 2017, Florianópolis, **Anais: Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- ISIK, S.; SINGH, V. Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.13, n. 9, p. 824-834, 2008. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:9\(824\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:9(824)).
- LAAHA, G.; BLÖSCHL, G. A comparison of low flow regionalisation methods: catchment grouping. **Journal of Hydrology**, v. 323, n. 1, p. 193-214, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.001>.
- LEME, R. F.; XAVIER, L. C. P.; LIMA, F. C.; CARNEIRO NETO, J. A.; TARGINO, D. L. L.; SOUSA, L. N.; RABELO, N. N.; SILVA, S. M. O. Influência do fluxo subterrâneo

proveniente de bacia sedimentar na operação de reservatórios – estudo de caso: barragem Jaburu I. In: XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 2017, Florianópolis, **Anais: Ciência e tecnologia da água: inovação e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

LIU, S.; XIE, Z.; ZENG, Y. Discharge estimation for an ungauged inland river in an arid area related to anthropogenic activities: a case study of Heihe river basin, northwestern China. **Advances in Meteorology**, v. 2016, n. 2, p. 1-11, 2016. DOI: 10.1155/2016/6716501.

NAGHETTINI, M. **Introdução à hidrologia aplicada**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2007.

PÁDUA, L.H. R. **Regionalização de hidrogramas unitários em bacias não monitoradas do estado de Minas Gerais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PAGANO, T. C.; WOOD, A. W.; RAMOS, M. H.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; CLARK, M. P.; CRANSTON, M.; KAVETSKI, D.; MATHEVET, T.; SOROOSHIAN, S. E. VERKADE, J. S. Challenges of Operational River Forecasting. **American Meteorological Society. Journal of Hydrometeorology**. v. 15, n. 4. p. 1692-1707, 2014. doi:10.1175/JHMD-13-0188.1.

POLITANO, W.; PISSARRA, T. Relações entre características morfométricas quantitativas e estimativas da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2ª ordem de magnitude. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.1, p. 179-186, 2003.

PORTO, R. L. L. Alguns aspectos da sùmula matemática em hidrologia: e exemplos de aplicação. **Revista DAE**, v. 111, v. 1, p. 111-144, 1977.

RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. Efeito de secas prolongadas nos recursos hídricos de uma região semiárida: uma análise comparativa para o Ceará. **Revista DAE**, v. 66, n. 212, p. 61-79, 2018. DOI: 10.4322/dae.2018.023.

RODRIGUES, M. V. S.; AQUINO, M. D.; THOMAZ, A. C. F. Seleção de variáveis em análise por envoltória de dados na análise da eficiência do instrumento da cobrança pela água bruta no setor do abastecimento público nas bacias cearenses por meio da ferramenta computacional SIAD (Sistema Integrado de Apoio à Decisão). **Revista DAE**, v. 65, n. 208, p. 5-20, 2017. DOI:10.4322/dae.2017.002

SARHADI, A.; MODARRES, R. Flood seasonality-based regionalization methods: a data-based comparison. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 23, p. 3613-3624, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8088>.

SCS - Soil Conservation Service. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1973.



SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ – SRH. **Sistema de informações dos recursos hídricos do Ceará**. 2018. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br/>>. Acesso em: 09 out. 2018.

SILVA, F. O. E.; PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, v. 61, n. 192, p. 48-59, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.106>.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009.

TUCCI, C. E. M. Parâmetros do Hidrograma Unitário para as Bacias Urbanas Brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 8, n. 2. 195-199. 2003. DOI: 10.21-168/rbrh.v8n2.p195-199

TUCCI, C. E. M. **Regionalização das vazões**. Porto Alegre: IPH – UFRGS, 2000.

VIRÃES, M. V.; CIRILO, J. A. Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 24, n. 49, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180114>.

WOLFF, W. **Regionalização hidrológica do Estado de Santa Catarina: uma abordagem sazonal e geoestatística baseada em modelos**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

ZAMAN, M.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood modelling in arid and semi-arid regions in Australia. 19<sup>th</sup> International Congress on Modelling and Simulation, 19, 2011, **Sustaining our Future: Understanding and Living with Uncertainty**, Perth, Australia, 2011. p. 12-16.

### **3. MODELO DE REGIONALIZAÇÃO ADIMENSIONAL DE VAZÕES MÁXIMAS PARA BACIAS HIDROGRÁFICAS DO CEARÁ**

#### **RESUMO**

Na concepção de obras hidráulicas, como as barragens, necessita-se de estudos referentes às vazões máximas para um dimensionamento seguro. O estado do Ceará é caracterizado por apresentar um número elevado de reservatórios projetados por equações empíricas antigas. Entretanto, devido aos poucos dados existentes em algumas regiões, necessita-se transpor informações de regiões monitoradas para as não monitoradas. Este trabalho elaborou modelos de regionalização para a obtenção de vazões máximas para o período de retorno de 1.000 e 10.000 anos em barragens localizadas no Ceará. As variáveis empregadas nas equações foram: área de drenagem da bacia, comprimento do rio principal, tempo de concentração e a diferença de cota entre o exutório e o ponto mais remoto da bacia. Foram utilizados os dados de projeto de 24 barragens e pesquisas de caráter bibliográfico com significativas contribuições para os estudos hidrológicos em regiões semiáridas no mundo. Os testes estatísticos e os valores dos coeficientes de determinação permitem considerar as duas equações propostas consistentes e passíveis de serem utilizadas em análises preliminares de projetos hidráulicos.

**Palavras-chave:** Regionalização. Vazão Máxima. Semiárido. Adimensional.

### 3. DIMENSIONLESS REGIONALIZATION MODEL OF PEAK FLOWS FOR CEARÁ WATERSHEDS

#### ABSTRACT

In the design of hydraulic works, such as dams, studies referring to the peak flow rates are required for safe design. The state of Ceará is characterized by having a high number of reservoirs designed by ancient empirical equations. However, due to the limited data available in some regions, it is necessary to transpose information from monitored regions to unmonitored ones. This work elaborated regionalization models for obtaining peak flows for the return period of 1.000 and 10.000 years in dams located in Ceará. The variables used in the equations were: drainage area of the basin, length of the main river, concentration time and the difference in elevation between the basin and the most remote point of the basin. Were used project data from 24 dams and bibliographic research with significant contributions to hydrological studies in semi-arid regions worldwide. The statistical tests and the values of the determination coefficients allow to consider the two proposed equations consistent and capable of being used in preliminary analyzes of hydraulic projects.

**Keywords:** Regionalization. Peak Flow. Semiarid. Dimensionless.

### 3.1 Introdução

A vazão ou descarga da bacia pode ser considerada como a principal característica do escoamento superficial. Através da análise dessa variável é possível dimensionar os elementos mais importantes dos projetos de obras hidráulicas. Portanto, a negligência com os cálculos envolvendo essa grandeza pode acarretar consequências nocivas ao meio ambiente e ao homem. Em regiões áridas e semiáridas, devido à escassez de recursos hídricos e pela falta de informações, esse conhecimento mostra-se ainda mais valioso. Existem diferentes métodos e estudos sobre a modelagem do comportamento da vazão de pico em regiões áridas e semiáridas do mundo, como os descritos por Chaves et al. (2017), Zaman, Rahman e Haddad (2011), Sarhadi e Modarres (2011), McIntyre e Al-Qurash (2009) e Bracken, Cox e Shannon (2008).

Durante os anos de 1910 a 2010 notou-se um aumento na ocorrência de acidentes graves e muito graves envolvendo rompimento de barragens (WANDERLEY et al., 2016). Numa análise regional, estima-se que no Ceará existem mais de 30.000 barragens, cuja maioria foi construída há mais 50 anos (CAMPOS et al., 2016). Portanto, devido às técnicas antigas de execução e projeto, essas barragens possuem um alto risco potencial para a população localizada à jusante dessas barragens cearenses. Como consequência desse alarmante crescimento, muitos países, inclusive o Brasil, modificaram seu sistema regulatório adotando leis e novos padrões de segurança para grandes barragens (SOUZA et al., 2017).

Na necessidade de obter dados para a resolução de vários problemas hidrológicos são utilizadas técnicas para estimar valores para uma determinada região de interesse. A regionalização, segundo Arsenault e Brissette (2014), consiste em encontrar parâmetros comportamentais para modelos hidrológicos em bacias com pouco monitoramento. De acordo com Tucci (1997), a regionalização utiliza ferramentas que exploram ao máximo os dados disponíveis para estimar as variáveis hidrológicas para locais com poucas informações. Esse processo só é possível através da transferência de informações de locais monitorados para bacias com pouco ou nenhum monitoramento.

Por ser de fácil utilização e por apresentar bons resultados, a regressão é uma das técnicas mais populares para a regionalização de parâmetros hidrológicos (OUDIN et al. 2008). A regressão consiste na análise do comportamento de variáveis dependentes, como a vazão, em função de uma ou mais variáveis explicativas, como as características da bacia (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Há dois tipos de regressão: linear e não linear. Existem vários tipos de regressão não linear, porém Tucci (1997) destaca a regressão de potência como

uma das mais empregadas na hidrologia. A equação básica para representar a regressão não linear é:

$$Y = \beta_1 X_1^{\beta_2} \cdot X_2^{\beta_3} \dots X_p^{\beta_p} \quad (3.1)$$

Onde,  $Y$  é a variável dependente,  $X_1, X_2$  e  $X_p$  são as variáveis independentes ou explicativas e  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  e  $\beta_p$  são os parâmetros desconhecidos ou os coeficientes de regressão.

