

Equações adimensionais para determinação de vazões máximas para diferentes tempos de retorno em regiões semiáridas

Dimensionless equations for determination of peak flows for different return times in semiarid regions

Jefferson Sousa Rocha^{1*} , Iran Eduardo Lima Neto¹ 

RESUMO

Na concepção de obras hidráulicas, como as barragens, necessita-se, para um dimensionamento seguro, de estudos referentes às vazões máximas. 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 das regiões monitoradas para as não monitoradas. Este trabalho elaborou modelos de regionalização para a obtenção de vazões máximas para períodos 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, precipitação com duração de uma hora e diferença de cota entre o exultório e o ponto mais remoto da bacia. Utilizaram-se os dados de projeto de 30 barragens e calcularam-se as vazões máximas por meio do *software* HEC-HMS. Os testes estatísticos e os valores dos coeficientes de determinação (0,95) permitem considerar as equações adimensionais propostas consistentes e passíveis de serem utilizadas em análises preliminares de projetos hidráulicos.

Palavras-chave: regionalização; vazão máxima; semiárido; formulação adimensional.

ABSTRACT

In the design of hydraulic works, such as dams, studies referring to the peak flow rates are required for safe dimensioning. 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 to obtain peak flows for return periods 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, rainfall lasting 1 hour, and the difference in elevation between the basin and the most remote point of the basin. Project data from 30 dams were used and the peak flows were calculated using the HEC-HMS software. The statistical tests and the values of the determination coefficients (0.95) allow to consider the proposed dimensionless equations consistent and capable of being used in preliminary analyzes of hydraulic projects.

Keywords: regionalization; peak flow; semiarid; dimensionless formulation.

INTRODUÇÃO

A vazão ou descarga de uma bacia hidrográfica pode ser considerada como a principal característica do escoamento superficial. Por meio 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 alta variabilidade de vazões e à alternância entre extremos de secas e cheias (RABELO *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2017), além da carência de informações relacionadas ao monitoramento dos recursos hídricos, 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 *et al.* (2011), Sarhadi *et al.* (2011), Mcintyre *et al.* (2009) e Bracken *et al.*, (2008).

Durante os anos de 1910 a 2010, notou-se aumento na ocorrência de acidentes graves e muito graves envolvendo rompimento de barragens (WANDERLEY *et al.*, 2016). Em uma análise regional, estima-se que no Ceará existam mais de 30.000 barragens, cuja maioria foi construída há mais de 50 anos (CAMPOS *et al.*, 2016). Portanto, devido às técnicas antigas de execução e projeto, essas barragens têm alto risco potencial para a população cearense localizada a jusante.

¹Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil.

*Autor correspondente: jeffersonrocha@alu.ufc.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP (Projeto PRONEM/FUNCAP/CNPq/PNE0112-00042.01.00/16).

Recebido: 25/11/2020 – **Aceito:** 20/01/2021 – **Reg. ABES:** 20200413

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, utilizam-se técnicas para estimar valores para determinada região de interesse. A regionalização consiste em encontrar parâmetros comportamentais para modelos hidrológicos em bacias com pouco monitoramento (ARSENAULT *et al.*, 2014). 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 por meio 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 *et al.*, 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 1 representa a forma básica para representar a regressão não linear:

$$Y = \beta_1 X_1^{\beta_2} \cdot X_2^{\beta_3} \dots X_p^{\beta_p} \quad (1)$$

Em que:

Y = é a variável dependente,

$X_1, X_2,$ e X_p = são as variáveis independentes ou explicativas;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ e β_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. Sherman, em 1932, foi o primeiro a apresentar o método do hidrograma unitário (HU), que passaria por vários aperfeiçoamentos ao longo dos anos (BLANCO *et al.*, 2005; CAMPOS *et al.*, 2019). 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 (NAGHETTINI, 2012). Para regiões nas quais os dados históricos são insuficientes ou inexistentes, o hidrograma é estimado pelo método conhecido como hidrograma unitário sintético (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 HUS (BHUNYA *et al.*, 2011). O hidrograma unitário sintético triangular (HUST) foi proposto pelo Departamento de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service*) dos EUA (SCS, 1973). 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 por meio 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 têm dimensões. Existem vários exemplos de números adimensionais na hidráulica, como o de Euler, o de Froude e o 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 *et al.*, 2007). Essas vantagens são muito úteis em estudos hidrológicos, principalmente quando se pretende elaborar equações empíricas para a determinação de um modelo hidrológico prático.

Nesse 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 *et al.* (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 *et al.* (2011) regionalizaram as vazões médias anuais para as regiões áridas e semiáridas da Austrália. Os autores utilizaram 45 estações de medição distribuídas em 5 estados do país e apenas 2 variáveis representativas: a área de captação e a intensidade da chuva de projeto. Os autores encontraram 4 equações logarítmicas lineares, cujos coeficientes de determinação variaram entre 0,29 e 0,88.

Sarhadi *et al.* (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 Irã. As regiões homogêneas foram obtidas por meio de três métodos distintos: frequências relativas da ocorrência de vazões, estatísticas direcionais e 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, Omã, EUA, 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 as aplicaram 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.

Cassalho *et al.* (2017) aplicaram o método dos momentos-L para regionalizar as cheias em uma bacia hidrográfica localizada na Região Sul do Brasil. Os autores ajustaram as séries de vazão máxima anual nas funções de densidade

de probabilidade tradicionais. O resultado foi uma função regional da vazão máxima que utiliza o período de retorno e a área da bacia hidrográfica como variáveis independentes. Entretanto, o estudo concluiu que a equação encontrada tem ótimo desempenho para tempos de retorno de até 100 anos.

Como forma de contribuir para os estudos de regionalização e a análise de bacias hidrográficas com pouco monitoramento, principalmente em regiões semiáridas, propõe-se, neste trabalho, a regionalização da vazão de pico em bacias nas quais 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, a utilização de dados de projetos e de dados simulados pelo software HEC-HMS – versão 4.4 (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*).

METODOLOGIA

Área de estudo

O estado do Ceará tem uma população estimada de mais de 8,5 milhões de habitantes e uma área de aproximadamente 150.000 km². Além disso, está inserido quase totalmente na região semiárida do Brasil, aproximadamente 98%

do estado (Figura 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).

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, com seus respectivos dados: cidades, capacidade máxima, ano de conclusão e bacias hidrográficas cearenses nas quais estão inseridas (SRH, 2020). Vale destacar que a maioria das barragens deste estudo, com exceção da Jaburu I e da Mundaú, 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).

Por meio da Tabela 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 11 foram abordadas neste trabalho, exceto a Bacia Hidrográfica dos Sertões de Crateús. Tanta diversidade acarreta uma análise mais variada e abrangente do estudo, fazendo com que a regionalização consiga englobar características importantes do semiárido cearense. Na Figura 2 estão localizadas as barragens que compõem este estudo.

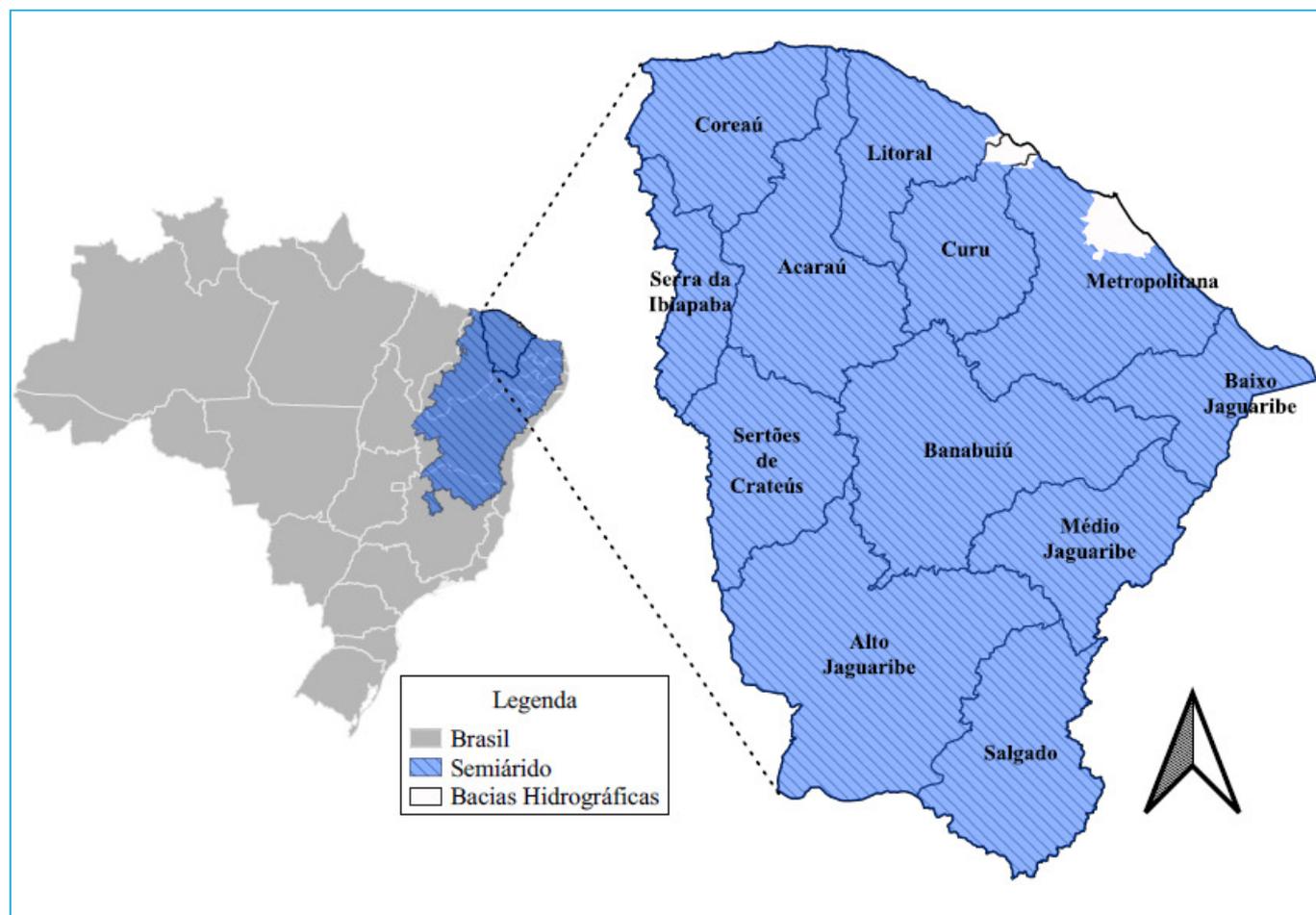


Figura 1 - Localização do estado do Ceará e suas bacias hidrográficas.

Tabela 1 – Localização e principais características das barragens analisadas.

Barragem	Município	Capacidade (hm ³)	Altura (m)	Ano de conclusão	Bacia
Aracoiaba	Aracoiaba	170,70	35,00	2002	Metropolitana
Batente	Ocara	28,90	12,50	2001	Metropolitana
Benguê	Aiuaba	19,56	23,61	2000	Alto Jaguaribe
Beré	Jardim	11,91	59,00	2003	Salgado
Carmina	Catunda	13,63	19,00	2002	Acaraú
Ceará	Caucaia	51,58	18,00	2003	Metropolitana
Chile	Ibicutinga	11,27	11,20	2002	Baixo Jaguaribe
Figueiredo	Iracema	51960	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
Itapebussu	Maranguape	8,80	9,00	2006	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
Jucá	Parambu	31,80	18,30	2006	Alto Jaguaribe
Malcozinhado	Cascavel	37,84	19,11	2002	Metropolitana
Mamoeiro	Antonina do Norte	20,68	28,45	2012	Alto Jaguaribe
Maranguape I	Maranguape	5,48	24,90	2003	Metropolitana
Maranguape II	Maranguape	9,10	18,10	2003	Metropolitana
Melancia	São Luís do Curu	27,30	21,73	2006	Curu
Missi	Miraima	65,30	17,30	2011	Litoral
Mundaú	Uruburetama	21,31	36,30	1988	Litoral
Riacho da Serra	Alto Santo	23,47	18,71	2011	Médio Jaguaribe
Riacho do Meio	Várzea Alegre	18,30	32,27	2006	Salgado
Souza	Canindé	30,84	19,90	1998	Curu
Trairi	Trairi	58,80	19,10	2003	Litoral
Umari	Madalena	35,04	21,82	2011	Banabuiú

Dados utilizados

Na Tabela 2 são apresentadas as vazões máximas, calculadas com o auxílio do *software* HEC-HMS, versão 4.4, para os tempos 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 as precipitações com duração de 1 hora para tempo de retorno milenar ($P_{1h,mil}$) e decamilenar ($P_{1h,dec}$). Com exceção das vazões máximas, esses dados foram obtidos por intermédio dos projetos executivos dessas barragens.

Adimensionalização

A vazão de um rio é uma função dos parâmetros hidrológicos e morfológicos da bacia hidrográfica do reservatório (COLLISCHONN *et al.*, 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 modo a encontrar outra variável sem dimensão (ÇENGEL *et al.*, 2007).

Foram determinadas as equações regionalizadas das vazões de pico, encontrando um fator adimensional, chamado de vazão máxima adimensional (Π), que agrega todos os outros parâmetros adimensionais. Dentre as variáveis escolhidas para este estudo, apenas a 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 (λ). Portanto, as variáveis da Tabela 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).