A principal forma de entender o comportamento do escoamento de rios e canais é por meio dos hidrogramas, que consistem em gráficos gerados pela relação entre a vazão e o tempo em uma determinada seção. Conforme Campos, Rabelo e Lima Neto (2019), Sherman, em 1932, foi o primeiro a apresentar o método do hidrograma unitário ou HU, que passaria por vários aperfeiçoamentos ao longo dos anos. De acordo com Naghettini (2012), o HU é um hidrograma relativo a uma precipitação efetiva constante, de certa duração, distribuída uniformemente sobre toda a área da bacia e com altura de precipitação igual a uma unidade pluviométrica. Para regiões onde os dados históricos são insuficientes ou inexistentes, o hidrograma é estimado pelo método conhecido como hidrograma unitário sintético ou HUS. Esse método baseia-se em parâmetros empíricos para estimar valores de vazões e de alguns tempos característicos, como o tempo de pico e o tempo de base. A simplicidade, facilidade e a necessidade de menos dados, caracterizam o método do hidrograma unitário sintético (BHUNYA, PANDA e GOEL, 2011). O Hidrograma Unitário Sintético Triangular ou HUST foi proposto pelo Departamento de Conservação do Solo (Soil Conservation Service) dos EUA (SCS, 1972). O HUST é caracterizado por seu formato triangular devido às relações propostas pelo método. A principal informação retirada dos hidrogramas é a vazão máxima ou vazão de pico, pois é através dela que se dimensionam as estruturas hídricas para a condição mais crítica.

As variáveis adimensionais consistem em quantidades que se alteram no problema, porém não possuem dimensões. Existem vários exemplos de números adimensionais na Hidráulica, como o número de Euler, número de Froude e o número de Reynolds. Além disso, existem três grandes vantagens na adimensionalização de variáveis: aumenta a percepção do pesquisador sobre as relações entre os parâmetros, diminui o número de variáveis do problema e permite a extrapolação de valores não testados (ÇENGEL e CIMBALA, 2007). Essas vantagens são muito úteis em estudos hidrológicos, principalmente

quando se pretende elaborar equações empíricas para a determinação de um modelo hidrológico prático.

Neste sentido, são encontrados na literatura alguns estudos com foco na regionalização de vazões em regiões áridas e semiáridas do Brasil e do mundo. Teixeira et al. (2013), por exemplo, regionalizaram as vazões máximas utilizando as técnicas de regressão linear múltipla para 37 estações fluviométricas no Ceará. Os autores utilizaram características fisiográficas e climatológicas como variáveis representativas das vazões máximas, resultando, segundo os autores, em baixo desempenho e alto erro médio quadrado na predição dessas vazões. Felix e Paz (2016) também modelaram o escoamento para uma bacia hidrográfica localizada no semiárido brasileiro (Paraíba). Os autores utilizaram o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH e relataram dificuldades em representar os picos das maiores cheias.

Andrade et al. (2004), regionalizaram vazões médias para sub-bacias cearenses. Inicialmente os autores utilizaram a técnica de agrupamento “cluster analysis” para dividir o Ceará em grupos homogêneos e, assim, encontrar uma equação para cada grupo. Dessa forma, os autores encontraram duas equações de regressão linear em função da área de drenagem, cujos valores dos coeficientes de determinação foram 0,728 e 0,898. Entretanto, esses grupos continham apenas 10 e 12 sub-bacias, indicando, assim, poucos dados analisados.

Zaman, Rahman e Haddad (2011) regionalizaram as vazões médias anuais para as regiões áridas e semiáridas da Austrália. Os autores utilizaram 45 estações de medição distribuídas em cinco estados do país e apenas duas variáveis representativas: a área de captação e a intensidade da chuva de projeto. Os autores encontraram quatro equações logarítmicas lineares, cujos coeficientes de determinação variaram entre 0,29 e 0,88.

Sarhadi e Modarres (2011) utilizaram 15 estações, com média de registro de 22 anos, para calcular as regressões múltiplas lineares de vazões em áreas áridas e semiáridas do Iran. As regiões homogêneas foram obtidas por meio de três métodos distintos: frequências relativas da ocorrência de vazões, estatísticas direcionais e um método gráfico. Utilizando o procedimento Jack-Knife para avaliar o desempenho dos métodos, os autores escolheram as melhores equações para cada tempo de retorno.

El-Hames (2012) desenvolveu um método empírico para calcular a vazão de pico para regiões áridas e semiáridas de seis diferentes países ao redor do mundo (Arábia Saudita, Oman, USA, Israel, Índia e Jordânia). O autor propôs uma equação de regressão múltipla não linear envolvendo a chuva efetiva, a área da bacia, a inclinação média, o comprimento do rio principal e a profundidade de armazenamento do evento chuvoso. Ao todo, foram analisados 76 eventos de chuva-vazão.

Chaves et al. (2017) apresentaram uma revisão de curvas envoltórias desenvolvidas no mundo e aplicou-as às bacias hidrográficas do Ceará. A curva envoltória é um método gráfico associado a uma equação matemática que determina os valores máximos de cheias para as bacias hidrográficas. Os autores propuseram novos parâmetros para a curva envoltória a partir de 43 barragens cearenses utilizando apenas duas variáveis: a área da bacia hidrográfica e a vazão máxima de projeto.

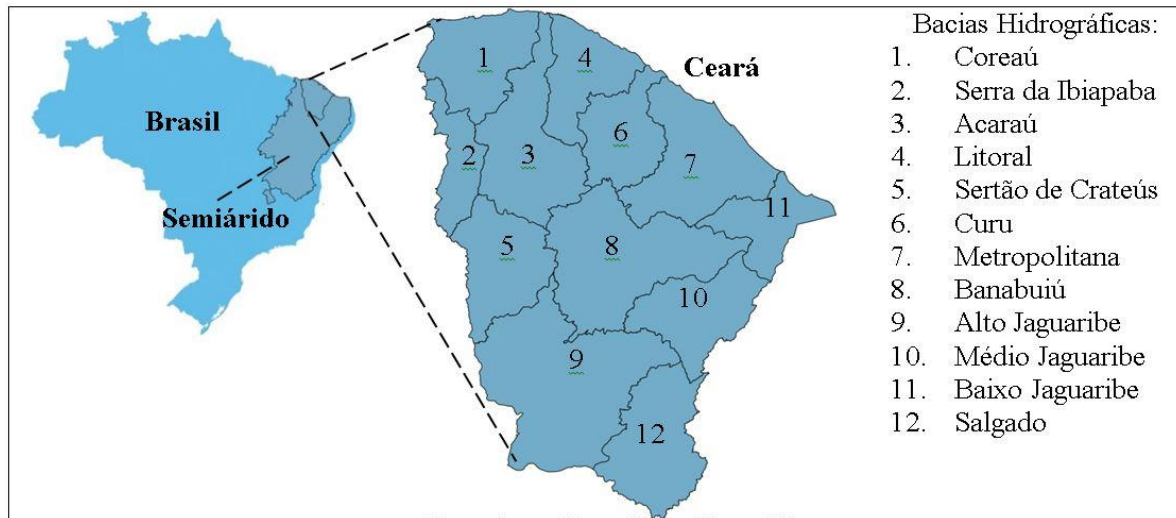
Como forma de contribuir para os estudos de regionalização e análise de bacias hidrográficas com pouco monitoramento, principalmente em regiões semiáridas, propõe-se neste trabalho a regionalização da vazão de pico em bacias onde estão inseridas algumas barragens cearenses. Além disso, este trabalho permite um cálculo expedito de cheias para o dimensionamento de estruturas de segurança hídrica. As principais diferenças deste trabalho em relação aos anteriores são: a incorporação de várias características da bacia no cálculo das vazões máximas, a aplicação de equação adimensional para um número significativo de amostras e a utilização de dados reais de projetos.

## **3.2 Metodologia**

### ***3.2.1 Área de estudo***

O estado do Ceará possui uma população estimada de mais de 8,5 milhões de habitantes e uma área de aproximadamente 150.000 km<sup>2</sup>. Além disso, está inserido quase totalmente na região semiárida do Brasil (Figura 3.1). Esse clima semiárido é caracterizado por baixas precipitações e elevadas taxas de evaporação, fazendo com que seu balanço hídrico seja negativo e, assim, gerando dificuldades na aquisição de recursos hídricos (CAMPOS et al., 2016).

Figura 3.1 – Localização do estado do Ceará e suas bacias hidrográficas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As informações aqui apresentadas foram extraídas dos estudos executivos dos projetos das barragens e do Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará. O acesso deu-se por meio da Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH, 2020).

A seguir estão listadas as barragens analisadas, suas respectivas cidades, capacidade máxima, ano de conclusão e as bacias hidrográficas cearenses nas quais estão inseridas (SRH, 2020). Vale destacar que a maioria das barragens deste estudo, com exceção do Jaburu I, foi concluída após a década de 1990, ano em que foi instalado o “Conselho de Segurança de Barragens no Ceará”, o qual implementou técnicas mais modernas e seguras na construção de barragens do estado (Souza et al., 2017).



Tabela 3.1 – Localização e características das barragens analisadas.

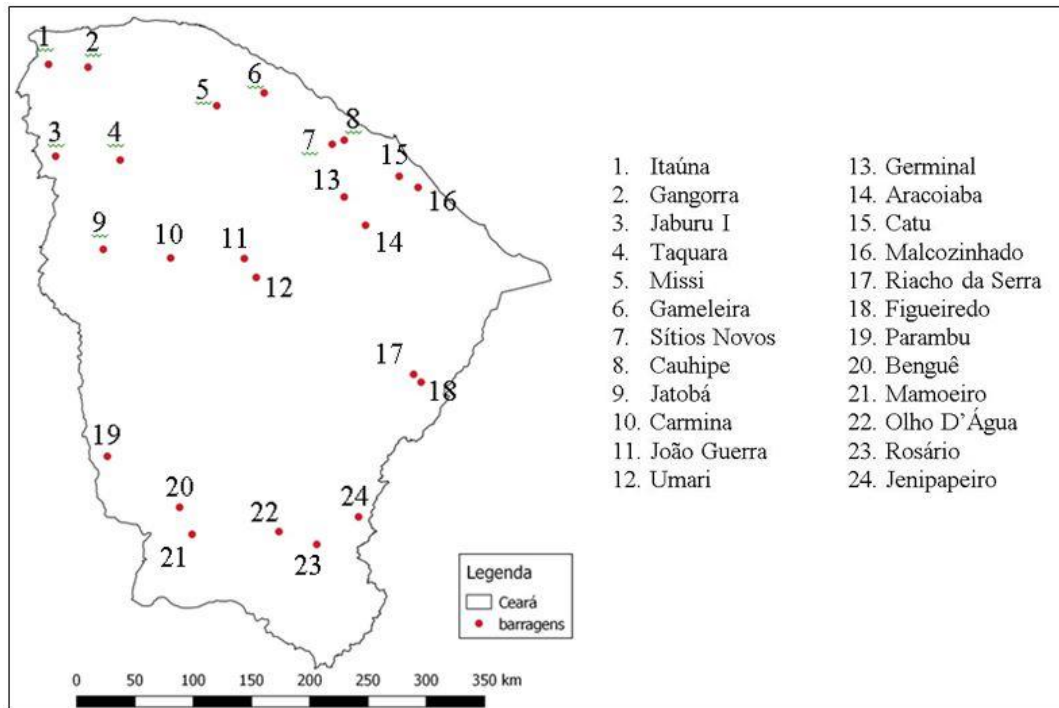
Barragem	Município	Capacidade (hm <sup>3</sup> )	Altura (m)	Ano de Conclusão	Bacia
Aracoiaba	Aracoiaba	170,70	35,00	2002	Metropolitana
Benguê	Aiuaba	19,56	23,61	2000	Alto Jaguaribe
Carmina	Catunda	13,63	19,00	2002	Acaraú
Catu	Aquiraz	27,13	16,30	2002	Metropolitana
Cauhipe	Caucaia	12,00	11,87	1999	Metropolitana
Figueiredo	Iracema	519,60	33,50	2013	Médio Jaguaribe
Gameleira	Itapipoca	52,64	19,50	2012	Litoral
Gangorra	Granja	62,50	20,70	1999	Coreaú
Germinal	Palmácia	2,01	28,45	2017	Metropolitana
Itaúna	Granja	77,50	18,00	2001	Coreaú
Jaburu I	Ubajara	138,13	46,00	1983	Serra da Ibiapaba
Jatobá	Ipueiras	6,00	22,05	2012	Acaraú
Jenipapeiro	Baixio	43,40	15,40	2012	Salgado
João Guerra	Itatira	4,43	19,60	2012	Banabuiú
Malcozinhado	Cascavel	37,84	19,11	2002	Metropolitana
Mamoeiro	Antonina do Norte	20,68	28,45	2012	Alto Jaguaribe
Missi	Miraíma	65,30	17,30	2011	Litoral
Olho D'água	Várzea Alegre	21,00	26,00	1998	Salgado
Parambu	Parambu	8,53	20,80	1992	Alto Jaguaribe
Riacho da Serra	Alto Santo	23,47	18,71	2011	Médio Jaguaribe
Rosário	Lavras da Mangabeira	47,20	20,80	2001	Salgado
Sítios Novos	Caucaia	126,00	21,50	1999	Metropolitana
Taquara	Cariré	274,50	31,00	2012	Acaraú
Umari	Madalena	35,04	21,82	2011	Banabuiú

Fonte: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará.

Através da Tabela 3.1 é possível perceber a diversidade de bacias hidrográficas que este trabalho contemplou. Segundo a Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará (2018), existem 12 bacias hidrográficas no estado, das quais 9 foram abordadas neste trabalho, exceto as bacias do Curu, Baixo Jaguaribe e Sertões de Crateús. Tamanha diversificação acarreta numa análise mais variada e abrangente do estudo, fazendo com que a regionalização consiga

englobar características importantes do semiárido cearense. Na Figura 3.2 estão localizadas as barragens que compõem este estudo.

Figura 3.2 – Localização das barragens analisadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Dados Utilizados

Na Tabela 3.2 são apresentadas as vazões máximas de projeto para um tempo de retorno ( $T_r$ ) de 1.000 anos ( $Q_{p1000}$ ) e de 10.000 anos ( $Q_{p10000}$ ), o tempo de concentração ( $T_c$ ), a área da bacia ( $A$ ), o comprimento do rio principal ( $L$ ), a diferença de cota entre o exutório e o ponto mais remoto da bacia ( $H$ ), a Curva Número ( $CN$ ) do método SCS e a ferramenta utilizada na aplicação do método. Na maioria dos projetos dessas barragens foi utilizado o software HEC-HMS, os demais empregaram diretamente as fórmulas do método SCS. Esses dados foram obtidos através dos projetos executivos dessas barragens. Vale destacar que somente as barragens Parambu e Olho D'água não apresentaram a vazão de projeto para 10.000 anos de  $T_r$ .

Tabela 3.2 – Dados das barragens obtidos dos projetos executivos.

Barragem	(m <sup>3</sup> /s) Q <sub>p1000</sub>	(m <sup>3</sup> /s) Q <sub>p10000</sub>	(h) T <sub>c</sub>	(km <sup>2</sup> ) A	(km) L	(m) H	CN	Ferramenta
Aracoiaba	1371,20	1831,70	8,00	588,60	53,10	765,00	73,00	Direto
Benguê	1085,00	1395	15,00	1062,30	73,00	300,00	80,00	Direto
Carmina	444,43	480	3,82	189,30	26,50	500,00	82,00	Direto
Catu	256,42	509,03	7,00	64,50	15,30	20,00	65,00	HEC-HMS
Cauhipe	902,47	2038,65	2,10	94,00	14,00	350,00	78,00	HEC-HMS
Figueiredo	5168,00	7013	36,00	1621,00	88,30	346,02	78,00	HEC-HMS
Gameleira	893,00	1186	12,03	519,77	59,00	600,00	75,00	HEC-HMS
Gangorra	526,48	651,15	5,95	104,70	18,00	50,00	78,00	HEC-HMS
Germinal	863,10	1156	3,00	94,00	23,00	621,00	85,00	HEC-HMS
Itaúna	1332,63	1924,89	11,56	771,30	71,75	560,00	65,00	HEC-HMS
Jaburu I	1170,30	1295,4	7,09	314,10	36,37	260,00	62,00	HEC-HMS
Jatobá	748,00	911	1,10	41,38	9,60	350,18	86,02	HEC-HMS
Jenipapeiro	724,20	928,35	4,05	186,40	27,80	500,00	80,00	HEC-HMS
João guerra	433,83	486,78	4,70	134,00	21,60	160,00	80,00	HEC-HMS
Malcozinhado	669,00	731	13,30	240,00	22,50	12,00	65,00	HEC-HMS
Mamoeiro	2626,00	3546	21,03	1887,60	107,63	400,00	82,97	HEC-HMS
Missi	1065,29	1495,3	6,40	652,60	57,57	360,00	80,00	HEC-HMS
Olho d'água	223,70	-	4,10	71,80	21,50	220,00	73,00	Direto
Parambu	239,60	-	3,50	104,00	16,80	189,00	73,00	Direto
Riacho da Serra	737,74	1071,02	7,60	173,40	49,60	555,00	82,00	HEC-HMS
Rosário	1043,00	1358	9,80	329,00	52,30	300,00	75,00	HEC-HMS
Sítios novos	2070,27	4217,24	7,91	446,00	52,00	552,00	78,00	HEC-HMS
Taquara	866,06	1544,2	14,00	565,73	42,75	106,45	55,60	HEC-HMS
Umari	1619,26	1809,3	10,50	975,00	65,50	545,00	81,00	HEC-HMS

Fonte: Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará.

### 3.2.3 Adimensionalização

A vazão de um rio é uma função dos parâmetros hidrológicos e morfológicos da bacia hidrográfica do reservatório (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Portanto, é possível relacionar esses parâmetros de modo a encontrar uma equação que descreva a vazão máxima do escoamento. Uma das formas que pode ser empregada para encontrar a vazão máxima é por meio da adimensionalização das variáveis. De forma resumida, adimensionalizar parâmetros consiste em combinar variáveis de tal modo a encontrar outra variável sem dimensão (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Foram determinadas as equações regionalizadas das vazões de pico, encontrando um fator adimensional, chamado de vazão máxima adimensional ( $\pi$ ), que agrega todos os outros parâmetros adimensionais. Dentre as variáveis escolhidas para este estudo, apenas o CN é adimensional. Assim, foram definidas outras quatro variáveis adimensionais: o fator de forma (ff), a declividade ( $S_o$ ), o número de Froude adaptado (Fr) e o Parâmetro de fluxo ( $\lambda$ ).