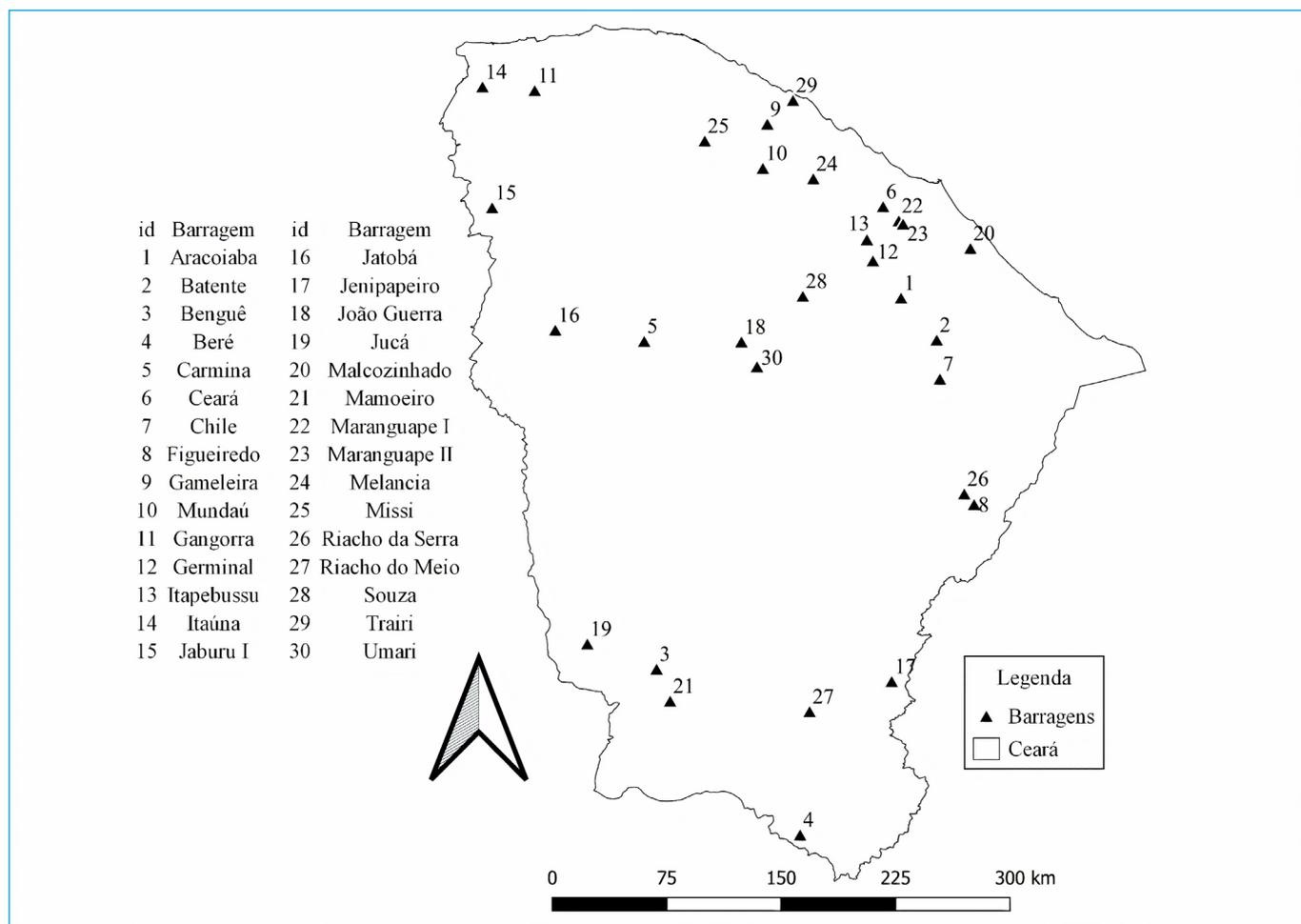


Figura 2 - Localização das barragens analisadas no estado do Ceará

A própria variável de interesse (vazão máxima) também passou pelo processo de adimensionalização por meio da sua divisão com um parâmetro Φ , que tem a mesma dimensão (m^3/s). De acordo com a Equação 2, Φ é encontrado pelo produto entre H^2 e $\sqrt{g.L}$. A resultante dessa vazão adimensionalizada foi chamada de Π .

$$\pi = \frac{Q_p}{\Phi} = \frac{Q_p}{H^2 \sqrt{g.L}} \quad (2)$$

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

A Equação 3 mostra ff relaciona a área da bacia com o comprimento do rio principal. A bacia que tem baixo fator de forma indica que esta é estreita e longa, ou seja, é menos sujeita a enchentes do que outra de mesmo tamanho, mas com fator de forma maior.

$$ff = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

A S_o consiste na divisão entre o desnível e o comprimento do rio principal (Equação 4), ou seja, representa a inclinação decrescente entre o ponto mais alto da bacia e o exutório.

$$S_o = \frac{H}{L} \quad (4)$$

Um número adimensional bastante conhecido na hidráulica é o Fr . O Fr 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 a precipitação milenar ou decamilenar (Equação 5).

$$Fr = \frac{\sqrt{A}}{T_c \sqrt{g.P_{1h}}} \quad (5)$$

De acordo com a Equação 6, a determinação de λ 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 Fr , uma vez que \sqrt{A} e T_c representam, respectivamente, uma escala de comprimento e uma escala de tempo.

Tabela 2 - Dados utilizados para os cálculos das equações adimensionais.

Barragem	(m³/s) Q _{p1000}	(m³/s) Q _{p10000}	(h) T _c	(km²) A	(km) L	(m) H	CN	(mm) P _{1h,mil}	(mm) P _{1h,dec}
Aracoiaba	1333,60	1889,50	8,00	588,60	53,10	765,00	73,00	79,80	96,60
Batente	606,1	1007,50	21,35	1438,30	70,92	110,00	73,00	53,30	67,40
Benguê	722	1022,70	15,00	1062,30	73,00	300,00	80,00	52,30	62,30
Beré	1513,80	1884,80	15,65	1410,20	80,46	360,00	65,00	94,60	103,70
Carmina	591,2	695,4	3,82	189,30	26,50	500,00	82,00	56,43	61,08
Ceará	792,5	1074,50	6,18	232,00	26,45	143,00	80,00	72,00	87,00
Chile	448,7	594,6	6,64	140,45	26,71	122,00	73,00	85,02	98,96
Figueiredo	844	1158,80	36,00	1621,00	88,30	346,02	78,00	68,50	83,50
Gameleira	488,4	700	12,03	519,77	49,00	161,20	75,00	49,90	65,60
Gangorra	435,7	553,6	5,95	104,70	18,00	50,00	78,00	78,90	92,50
Germinal	718,5	974,5	3,00	94,00	23,00	621,00	85,00	78,00	98,40
Itapebussu	454,2	632,7	2,32	76,34	18,50	618,00	71,00	75,50	90,40
Itaúna	1199,00	1661,50	11,56	771,30	71,75	560,00	65,00	88,90	104,10
Jaburu I	835,6	1290,80	7,09	314,10	36,37	260,00	62,00	100,70	125,10
Jatobá	648,9	810,2	1,10	41,38	9,60	350,18	86,02	79,70	94,40
Jenipapeiro	546,3	720	4,05	186,40	27,80	500,00	80,00	53,20	62,00
João Guerra	480	528,9	4,70	134,00	21,60	160,00	80,00	69,00	71,00
Jucá	1775,20	2415,00	6,26	644,62	36,17	353,00	81,00	73,50	88,20
Malcozinhado	441,9	507,5	13,30	240,00	22,50	12,00	65,00	99,80	105,70
Mamoeiro	985,7	1355,00	21,03	1887,60	107,63	400,00	82,97	49,70	58,70
Maranguape I	291,6	399,2	0,60	15,86	4,50	309,00	70,00	93,00	111,80
Maranguape II	283,7	389,3	0,86	18,50	4,65	131,00	70,00	93,00	111,80
Melancia	509,9	686,4	7,89	136,97	25,00	64,00	82,00	80,50	98,10
Missi	1128,4	1642,10	6,40	652,60	57,57	360,00	80,00	50,00	62,00
Mundaú	897,4	1352,80	1,16	36,25	10,00	600,00	75,00	133,70	181,90
Riacho da Serra	624,2	927,9	7,60	173,40	49,60	555,00	82,00	89,00	116,00
Riacho do Meio	805,6	1027,30	2,98	91,21	18,00	300,00	82,00	97,20	114,50
Souza	735,2	1032,90	4,00	219,30	21,00	238,00	77,00	64,60	78,00
Trairi	451,2	595,9	7,25	327,02	31,87	165,00	75,00	51,10	59,30
Umari	1094,70	1224,20	10,50	975,00	65,50	545,00	81,00	54,00	56,00

Neste trabalho, λ será chamado de parâmetro de fluxo. Na Tabela 3 é apresentada um resumo das equações adimensionalizadas.

$$\lambda = \frac{g \cdot T_c^2}{\sqrt{A}} \tag{6}$$

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 identificar se os dados podem ser descritos adequadamente por ela, ou seja, verificar se os dados amostrais têm evidências que sustentem a estatística descrita. A primeira avaliação pode ser realizada pelo coeficiente de correlação linear (r). Esse coeficiente tenta medir a dependência linear entre duas variáveis e varia entre -1 e 1. Outra forma de avaliar é por meio do coeficiente de determinação (r²).

Tabela 3 - Sumário das variáveis adimensionais e suas respectivas equações.

Nome	Símbolo	Equação
Vazão máxima adimensional	Π	$\frac{Q_p}{H^2 \sqrt{g \cdot L}}$
Fator de forma	ff	$\frac{A}{L^2}$
Declividade	S _o	$\frac{H}{L}$
Número de Froude adaptado	Fr	$\frac{\sqrt{A}}{T_c \sqrt{g \cdot P_{1h}}}$
Parâmetro de fluxo	λ	$\frac{g \cdot T_c^2}{\sqrt{A}}$

Esse coeficiente tenta definir o quanto a equação encontrada explica a variabilidade da variável dependente. O r^2 deve estar próximo de 1 (HAAN, 1977; BUSSAB *et al.*, 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). Recomenda-se que o erro padrão seja menor do que o desvio padrão da variável dependente analisada.

Na Tabela 4 estão listados os testes estatísticos utilizados para a avaliação das equações de regressão com suas respectivas fórmulas.

Na qual:

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 .

Tabela 4 - Conjunto de equações utilizadas para a verificação das equações regionalizadas.

Símbolo	Fórmula	
r	$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	(7)
r^2	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$	(8)
F total	$\frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}{\sum (y_i - \hat{y})^2 / (n - P - 1)}$	(9)
F parcial	$\frac{SQ Reg(X_p)}{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2 / P}$	(10)
S_e	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{n - P - 1}}$	(11)
S_y	$\sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}$	(12)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das simulações foram divididos em dois grupos:

- Análise de influência dos parâmetros (T_c , A, L, H, CN e P_{1h}) sobre a vazão máxima;
- Obtenção e análise das equações regionalizadas.
- Comparação com outras equações similares.

Análise de influência dos parâmetros sobre a vazão máxima

Analisou-se 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, da CN e da precipitação com 1 hora de duração nas vazões máximas de 1.000 e 10.000 anos de tempo de retorno.

As Figuras 3 e 4 apresentam a influência do tempo de concentração (variando entre 0,6 e 36 horas) sobre a vazão de pico de 1.000 e 10.000 anos, respectivamente. Altos valores do tempo de concentração indicam retardo na vazão de pico. Observa-se que ocorre 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, cuja amplitude observada foi de 35,4 horas. O coeficiente de correlação entre essas duas variáveis apresentou valores de 0,23, para a vazão de 1.000 anos, e de 0,24, para a vazão de 10.000 anos. Entretanto, ao retirar as barragens com os menores tempos de concentração (Maranguape I e II), verifica-se diminuição do coeficiente de correlação para as vazões milenares e decamilenares para, respectivamente, 0,15 e 0,16. Portanto, a utilização do

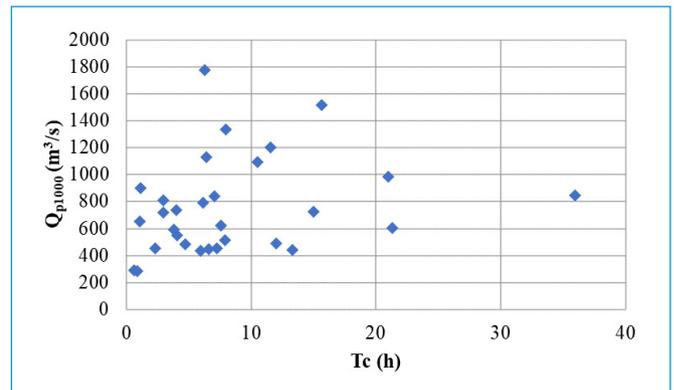


Figura 3 - Relação entre o tempo de concentração e a vazão máxima milenar.

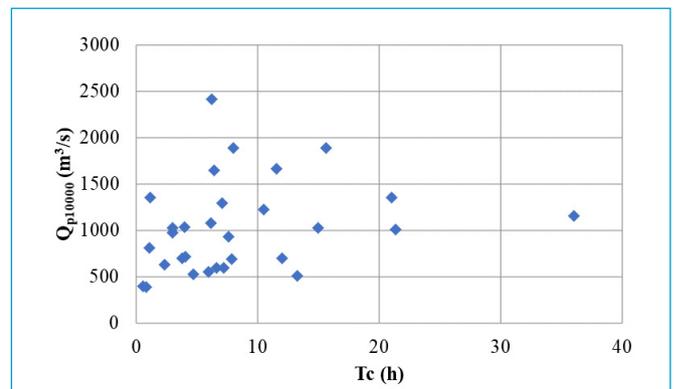


Figura 4 - Relação entre o tempo de concentração e a vazão máxima decamilenar.

coeficiente de correlação (r) não apresentou tendência significativa sobre a proporcionalidade entre os parâmetros.

As Figuras 5 e 6 mostram a influência da área da bacia hidrográfica (variando entre 15,86 e 1887,6 km²) sobre a vazão máxima de 1.000 e 10.000 anos. Observa-se que as barragens Figueiredo e Mamoeiro se destacam pelos seus elevados valores de área. Além disso, o coeficiente de correlação para a vazão de 1.000 anos apresentou valor de 0,50 para as 30 barragens, mas seu valor aumenta para 0,56 ao retirar essas duas barragens. Já para a vazão de 10.000 anos esse coeficiente também apresentou valor de 0,50 para as 30 barragens, mas esse valor aumenta para 0,55 retirando-se as duas barragens. Tal avaliação indica que, ao retirar as barragens Figueiredo e Mamoeiro, pouco muda a relação entre esses dois parâmetros. Portanto, mesmo removendo as duas barragens, observa-se tendência moderada de aumento de vazão por aumento de área. Esse comportamento pode ser justificado quando se observa que bacias grandes têm áreas de drenagem maiores, aumentando, assim, a captação das precipitações e, conseqüentemente, elevando as vazões. Entretanto, há outras relações que podem interferir nessa interação chuva-vazão.

A influência do comprimento do rio principal (variando entre 4,5 e 107,63 km) sobre as vazões máximas é representada nas Figuras 7 e 8. O coeficiente de correlação para as vazões milenares e decamilenares foi de 0,52, com pequeno aumento quando se retiram as duas barragens com os maiores comprimentos de rio: Figueiredo e Mamoeiro. 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). Porém, neste estudo, nota-se tendência moderada de proporcionalidade positiva entre as vazões máximas e o comprimento do rio principal. Esse comportamento pode ser explicado devido aos rios longos terem vários rios afluentes ao longo do seu canal, fazendo com que a vazão resultante tenha valor maior.

As Figuras 9 e 10 apresentam o comportamento entre a diferença de cota (variando entre 12 e 765 m) e as vazões máximas. O coeficiente de correlação entre essas duas variáveis foi de 0,45 para Q_{p1000} , porém, ao retirar os dois maiores H's, esse valor diminui para 0,40. Já para Q_{p10000} , esses coeficientes são de 0,45 (30 barragens) e 0,39 (28 barragens). Portanto, a relação entre vazão e a diferença de cota indicam proporcionalidade moderada positiva, porém, para bacias com densa rede de reservatórios, como é o caso de algumas bacias cearenses, pode ocorrer o amortecimento das vazões (TOLEDO, 2013; LIMA NETO et al., 2011).

Observa-se, nas Figuras 11 e 12, a influência da CN (variando entre 62 e 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 pequeno coeficiente de correlação de -0,01 para Q_{p1000} e de -0,04 para Q_{p10000} . Tais valores praticamente se mantiveram ao retirar a barragem Figueiredo, a qual se destaca por apresentar elevados valores de área, tempo de concentração e comprimento do rio principal, podendo, assim, interferir nas correlações. Portanto, há fraca correlação entre a CN e as vazões máximas. Esse comportamento provavelmente ocorreu devido aos CNs

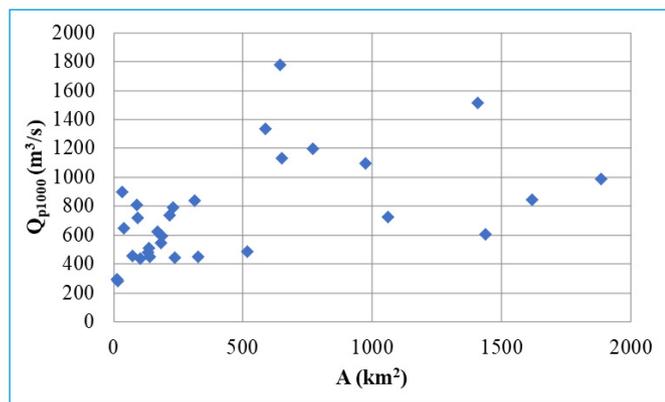


Figura 5 - Relação entre a área da bacia hidrográfica e a vazão máxima milenar.