Portanto, as variáveis da Tabela 3.2 foram combinadas de modo a formar parâmetros adimensionais. Vale destacar que todas as variáveis foram manuseadas com suas respectivas unidades no Sistema Internacional de Unidades (SI).

A própria variável de interesse (vazão máxima) também passou pelo processo de adimensionalização através da sua divisão com um parâmetro  $\Phi$ , que possui a mesma dimensão ( $m^3/s$ ). O  $\Phi$  é encontrado pelo produto entre  $H^2$  e  $\sqrt{g.L}$ . A resultante dessa vazão adimensionalizada foi chamada de  $\pi$ .

$$\pi = \frac{Q_{p1000} \text{ ou } Q_{p10000}}{\Phi} = \frac{Q_{p1000} \text{ ou } Q_{p10000}}{H^2 \sqrt{g.L}} \quad (3.2)$$

Dessa forma, a equação de regressão encontrada fica independente das dimensões das barragens, assim, é possível lidar com outras barragens de diferentes proporções.

O fator de forma (ff) relaciona a área da bacia com o comprimento do rio principal. A bacia que possui baixo fator de forma indica que esta é estreita e longa, ou seja, é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, mas com fator de forma maior.

$$ff = \frac{A}{L^2} \quad (3.3)$$

A declividade ( $S_o$ ) consiste na divisão entre o desnível e o comprimento do rio principal, ou seja, representa a inclinação decrescente entre o ponto mais alto da bacia com o exutório.

$$S_o = \frac{H}{L} \quad (3.4)$$

Um número adimensional bastante conhecido na Hidráulica é o Número de Froude (Fr). O Número de Froude consiste na relação entre a força inercial (velocidade) e a força gravitacional (SOUZA et al., 2017). Neste trabalho adotou-se uma adaptação do Froude, relacionando a raiz da área da bacia dividida pelo tempo de concentração (resultando na mesma unidade da velocidade) e a raiz do produto da gravidade (g) com o comprimento do rio.

$$Fr = \frac{\sqrt{A}}{T_c \sqrt{g \cdot L}} \quad (3.5)$$

A determinação de  $\lambda$  foi obtida combinando a gravidade, o tempo de concentração e a área da bacia hidrográfica. Nota-se que essa relação é similar ao inverso do Número de Froude, uma vez que  $\sqrt{A}$  e o  $T_c$  representam, respectivamente, uma escala de comprimento e uma escala de tempo. Neste trabalho,  $\lambda$  será chamado de parâmetro de fluxo.

$$\lambda = \frac{g \cdot T_c^2}{\sqrt{A}} \quad (3.6)$$

Tabela 3.3 – Sumário das variáveis adimensionais.

Nome	Símbolo	Equação
Vazão máxima adimensional	$\pi$	$\frac{Q_{p1000} \text{ ou } Q_{p10000}}{H^2 \sqrt{g \cdot L}}$
Fator de forma	ff	$\frac{A}{L^2}$
Declividade	$S_o$	$\frac{H}{L}$
Número de Froude adaptado	Fr	$\frac{\sqrt{A}}{T_c \sqrt{g \cdot L}}$
Parâmetro de fluxo	$\lambda$	$\frac{g \cdot T_c^2}{\sqrt{A}}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Avaliação da equação de regressão

Neste trabalho utilizou-se a técnica de regressão não linear para obter a equação de regionalização. De posse da equação de regressão, é necessário saber se os dados podem ser descritos adequadamente por ela, ou seja, verificar se os dados amostrais possuem evidências que sustentem a estatística descrita. A primeira avaliação foi feita pelo coeficiente de correlação linear ( $r$ ). Esse coeficiente mede a dependência linear entre duas variáveis e varia entre -1 e 1. Outra forma de avaliar é através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Esse coeficiente tenta definir o quanto a equação encontrada explica a variabilidade da variável dependente. O coeficiente de determinação deve estar próximo de 1 (HAAN, 1977; BUSSAB e MORETTIN, 2017).

Duas outras importantes ferramentas utilizadas para avaliar a qualidade das equações obtidas são o F total e F parcial. A análise do F total permite avaliar a capacidade do conjunto de variáveis independentes em explicar a variável dependente. O valor encontrado deve ser comparado com o teste de hipótese, modelado pela distribuição Snedecor. Se o valor do F total estiver dentro do intervalo desejado, então, a variável independente contribui de modo significativo para a regressão. Já o F parcial avalia a contribuição de uma única variável independente em explicar a variável dependente. O valor encontrado também deve ser comparado com a distribuição Snedecor.

Por fim, a última análise realizada consiste na comparação do erro padrão da equação encontrada ( $S_e$ ) com o desvio padrão amostral da variável dependente ( $S_Y$ ). O erro padrão deve ser menor que o desvio padrão da variável dependente analisada.

Na Tabela 3.4 estão listados os testes estatísticos utilizados para a avaliação das equações de regressão com suas respectivas fórmulas.

Tabela 3.4 – Conjunto de equações utilizadas para verificar a regionalização.

Símbolo	Fórmula
r	$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$
r <sup>2</sup>	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
F total	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}{\sum (y_i - \hat{y})^2 / (n - P - 1)}$
F parcial	$\frac{SQ \text{ Reg } (X_p)}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}$
S <sub>e</sub>	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n - P - 1}}$
S <sub>Y</sub>	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

$x_i$  e  $y_i$  são as observações das variáveis X e Y, respectivamente;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias de cada variável X e Y, respectivamente;

$\hat{y}$  é a estimativa encontrada para a variável Y;

P é o número de variáveis independentes da equação;

n é o tamanho da amostra;

$X_p$  é uma das variáveis independentes;

SQ Reg( $X_p$ ) é a diferença entre o somatório quadrático da regressão com  $X_p$  e o somatório quadrático da regressão sem  $X_p$ .

### 3.3 Resultados e Discussão

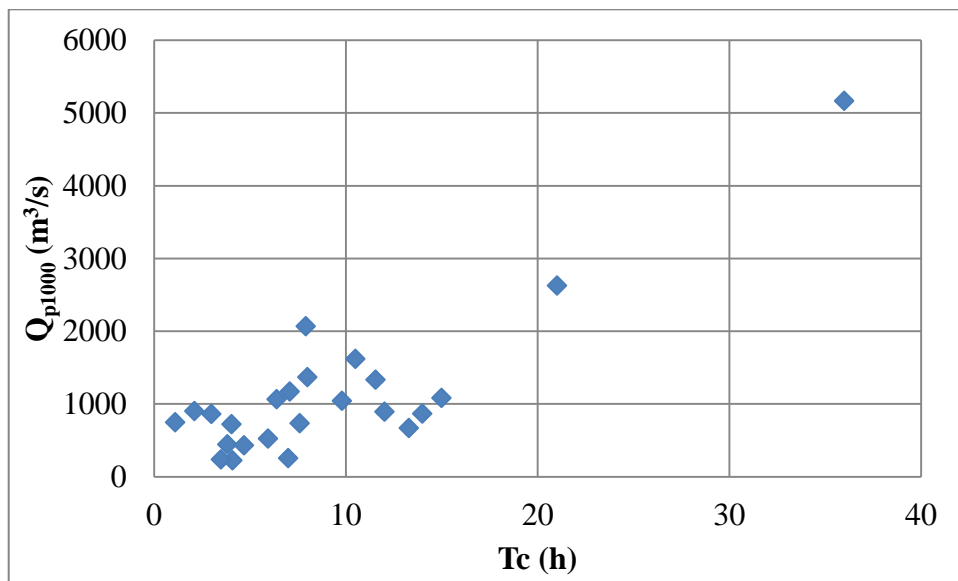
Os resultados das simulações foram divididos em dois grupos:

- Análise de influência dos parâmetros ( $T_c$ ,  $A$ ,  $L$ ,  $H$ ,  $CN$ ) sobre a vazão máxima;
- Obtenção e análise das equações regionalizadas.

#### 3.3.1 Análise de influência dos parâmetros sobre a vazão máxima.

Foi analisada a influência do tempo de concentração, da área da bacia, do comprimento do rio principal, da diferença de cota entre o exutório e o ponto mais remoto e do  $CN$  nas vazões máximas de 1.000 e 10.000 anos de tempo de retorno.

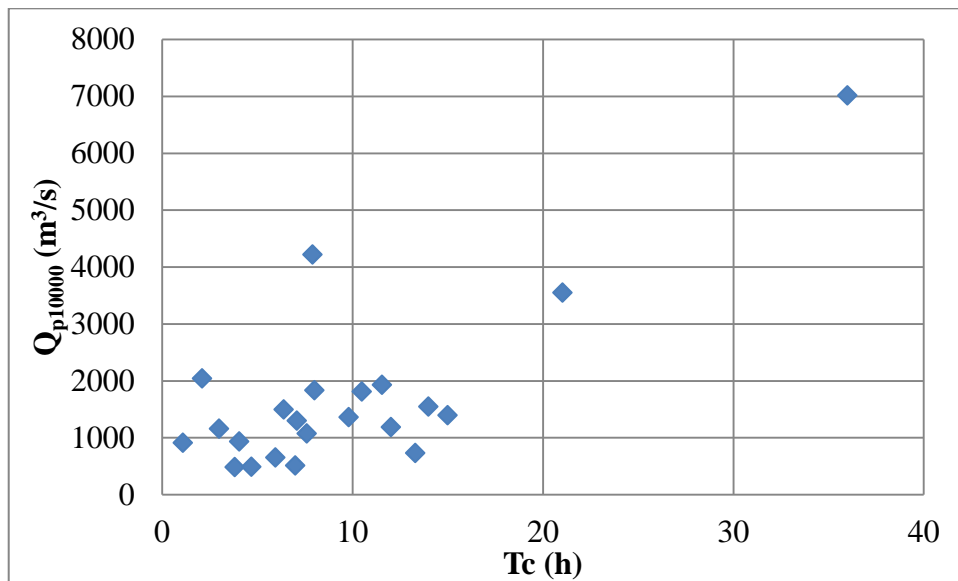
Gráfico 3.1 – Influência do tempo de concentração sobre a vazão máxima de  $T_r = 1.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.