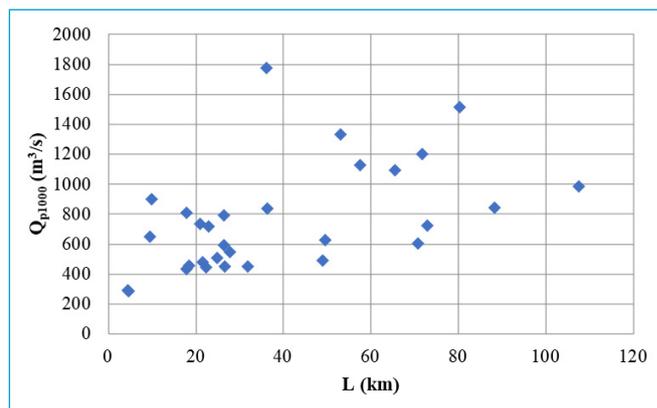


Figura 7 - Relação entre o comprimento do rio principal e a vazão máxima milenar.

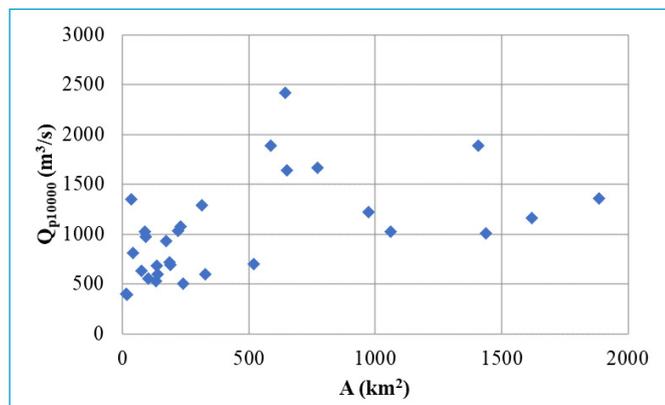


Figura 6 - Relação entre a área da bacia hidrográfica e a vazão máxima decamilenar.

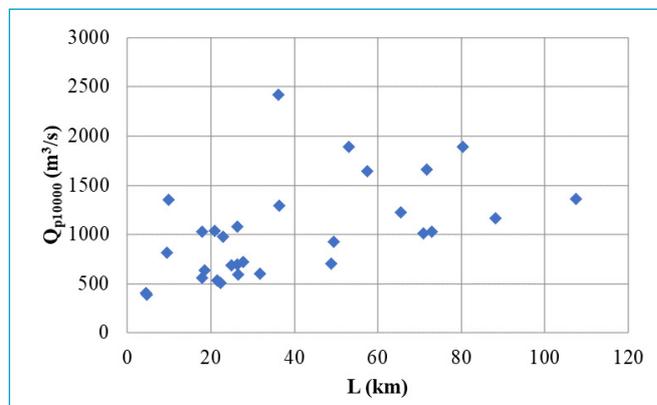


Figura 8 - Relação entre o comprimento do rio principal e a vazão máxima decamilenar.

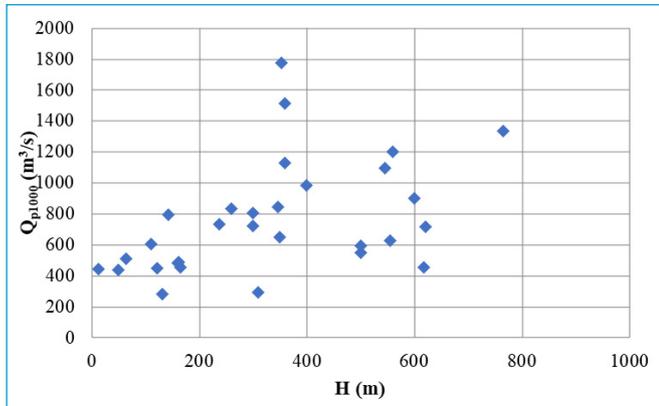


Figura 9 - Relação entre a diferença de cota e a vazão máxima milenar.

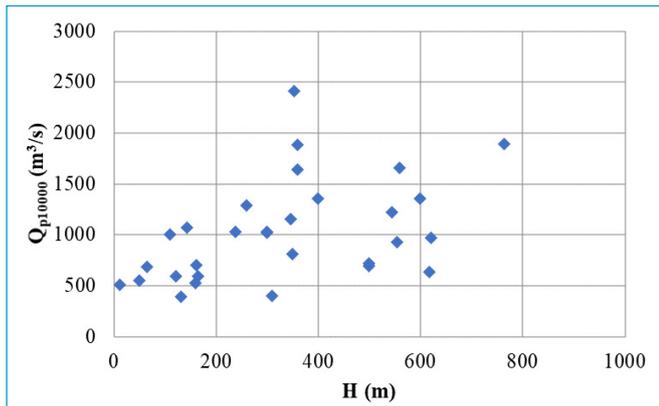


Figura 10 - Relação entre a diferença de cota e a vazão máxima decamilenar.

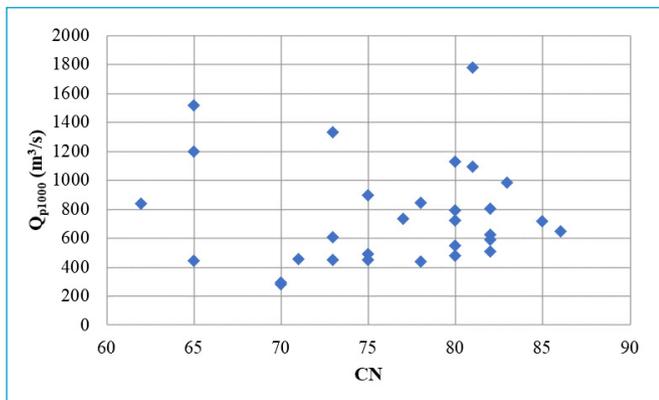


Figura 11 - Relação entre a curva número e a vazão máxima milenar.

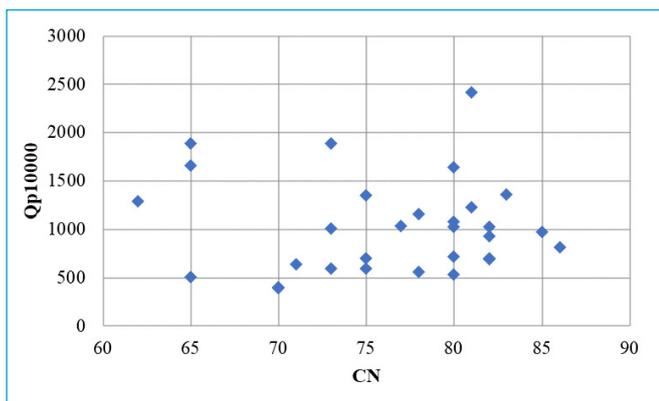


Figura 12 - Relação entre a curva número e a vazão máxima decamilenar.

apresentarem baixa variação, se comparada com a variação das vazões máximas. Tal fato indica que, para as bacias analisadas, têm-se solos com características similares; logo, as diferentes vazões calculadas podem ocorrer devido a outros parâmetros.

Observa-se, nas Figuras 13 e 14, a influência do $P_{1h,mil}$ (variando entre 49,7 e 133,7 mm) e do $P_{1h,dec}$ (variando entre 56 e 181,9 mm) sobre as vazões máximas. As correlações entre as precipitações e as vazões máximas apresentaram fraca correlação positiva (abaixo de 0,1), mantendo praticamente os mesmos valores ao retirar as barragens com as maiores precipitações. Além disso, é perceptível, nas Figuras 13 e 14, a dispersão dos pontos observados. Entretanto, como a precipitação é a principal entrada de água na bacia hidrográfica, conseqüentemente, as vazões tendem a aumentar com a elevação da precipitação.

Os resultados dos impactos de cada variável sobre a vazão máxima indicam que a área da bacia, o comprimento do rio principal, a diferença de cota, o tempo de concentração e a precipitação com duração de uma hora interferem diretamente sobre a vazão, enquanto o valor da CN tem relação inversa. Entretanto, deve-se levar em consideração as correlações existentes entre as próprias variáveis explicativas. Uma vez que esses parâmetros estão na mesma equação de regressão, a relação entre cada parâmetro e as vazões máximas pode ser modificada, alterando, assim, a proporcionalidade com as vazões máximas.

El-Hames (2012) descreveu o comportamento da vazão em função da área da bacia hidrográfica, do comprimento do rio principal, da precipitação e da inclinação média da bacia. Outros trabalhos aqui apresentados também

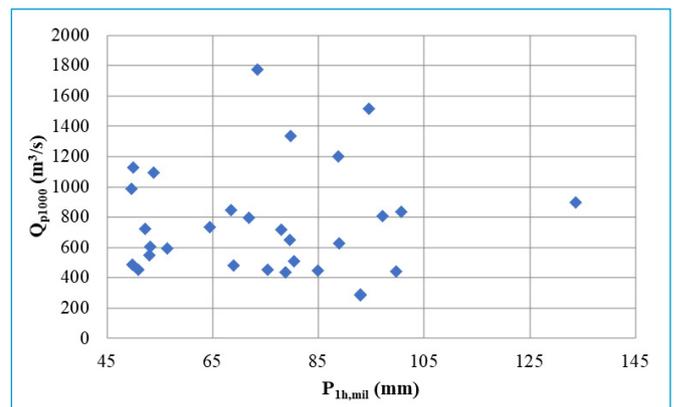


Figura 13 - Relação entre a precipitação milenar de uma hora de duração e a vazão máxima milenar.

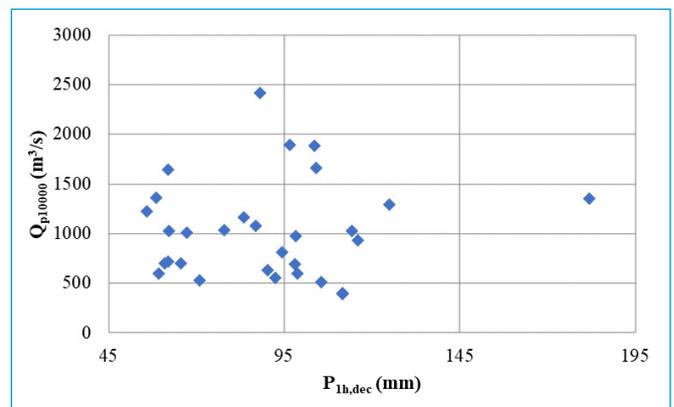


Figura 14 - Relação entre a precipitação decamilenar de uma hora de duração e a vazão máxima decamilenar.

utilizaram a área da bacia como um dos principais parâmetros de regionalização da vazão (CHAVES *et al.*, 2017; TEIXEIRA *et al.*, 2013; ZAMAN *et al.*, 2011; SARHADI *et al.*, 2011; ANDRADE *et al.*, 2004). Além disso, McIntyre *et al.* (2007) também consideraram o efeito das precipitações sobre as vazões de pico para uma bacia hidrográfica da região árida de Omã. Tais estudos indicam que as variáveis escolhidas para analisar o comportamento das vazões máximas são bastante empregadas em estudos similares, resultando, assim, em uma metodologia embasada por diversos pesquisadores em diferentes partes do mundo, especialmente em regiões áridas e semiáridas.

Obtenção e análise das equações regionalizadas

A Tabela 5 apresenta as equações das vazões adimensionalizadas para os tempos de retorno (Tr) de 1.000 e 10.000 anos, bem como os resultados das verificações de cada equação, cujos valores atenderam aos requisitos necessários. Destaca-se que o Fr tem duas versões: a que utiliza a precipitação de duração de 1 hora, com tempo de retorno de 1.000 anos (Fr_{mil}), e a que utiliza a precipitação de duração de 1 hora, mas com tempo de retorno de 10.000 anos (Fr_{dec}). Como pode ser observado na Tabela 2, as precipitações para 10.000 anos são maiores do que as de 1.000 anos.

Portanto, a regionalização resultou em uma função que relaciona a S_o, o Fr e o λ. Nota-se que todos esses parâmetros (S_o, Fr e λ) apresentam relação inversamente proporcional com a vazão. Destaca-se também que os coeficientes apresentados nas duas equações são semelhantes, porém, devido ao uso de diferentes precipitações, houve pequena diferença entre os coeficientes.

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 comportamento inversamente proporcional entre a declividade e a vazão, visto que a perda de carga pode ter efeito maior sobre o escoamento.

Outra forma de apresentar as equações da Tabela 5 é por meio das variáveis não adimensionais (A, L, Tc, H e P_{1h}). As Equações 13 e 14 mostram as vazões máximas em função das variáveis dimensionais para Tr = 1.000 anos e Tr = 10.000 anos e suas respectivas simplificações. Destaca-se que as equações apresentadas estão dimensionalmente consistentes, ou seja, a resultante da combinação dessas variáveis está com dimensão de vazão (m³/s). Além disso, é possível simplificar os expoentes de cada variável e, devido ao baixo valor do expoente apresentado, excluir a variável "A".

$$Q_{p1000} = 6,73 \cdot \frac{L^{3,08} \cdot P_{1h,mil}^{1,065}}{H^{0,58} \cdot Tc^{2,11} \cdot A^{0,005}} \text{ ou } Q_{p1000} = 1,98 \cdot \frac{L^3 \cdot P_{1h,mil}}{H^{0,5} \cdot Tc^2} \quad (13)$$

$$Q_{p10000} = 5,44 \cdot \frac{L^{3,08} \cdot P_{1h,dec}^{1,035} \cdot A^{0,015}}{H^{0,58} \cdot Tc^{2,13}} \text{ ou } Q_{p10000} = 2,25 \cdot \frac{L^3 \cdot P_{1h,dec}}{H^{0,5} \cdot Tc^2} \quad (14)$$

Tabela 5 - Sumário das equações adimensionais e seus respectivos valores de verificação.

Equação	Tr (anos)	r ²	F total	S _e (10 ⁻⁴)	S _v (10 ⁻⁴)
$\pi = 23,91 \cdot S_o^{-2,58} \cdot Fr^{2,13} \cdot \lambda^{2,12}$	1000	0,95	552,34	1,4	11,88
$\pi = 19,78 \cdot S_o^{-2,58} \cdot Fr^{2,07} \cdot \lambda^{2,10}$	10000	0,95	724,78	1,4	13,63

Por meio dessas duas equações é possível inferir que o tempo de concentração, o comprimento do rio principal e a precipitação são as variáveis de maior peso na determinação das vazões máximas, enquanto a diferença de cota e a área da bacia têm o menor impacto. Portanto, nota-se que as vazões são diretamente proporcionais ao comprimento do rio principal e à precipitação, enquanto o tempo de concentração e a diferença de cota são inversamente proporcionais às vazões. Entretanto, a área da bacia tem comportamento diferente nos dois casos, já que para a vazão milenar ela tem relação inversamente proporcional, enquanto para a vazão decamilenar essa relação é diretamente proporcional.

As Figuras 15 e 16 mostram a relação entre as vazões máximas adimensional observada e calculada, a linha de tendência e o valor do r². Ambos os eixos dos gráficos estão na escala logarítmica de base 10.