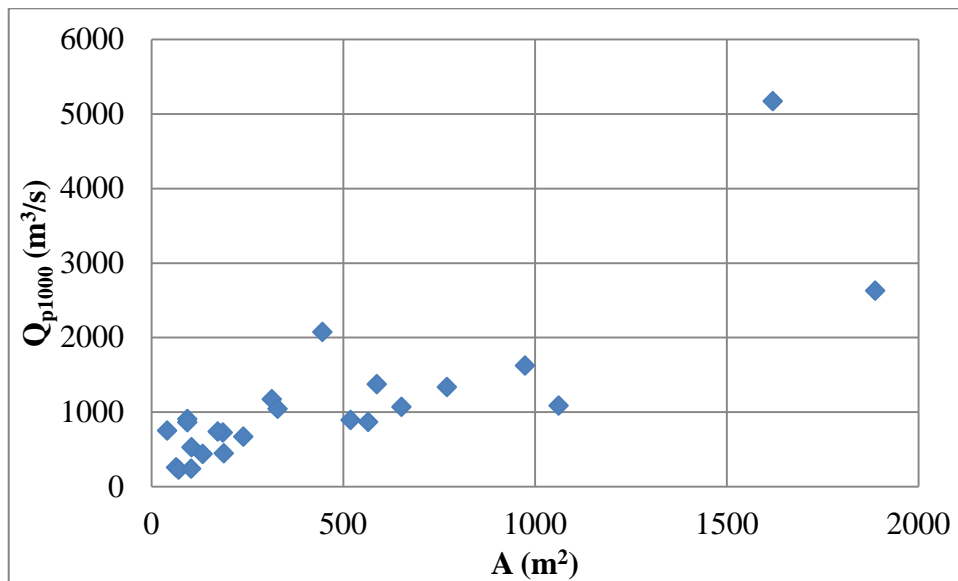
Gráfico 3.2 – Influência do tempo de concentração sobre a vazão máxima de  $T_r = 10.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

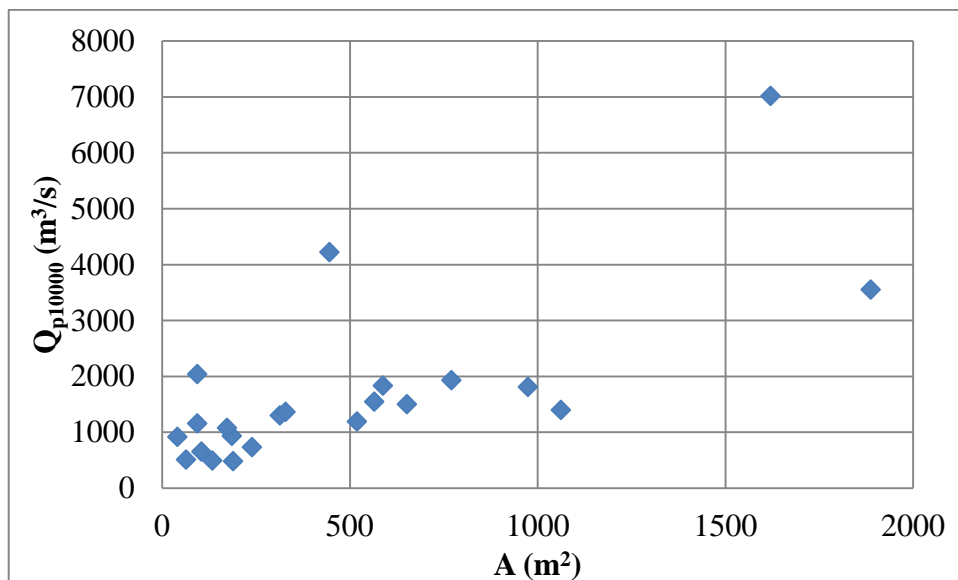
Os Gráficos 3.1 e 3.2 apresentam a influência do tempo de concentração (variando entre 1,1 a 36 horas) sobre a vazão de pico de 1.000 e 10.000 anos, respectivamente. Altos valores do tempo de concentração indicam um retardo na vazão de pico. Observa-se que ocorre um comportamento irregular do gráfico de dispersão: ora a vazão aumenta com o tempo de concentração, ora diminui. Esse comportamento irregular provavelmente ocorreu pela diversidade dos dados coletados. O coeficiente de correlação entre essas duas variáveis apresentou um valor de 0,86, para a vazão de 1000 anos, e 0,78, para a vazão de 10000 anos, porém, ao retirar apenas as barragens Figueiredo e Mamoeiro, esses coeficientes diminuem para 0,38 e 0,17, respectivamente. Portanto, essas duas barragens podem gerar falsas tendências entre a vazão máxima e o tempo de concentração.

Gráfico 3.3 – Influência da área da bacia hidrográfica sobre a vazão máxima de  $T_r = 1.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3.4 – Influência da área da bacia hidrográfica sobre a vazão máxima de  $T_r = 10.000$  anos.

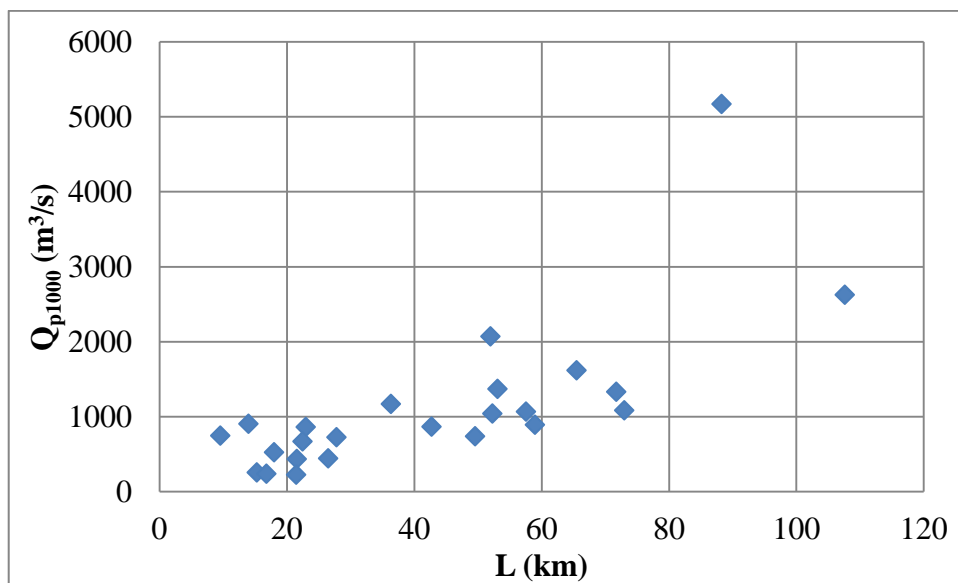


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 3.3 e 3.4 mostram a influência da área da bacia hidrográfica (variando entre 41,38 a 1887,6 km<sup>2</sup>) sobre a vazão máxima de 1.000 e 10.000 anos. Observa-se que as barragens Figueiredo e Mamoeiro destacam-se pelos seus elevados valores de área. Além disso, o coeficiente de correlação para a vazão de 1.000 anos apresentou um valor de 0,80

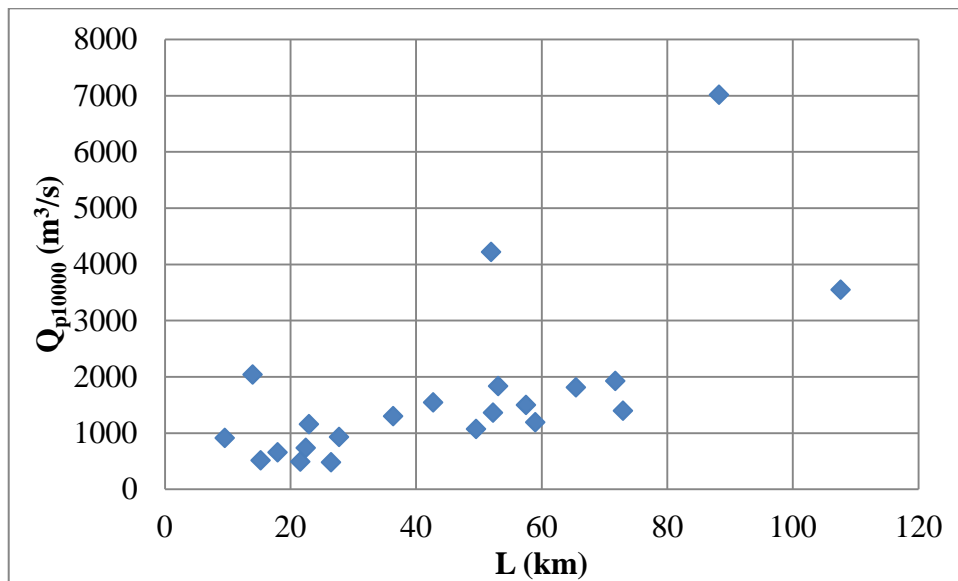
para as 24 barragens, mas seu valor diminui para 0,66 ao retirar essas duas barragens. Já para a vazão de 10.000 anos, esse coeficiente é de 0,72 para as 22 barragens, mas esse valor diminui para 0,40 retirando as duas barragens. Tal avaliação indica uma melhor representação do comportamento entre esses dois parâmetros ao retirar as barragens Figueiredo e Mamoeiro. Porém, mesmo retirando as duas barragens, observa-se uma significativa tendência de aumento de vazão por aumento de área.