Analisando-se os resultados, verificou-se que a inclusão da variável ff e CN não traz ganhos significativos ao modelo de estimativa das vazões máximas. Essa análise foi feita por meio do r², mostrando que, ao adicionar mais variáveis, a equação resultava em pequenos aumentos de r². Portanto, somente

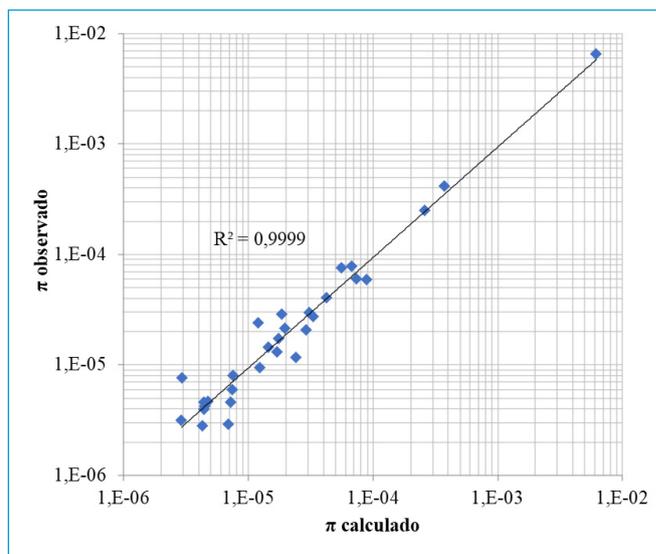


Figura 15 - Calibração das equações adimensionais para Tr = 1.000 anos.

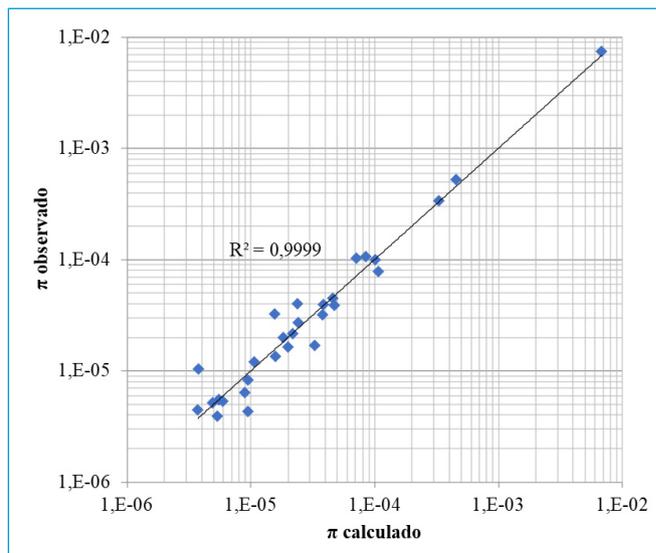


Figura 16 - Calibração das equações adimensionais para Tr = 10.000 anos.

as variáveis S_p , Fr e λ são suficientes para tentar descrever o comportamento das vazões máximas.

As Tabelas 6 e 7 apresentam os valores do r^2 e do desvio médio para cada retirada de barragem. Observa-se que a retirada de determinadas barragens possibilita uma certa melhoria no r^2 e no desvio médio. A barragem Figueiredo destaca-se pela elevada área, pelo comprimento de rio e pelo tempo de concentração, assim, pode criar tendências ou diminuir a precisão da regionalização. Já a barragem Jucá tem a maior vazão milenar e decamilenar, o que poderia provocar tendências nas equações. Notou-se também que as barragens Missi e Riacho da Serra apresentaram os maiores desvios médios dentre todos os açudes analisados. As retiradas dessas barragens proporcionam grande melhoria no desvio médio, como pode ser observado nas Tabelas 6 e 7. A barragem Missi está inserida na Bacia do Litoral, e a Riacho da Serra, na bacia do Médio Jaguaribe, ambas caracterizadas por apresentarem alto nível de açudagem (CEARÁ, 2009a; CEARÁ, 2009b). Portanto, essa característica pode influenciar o comportamento das vazões e interferir nos resultados da regionalização.

Comparação com outras equações

A Tabela 8 apresenta os dados necessários para calcular os valores das vazões máximas para os diferentes estudos analisados. A maioria desses dados foi obtida por meio dos projetos executivos dessas barragens. Destaca-se que o estudo feito

por Teixeira *et al.* (2013) utiliza como variável explicativa a porcentagem da área da bacia que está sobre o solo cristalino ($\%_{\text{Cristalino}}$). As informações sobre essa variável foram obtidas do trabalho feito por Teixeira *et al.* (2013), porém, para a barragem Sítios Novos, utilizou-se a média de todos os postos estudados por Teixeira *et al.* (2013). Além disso, utilizaram-se as vazões máximas observadas (Q_{obs}) em postos fluviométricos próximos às barragens. Essas informações foram obtidas por intermédio da Agência Nacional de Águas (ANA). Outra fórmula utilizada foi o método clássico de Creager, o qual calcula a vazão máxima em função da área da bacia e do coeficiente de Creager (C), cujos valores variam entre 30 e 100 para a maioria dos escoamentos (LIMA *et al.*, 2017). Neste trabalho, optou-se por utilizar o coeficiente C igual a 30, para vazão milenar, e a 100, para a vazão decamilenar. As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados gráficos para o tempo de retorno de 1.000 e 10.000 anos, respectivamente, da aplicação das diferentes equações propostas por cinco métodos diferentes e os valores das vazões registradas nos postos fluviométricos.

Tabela 6 - Avaliação da equação adimensional " π " em função da retirada de barragens para $Tr = 1.000$ anos.

Nº de barragens	r^2	Desvio médio	Barragens retiradas
30	0,95	0,283	-
29	0,97	0,271	Figueiredo
28	0,97	0,263	Figueiredo e Jucá
27	0,98	0,221	Figueiredo, Jucá e Riacho da Serra
26	0,99	0,188	Figueiredo, Jucá, Riacho da Serra e Missi

Tabela 7 - Avaliação da equação adimensional " π " em função da retirada de barragens para $Tr = 10.000$ anos.

Nº de barragens	r^2	Desvio médio	Barragens retiradas
30	0,95	0,245	-
29	0,97	0,232	Figueiredo
28	0,98	0,222	Figueiredo e Jucá
27	0,98	0,185	Figueiredo, Jucá e Riacho da Serra
26	0,99	0,156	Figueiredo, Jucá, Riacho da Serra e Missi

Tabela 8 - Parâmetros utilizados na comparação das vazões máximas para os diferentes métodos analisados.

Barragem	Posto (ANA)	Q_{obs} (m ³ /s)	$\%_{\text{Cristalino}}$	A (km ²)	L (km)	T_c (s)	H (m)	$P_{1h,\text{mil}}$ (mm)	$P_{1h,\text{dec}}$ (mm)
Figueiredo	36386000	1223,78	0,89	1621	88,3	129600	346,02	68,50	83,50
Gangorra	35170000	1023,30	0,77	104,7	18	21420	50	78,90	92,50
Germinal	35740000	216,37	1,00	94	23	10800	621	78,00	98,40
Sítios Novos	35650000	272	0,76	446	52	28476	552	109,29	153,67

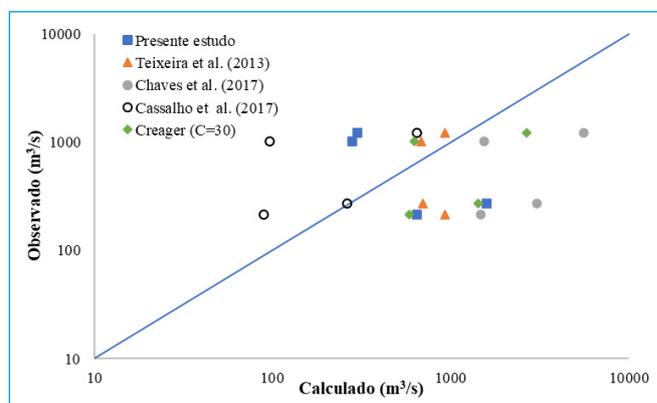


Figura 17 - Comparação das vazões máximas entre os diferentes métodos de cálculo para $Tr = 1.000$ anos.

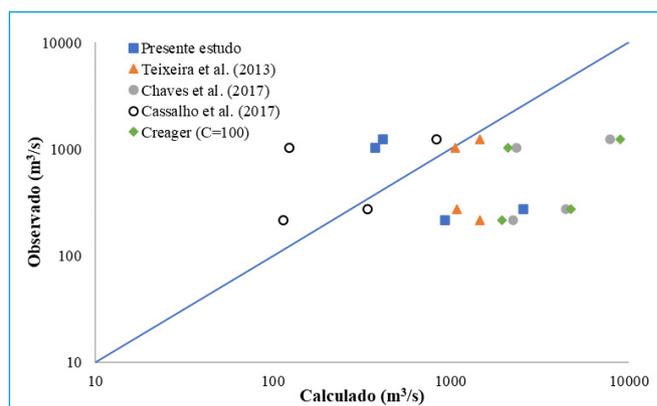


Figura 18 - Comparação das vazões máximas entre os diferentes métodos de cálculo para $Tr = 10.000$ anos.

Por meio das Figuras 17 e 18 é possível notar que as vazões máximas encontradas por Chaves *et al.* (2017) e pelo método de Creager têm os valores mais elevados calculados. Isso pode indicar superdimensionamento das estruturas de segurança. Já para a equação proposta por Cassalho *et al.* (2017) os valores são os mais baixos dentre os estudos. Porém, destaca-se que os autores recomendam utilizá-la para um tempo de retorno máximo de 100 anos, indicando, assim, subdimensionamento. As vazões máximas de Teixeira *et al.* (2013) e deste estudo apresentaram resultados parecidos para as quatro barragens. Entretanto, seria necessário maior número de barragens para comparar a precisão desses dois métodos. Todavia, Teixeira *et al.* (2013) destacaram o baixo desempenho e o alto erro médio quadrado de suas equações. Por outro lado, no presente estudo, em apenas duas barragens o valor calculado ficou abaixo das vazões observadas nesses postos. Especialmente para a barragem Figueiredo, cabe destacar seus altos valores tanto de vazões como de áreas, o que pode justificar o subdimensionamento observado.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho propõe uma abordagem empírica para a determinação de vazões máximas em regiões semiáridas do estado do Ceará baseada nas características fisiográficas e hidrológicas da bacia hidrográfica. O estudo avaliou qual equação melhor descreveria o comportamento das vazões máximas, calculadas por meio do *software* HEC-HMS, em função de área, comprimento do rio principal, tempo de concentração, diferença de cota e precipitação com uma hora de duração para tempos de retorno comuns em obras de barragens. As equações encontradas apresentaram bons resultados, com os parâmetros registrando os seguintes valores das verificações: r^2 de 0,95 para ambos os tempos de retorno; desvios médios de 0,28 ($Tr = 1.000$ anos) e 0,24 ($Tr = 10.000$ anos); valores para F total de 552,34 ($Tr = 1.000$ anos) e de 724,78 ($Tr = 10.000$ anos); erro padrão das equações encontradas de $1,4 \cdot 10^{-4}$ para ambos os tempos de retorno; desvios padrão amostrais de $11,88 \cdot 10^{-4}$ ($Tr = 1.000$ anos) e $13,63 \cdot 10^{-4}$ ($Tr = 10.000$ anos).

As equações desenvolvidas apresentam bom desempenho quando se observam os números do r^2 , cujos valores são de 0,9534 ($Tr = 1.000$) e 0,9549 ($Tr = 10.000$), utilizando-se todas as barragens. Ao se retirar poucos dados esses valores chegam a 0,99. Além disso, as equações propostas foram validadas pelos

testes estatísticos, representando, assim, uma boa ferramenta preliminar para projetos hidráulicos semelhantes.

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

- I. Utilização de dados reais de projeto e vazões simuladas no HEC-HMS. 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 os erros de leitura.
- II. Inclusão de várias características da bacia no cálculo das vazões máximas. Nesse 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 por meio de Sistema de Informação Geográfico (SIG), com exceção apenas da precipitação e do tempo de concentração, o qual pode ser calculado por várias equações empíricas disponíveis na literatura.
- III. Aplicação de equação adimensional para um número significativo de amostras. Todos os estudos citados não apresentaram equação no formato adimensional para analisar a vazão máxima. Esse tipo de formato permite melhor percepção do pesquisador sobre os parâmetros analisados, diminuir o número de variáveis do problema e possibilita a extrapolação de valores.

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.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Rocha, J.S.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia, Escrita – Primeira Redação. Lima Neto, I.E.: Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação

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. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p93-102>

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. <https://doi.org/10.1002/2013WR014898>.

BHUNYA, P.K.; PANDA, S.N.; GOEL, M.K. Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. *The Open Hydrology Journal*, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2011. <https://doi.org/10.2174/18-74378101105010001>

BLANCO, C.J.C.; SECRETAN, Y.; FAVRE, A.C.; SLIVITZKY, M. Modèle pluie-débit pour la simulation de courbes de débits classés sur des petits bassins non jaugés de l'Amazonie. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 32, n. 5, p. 803-811, 2005. <https://doi.org/10.1139/I05-037>

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.; 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*, v. 88, n. 2, p. 1113-1125, 2016. <http://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*, v. 146, n. 5, p. 06020001, 2020.
- CASSALHO, F.; BESKOW, S.; VARGAS, M. M.; MOURA, M. M.; ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. Hydrological regionalization of maximum stream flows using an approach based on L-moments. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 27, 2017. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.021720160064>
- 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, 2009a.
- CEARÁ. ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO CEARÁ. Instituto de estudos e pesquisas para desenvolvimento do estado do Ceará. *Caderno Regional da Sub-Bacia do Médio Jaguaribe*. 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*, v. 22, n. 29, 2017. <http://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://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*, v. 21, n. 3, p. 556-569, 2016. <http://doi.org/10.1590/2-318-0331.011616009>
- HAAN, C. T. *Statistical Methods in Hydrology*. Ames: The Iowa State University Press, 1977.
- 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*, v. 56, n. 2, 2011. <http://doi.org/10.1080/02626667.2011.553616>
- LIMA, G.; MARCELLINI, S.S.; NEIL, C.R.; SALLA, M.R. Preliminary estimate of floods discharge in Brazil using Creager envelope curves. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 46, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716078>
- 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>
- MCINTYRE, N.; AL-QURASH, A.; WHEATER, H. Regression analysis of rainfall-runoff data from an arid catchment in Oman. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 6, p. 1103-1118, 2007. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1103>
- 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. <https://doi.org/10.1029/2007WR006240>
- 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, p. 61-79, 2018.
- SARHADI, A.; MODARRES, R. Flood seasonality-based regionalization methods: a data-based comparison. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 23, p. 3613-3624, 2011. <http://doi.org/10.1002/hyp.8088>
- Soil Conservation Service (SCS). *A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds*. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1973.
- SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ (SRH). *Atlas Dos Recursos Hídricos Do Ceará*. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em: 08 jan. 2020.
- 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*, v. 22, n. 39, 2017. <http://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. Anais... Bento Gonçalves: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. p. 1-8.
- TOLEDO, C.E. *Conectividade hidrológica em ambiente semiárido: estudo de caso Bacia Hidrográfica do Açude Orós*. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2013.
- 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://doi.org/10.21800/2317666-02016000300011>
- ZAMAN, M.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood modelling in arid and semi-arid regions in Australia. In: *19th International Congress on Modelling and Simulation*, 19, 2011. Perth: University of Western Sydney, 2011. p. 12-16.