Gráfico 3.5 – Influência do comprimento do rio principal sobre a vazão máxima de  $T_r = 1.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

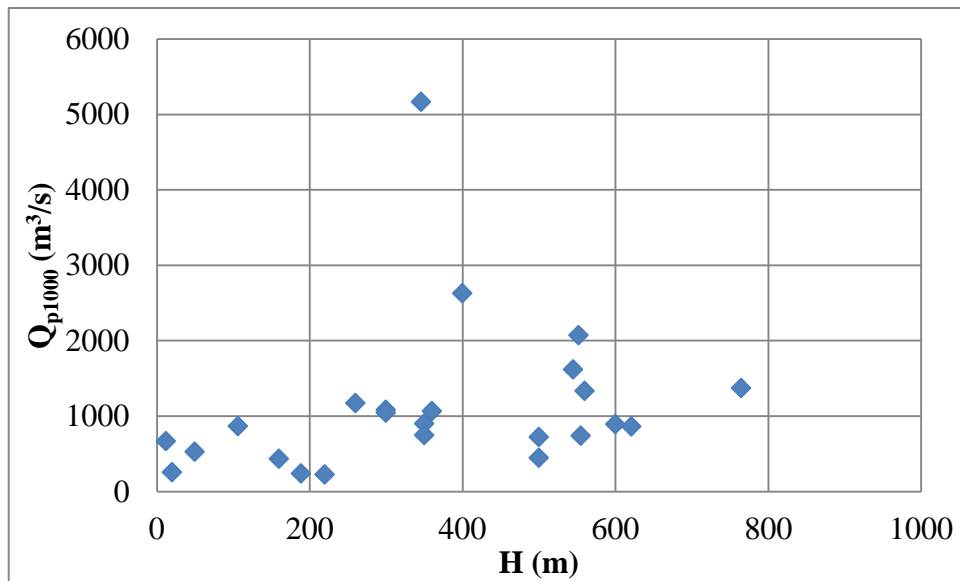
Gráfico 3.6 – Influência do comprimento do rio principal sobre a vazão máxima de  $T_r = 10.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

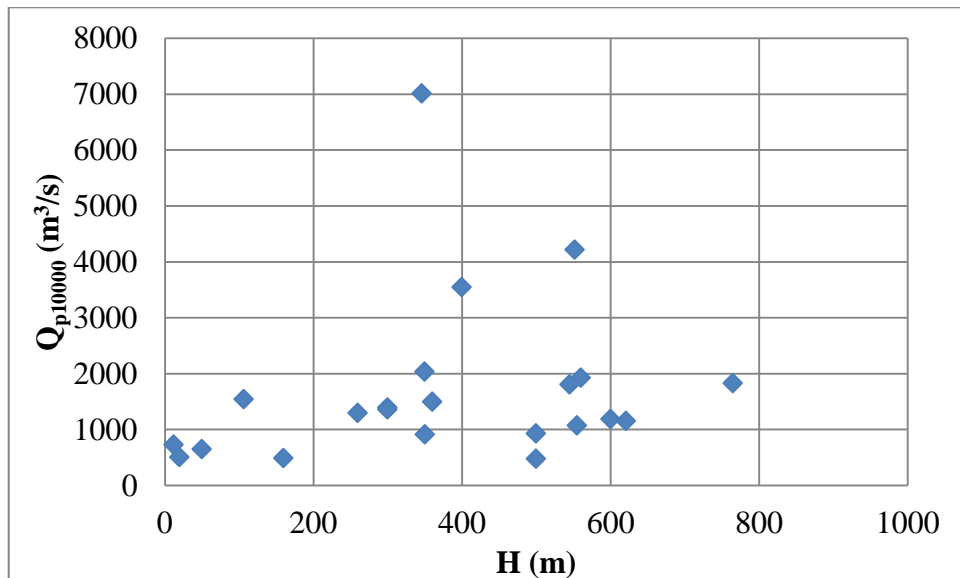
A influência do comprimento do rio principal (variando entre 9,6 a 107,63 km) sobre as vazões máximas é representada nos Gráficos 3.5 e 3.6. Destaca-se que as bacias com grandes rios tendem a amortecer as vazões devido ao longo percurso da água sobre o canal principal até o exutório (TUCCI, 1997). O coeficiente de correlação para a vazão de 1.000 (10.000) anos foi de 0,72 (0,65), com uma pequena diminuição de 0,70 quando se retiram os dois maiores comprimentos de rio. Já para a vazão de 10.000 anos essa diminuição é mais acentuada (0,46). Portanto, nota-se uma tendência proporcional entre as vazões máximas e o comprimento do rio principal.

Gráfico 3.7 – Influência da área da diferença de cota sobre a vazão máxima de  $T_r = 1.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3.8 – Influência da área da diferença de cota sobre a vazão máxima de  $T_r = 10.000$  anos.

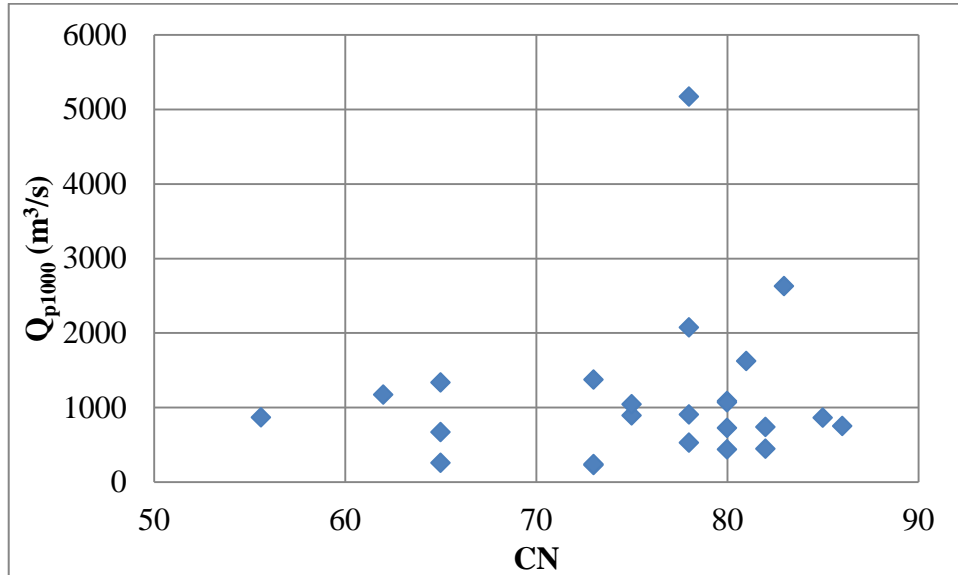


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Gráficos 3.7 e 3.8 apresentam o comportamento entre a diferença de cota (variando entre 12 a 765 m) e as vazões máximas. O coeficiente de correlação entre essas duas variáveis foi de 0,24 para  $Q_{p1000}$ , porém, ao retirar os dois maiores H's, esse valor

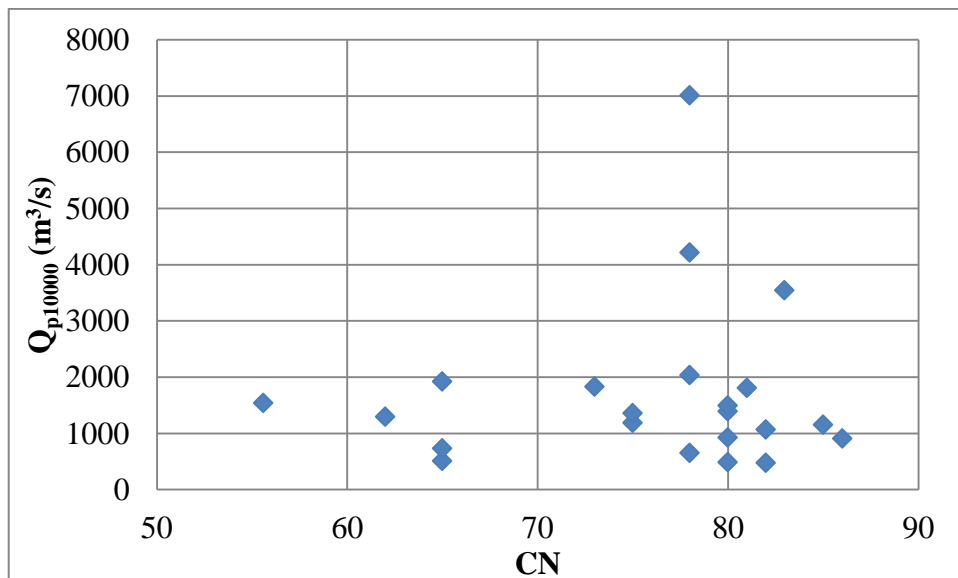
aumenta para 0,57. Já para  $Q_{p10000}$ , esse coeficiente é de 0,21 (22 barragens) e 0,42 (20 barragens). Portanto, existe uma leve tendência de aumento da vazão pela diferença de cota.

Gráfico 3.9 – Influência do CN sobre a vazão máxima de  $Tr = 1.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3.10 – Influência do CN sobre a vazão máxima de  $Tr = 10.000$  anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se nos Gráficos 3.9 e 3.10 a influência do CN (variando entre 55,6 a 86,02) sobre a vazão máxima. Altos valores de CN indicam grandes áreas impermeáveis sobre a bacia hidrográfica, aumentando, assim, as vazões afluentes. Entretanto, essa relação

apresentou um pequeno coeficiente de correlação de 0,14 para  $Q_{p1000}$  e de 0,10 para  $Q_{p10000}$ . Tais valores praticamente se mantiveram pequenos ao retirar a barragem Figueiredo. Portanto, há uma fraca correlação entre o CN e as vazões máximas.

Os resultados dos impactos de cada variável sobre a vazão máxima indicam que a área da bacia e o comprimento do rio principal interferem diretamente sobre a vazão, enquanto o tempo de concentração e a diferença de cota possuem pouca influência direta. Já o CN não interferiu significativamente na descrição da vazão. Portanto, a regionalização proposta neste trabalho utilizou as variáveis com as maiores correlações, assim, somente o CN ficou de fora das equações regionalizadas.

El-Hames (2012) tentou descrever o comportamento da vazão em função da área da bacia hidrográfica, do comprimento do rio principal e da inclinação média da bacia. Além disso, os trabalhos aqui apresentados também utilizaram a área da bacia como um dos principais parâmetros de regionalização da vazão (CHAVES et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2013; ZAMAN, RAHMAN e HADDAD, 2011; SARHADI e MODARRES, 2011; ANDRADE et al., 2004).

### 3.3.2 Obtenção e análise das equações regionalizadas.

A Tabela 3.5 apresenta as equações das vazões adimensionalizadas para os tempos de retorno (Tr) de 1.000 e 10.000 anos e os resultados das verificações de cada equação, cujos valores atenderam aos requisitos necessários.

Tabela 3.5 – Sumário das equações adimensionais.

Equação	Tr (anos)	$r^2$	F total	F parcial	$S_e(10^{-4})$	$S_Y(10^{-4})$
$\pi = 0,0001076.S_o^{-2,57}.Fr^{2,10}$	1.000	0,88	41,52	69,53	7,21	20,25
$\pi = 0,0001983.S_o^{-2,58}.Fr^{2,14}$	10.000	0,86	128,98	221,01	5,67	23,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, a regionalização resultou numa função que relaciona a declividade ( $S_o$ ) e o número de Froude adaptado (Fr). Nota-se que a declividade apresenta uma relação inversamente proporcional com a vazão, enquanto o Froude é diretamente proporcional.

Para grandes bacias, o escoamento superficial ocorre predominantemente por um canal definido, de menor declividade e menor perda de carga (TUCCI, 1997). Dessa forma, bacias de grande porte podem apresentar um comportamento inversamente proporcional entre

a declividade e a vazão, dado que a perda de carga pode ter um efeito maior sobre o escoamento.

Outra forma de apresentar as equações da Tabela 3.5 é por meio das variáveis não adimensionais (A, L, Tc e H). As equações 3.7 e 3.8 mostram as vazões máximas em função das variáveis dimensionais para um Tr = 1.000 anos e Tr = 10.000 anos, respectivamente. Destaca-se que as equações apresentadas estão dimensionalmente consistentes, ou seja, a resultante da combinação dessas variáveis está com dimensão de vazão.

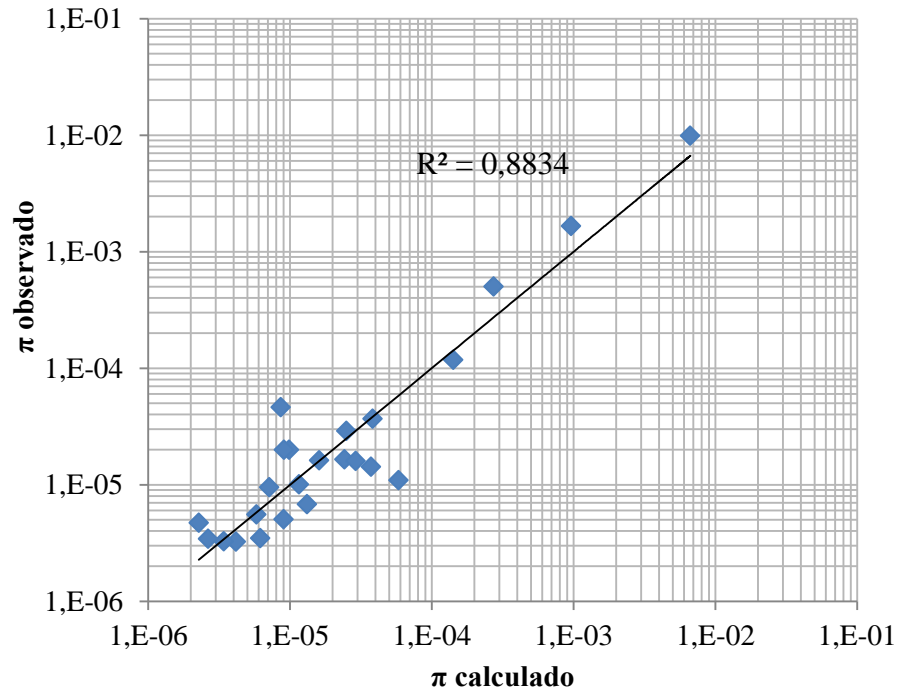
$$Q_{p1000} = 0,0001076 \cdot \frac{A^{1,05} \cdot L^{2,02}}{Tc^{2,10} \cdot H^{0,57} \cdot g^{0,55}} \quad (3.7)$$

$$Q_{p10000} = 0,0001983 \cdot \frac{A^{1,07} \cdot L^{2,01}}{Tc^{2,14} \cdot H^{0,58} \cdot g^{0,57}} \quad (3.8)$$

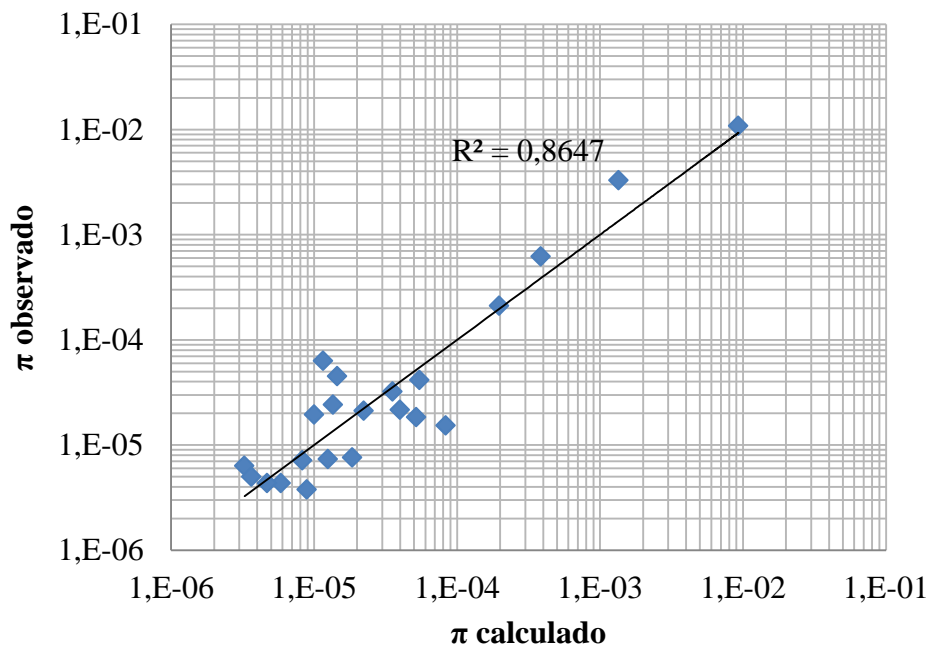
Através dessas duas equações é possível inferir que o tempo de concentração (Tc), o comprimento do rio principal (L) e a área da bacia hidrográfica (A) são as variáveis de maiores pesos na determinação das vazões máximas, enquanto a diferença de cota (H) possui um menor impacto. Portanto, nota-se que as vazões são diretamente proporcionais à área e ao comprimento do rio e inversamente proporcionais ao tempo de concentração e à diferença de cota.

Os gráficos 3.11 e 3.12 mostram a relação entre a vazão máxima adimensional observada e calculada, a linha de tendência e o valor do coeficiente de determinação. Ambos os eixos dos gráficos estão na escala logarítmica de base 10.



Gráfico 3.11 – Calibração do método para  $T_r = 1.000$  anos em escala logarítmica de base 10.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3.12 – Calibração do método para  $T_r = 10.000$  anos em escala logarítmica de base 10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados, verificou-se que a inclusão da variável fator de forma (ff), Curva Número (CN) e o parâmetro de fluxo ( $\lambda$ ) não trazem ganhos significativos ao

modelo de estimativa das vazões máximas. Essa análise foi feita através do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), mostrando que ao adicionar mais variáveis, a equação resultava em pequenos aumentos de  $r^2$ . Portanto, somente as variáveis  $S_o$  e  $Fr$  são suficientes para tentar descrever o comportamento das vazões máximas.

As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam os valores do  $r^2$  e do desvio médio para cada retirada de barragem. Observa-se que apenas a retirada de uma ou duas barragens da análise possibilita uma significativa melhoria, tanto no  $r^2$  como no Desvio Médio. As barragens Mamoeiro, Figueiredo e Benguê destacam-se pelas elevadas áreas, comprimentos de rio e tempos de concentração, assim, podem criar tendências ou diminuir a precisão da regionalização. Já a barragem Umari possui a quarta maior  $A$  e a quarta maior  $Q_{p1000}$ , por isso, poderia provocar leves tendências nas equações.

Porém, notou-se que a barragem Missi apresentou os maiores desvios médios dentre todos os açudes analisados. Sua retirada proporciona uma grande melhoria no Desvio Médio, como pode ser observado nas Tabelas 3.6 e 3.7. Essa barragem está inserida na Bacia do Litoral, caracterizada por apresentar um alto nível de açudagem (CEARÁ, 2009b). Portanto, essa característica pode influenciar o comportamento das vazões nesta região e interferir nos resultados da regionalização.

Tabela 3.6 – Avaliação das equações em função da retirada de barragens ( $Tr = 1.000$  anos).

Nº de barragens	$r^2$	Desvio Médio	Barragens Retiradas
24	0,88	0,61	-
23	0,91	0,45	Missi
22	0,93	0,40	Missi e Benguê
21	0,93	0,37	Missi, Benguê e Umari
20	0,94	0,35	Missi, Benguê, Umari e Mamoeiro
19	0,96	0,32	Missi, Benguê, Umari, Mamoeiro e Figueiredo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3.7 – Avaliação das equações em função da retirada de barragens (Tr = 10.000 anos).

Nº de barragens	r <sup>2</sup>	Desvio Médio	Barragens Retiradas
22	0,86	0,73	-
21	0,90	0,55	Missi
20	0,91	0,49	Missi e Benguê
19	0,92	0,44	Missi, Benguê e Umari
18	0,93	0,39	Missi, Benguê, Umari e Carmina
17	0,94	0,36	Missi, Benguê, Umari, Carmina e Mamoeiro

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 Conclusões

Este trabalho propõe uma abordagem empírica para a determinação de vazões máximas em regiões semiáridas do estado do Ceará baseado nas características fisiográficas e hidrológicas da bacia hidrográfica. Este estudo avaliou a melhor equação que descrevesse o comportamento das vazões máximas em função de características de fácil determinação para tempos de retorno comuns em obras de barragens. As equações encontradas apresentaram bons resultados, com os parâmetros apresentando as seguintes variações: área da bacia entre 41,38 a 1887,6 km<sup>2</sup>; comprimento do rio principal entre 9,6 a 107,6 km; tempo de concentração de 1,1 a 36 horas; diferença de cota de 12 a 765 m.

As equações desenvolvidas apresentam um bom desempenho quando se observam os números do coeficiente de determinação, cujos valores são de 0,88 (Tr = 1.000) e 0,86 (Tr = 10.000), utilizando todas as barragens. Ao retirar poucos dados esses valores ficam na ordem de 0,90. Além disso, as equações propostas foram validadas pelos testes estatísticos, indicando, assim, como uma boa ferramenta preliminar para projetos hidráulicos semelhantes.

As principais diferenças deste estudo em comparação com os trabalhos citados são:

I. Utilização de dados reais de projeto. Neste trabalho, não foram empregados dados de estações pluviométricas que consistem apenas em informações pontuais, necessitando, assim, de métodos de interpolação. Outras dificuldades em utilizar essas estações são a descontinuidade das medições e erros de leitura.

II. Inclusão de várias características da bacia no cálculo das vazões máximas. Neste aspecto, alguns estudos citados utilizaram poucas características para descrever o modo como as vazões máximas se comportam. Além disso, as características deste estudo podem

ser obtidas através de Sistema de Informação Geográfico (SIG), com exceção apenas do tempo de concentração, que pode ser calculado por várias equações empíricas disponíveis na literatura (Grimaldi et al., 2012).

III. Aplicação de equação adimensional para um número significativo de amostras. Todos os estudos citados não apresentaram uma equação no formato adimensional para analisar a vazão máxima. Este tipo de formato permite uma melhor percepção do pesquisador sobre os parâmetros analisados, diminui o número de variáveis do problema e permite a extrapolação de valores.

### **3.5 Agradecimentos**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa concedida ao primeiro autor e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP (Processo PNE-0112-00042.01.00/16) pelo apoio financeiro para a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M.; PORTO, M. M.; COSTA, R. N. T.; MEIRELES, M.; NETO, J. A. C. Regionalização de modelos de vazões medias de longo período para o Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v.35, p. 139-148, 2004.
- ARSENAULT, R.; BRISSETTE, F. P. Continuous streamflow prediction in ungauged basins: The effects of equifinality and parameter set selection on uncertainty in regionalization approaches. **Water Resources Research**, v. 5, n. 7, p. 6135-6153, 2014. doi: 10.1002/2013WR014898.
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ- SRH. **Atlas Dos Recursos Hídricos Do Ceará**. <<http://atlas.cogerh.com.br/>> acesso: 08/01/2020.
- BHUNYA, P. K.; PANDA, S. N.; GOEL, M. K. Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. **The Open Hydrology Journal**, Bentham Open, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2011. DOI: 10.2174/18-74378101105010001
- BRACKEN, L. J.; COX, N. J.; SHANNON, J. The relationship between rainfall inputs and flood generation in south–east Spain. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 5, p. 683-696, 2008. <https://doi.org/10.1002/hyp.6641>
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.
- CAMPOS, J. N. B.; RABELO, U. P.; LIMA NETO, I. E. **The bell-shaped unit hydrograph by the overland plane**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. No prelo.
- 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. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150124>
- CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Instituto de Estudos e Pesquisas Para Desenvolvimento Do Estado Do Ceará. **Caderno Regional da Bacia do Litoral**. Fortaleza: INESP, 2009b.
- ÇENGEL, Y. A; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGraw Hill, 2007.
- CHAVES, L. G.; STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A. Regional envelope curves for the state of Ceará: a tool for verification of hydrological dam safety. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 29, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.021720160062>
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2013.
- EL-HAMES, A. S. An empirical method for peak discharge prediction in ungauged arid and semi-arid region catchments based on morphological parameters and SCS curve number.

**Journal of Hydrology**, v. 456-457, n. 1, p. 94-100, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.016>

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>

GRIMALDI, S.; PETROSELLI, A.; TAURO, F.; PORFIRI, M. Time of concentration: a paradox in modern hydrology. **Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 57, n. 2. p. 217-228, 2012. DOI: 10.1080/02626667.2011.644244.

HAAN, C. T. **Statistical Methods in Hydrology**. Ames, EUA : The Iowa State University Press. 1977.

MCINTYRE, N.; AL-QURASH, A. Performance of ten rainfall-runoff models applied to an arid catchment in Oman. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, n. 6, p. 726-738, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.11.001>

NAGHETTINI, M. **Introdução à hidrologia aplicada**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2007.

LOUDIN, L.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; LE MOINE, N. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. **Water Resources Research**. v. 44, n. 3, p. 1-15, 2008. doi:10.1029/2007WR006240

SARHADI, A.; MODARRES, R. Flood seasonality-based regionalization methods: a data-based comparison. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 23, p. 3613-3624, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8088>.

SCS - Soil Conservation Service. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1973.

SOUZA, D. N.; STUDART, T. M. C.; LIMA NETO, I. E.; CAMPOS, J. N. B. Flood damping by reservoirs: proposition of a graphical parametric method. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 39, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/23180331.02-17170002>

TEIXEIRA, F. A. A.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; BARROS, F. V. F.; CABRAL, S. L. Regionalização de vazões máximas para o estado do Ceará. In: **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 20, 2013, Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013, p. 1-8.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1997.

WANDERLEY, L. J.; MANSUR, M. S.; MILANEZ, B; PINTO, R. G. Desastre da Samarco/Vale/BHP no Vale do Rio Doce: aspectos econômicos, políticos e sócio ambientais. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 3, p. 30-35, 2016. <http://dx.doi.org/10.21800/2317666-02016000300011>.

ZAMAN, M.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood modelling in arid and semi-arid regions in Australia. 19<sup>th</sup> International Congress on Modelling and Simulation, 19, 2011, **Sustaining our Future: Understanding and Living with Uncertainty**, Perth, Australia, 2011. p. 12-16.

#### **4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A previsão do escoamento superficial em regiões secas, como no Ceará, permite um melhor dimensionamento nos projetos executivos de estruturas hídricas, bem como um melhor gerenciamento da oferta hídrica disponível para os seus diferentes usos. Dessa forma, o órgão gestor dos recursos hídricos adquire mais informações para a sua tomada de decisão, diminuindo as falhas e identificando melhor os riscos. Os principais objetivos, conclusões e recomendações deste estudo podem ser resumidos, como segue: (i) modelagem do Hidrograma Unitário Sintético Triangular baseada em dados físicos e hidrológicos de bacias hidrográficas cearenses. Portanto, diante dos testes estatísticos, destacam-se a consistência das equações encontradas e a facilidade em suas aplicações, porém, recomenda-se a utilização de outras características importantes da bacia e outros modelos de hidrogramas; (ii) abordagem empírica adimensional para a determinação de vazões máximas em regiões semiáridas para diferentes períodos de retorno. As equações encontradas apresentaram bons resultados ao observar os valores dos coeficientes de determinação (superiores a 80%). Porém, indica-se a utilização de mais dados de projeto e diferentes formatos de equações.