

## XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### ESTUDO DA VAZÃO REGULARIZADA NA METODOLOGIA 2VA DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

*Tácio Ribeiro Braga<sup>1</sup> ; Ticiano Marinho de Carvalho Studart<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Neste artigo se estudou um paradigma existente entre os hidrólogos de reservatórios do Nordeste Brasileiro que consiste em dimensionar os reservatórios usando com a capacidade sendo o dobro do volume afluente anual. Para mensurar o impacto que tal consideração teria sobre a vazão regularizada dos reservatórios dimensionados com esse paradigma, foram escolhidos 43 rios com a série temporal de vazão conhecida dispersos pelos diversos estados da região, que possui uma ampla amostragem de coeficiente de variação e evaporação líquida. Quando submetidos a Simulações de Monte Carlo, constatou-se que o coeficiente de vazão regularizada variava entre zero e um, sobretudo devido ao valor do coeficiente de variação dos rios. Tal conclusão refuta o paradigma, uma vez que se um parâmetro que pode fornecer valores de vazão regularizada variando entre o seu valor máximo e mínimo, não se pode utilizar esse paradigma sem antes considerar outras relações entre capacidade e volume afluente. Adicionalmente, descobriu-se que em rios do Nordeste submetidos a esse paradigma e com evaporações líquidas menores que 0,7m/ano a vazão regularizada não sofre grande influência da topografia e da evaporação líquida e tendem a apresentar altíssimos valores.

**ABSTRACT**– This article approaches an existing paradigm among the hydrologists of the Northeast of Brazil, which consists in designing the reservoirs using a capacity that is twice the annual volume. To measure the impact of such consideration on the yield of the reservoirs sized with this paradigm, 43 rivers with a time series data were selected from several states of the region, which is a sample of coefficient of variation and liquid evaporation data. When submitted to Monte Carlo simulations, it is possible that the yield coefficient varies between zero and one, mainly due to the value of the coefficient of variation of the rivers. Such completion refutes the paradigm once it is can provide yield varying between its maximum and minimum values, and is not able to use this paradigm without other studies involving capacity and affluent volume. Additionally, the Northeast rivers have when simulated with this paradigm and with liquid evaporation of less than 0.7 meters / year at a yield that do not suffer a great influence from the topography and evaporation of the chain and tend to present very high values.

**Palavras-Chave** – Simulações de Monte Carlo; Reservatórios, Vazão Regularizada

#### **INTRODUÇÃO OK!**

Diversos estudos de Relações SRY (capacidade-garantia-regularização) em reservatórios utilizam como um de seus parâmetros adimensionais um coeficiente que consiste em relacionar ao volume total de armazenamento de um reservatório e o volume afluente médio anual, Campos (2005) utiliza um denominado  $f_K$ , McMahon *et al.* (2007) utiliza a notação  $S/\mu$ , Silva e Portela (2013)

1) Mestrando em Eng. Civil – Recursos Hídricos (UFC) – [eng\\_civil\\_tacio@hotmail.com](mailto:eng_civil_tacio@hotmail.com)

2) Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 713, e-mail: [ticiano@ufc.br](mailto:ticiano@ufc.br)

chamam de  $C/\bar{Q}$  e Alrayess *et al.* (2017) usa a sigla  $\tau$ . Em essência, todas essas notações representam matematicamente o mesmo critério, apresentado na equação de Campos (2005):

$$f_K = \frac{K}{\mu} \quad (1)$$

Onde:  $f_K$  é o fator adimensional de capacidade,  $K$  é a capacidade do reservatório e  $\mu$  é volume afluente médio anual.

O uso desse critério possui utilidade tanto prática, quanto para estudos teóricos. Em termos práticos, expressa o período de tempo médio que uma parcela de água permanece no reservatório e portanto se correlaciona com a propensão a eutrofização do lago (COLLISCHONN e DORNELLES, 2015). Em termos teóricos, é útil por padronizar a capacidade com respeito ao desvio padrão das vazões afluentes (MCMAHON *et al.*, 2007).

Quando descrevem um método de dimensionamento de reservatórios em rios do Nordeste Brasileiro Vieira e Gouveia Neto (1983), primeiramente apresentam um método chuva-deflúvio que converte, a partir de parâmetros topográficos, a precipitação média anual em volume afluente médio anual da bacia. Após obtido esse volume, a capacidade de um reservatório construído naquele exutório é descrito como sendo numericamente o dobro do volume afluente médio anual. Em outras palavras, esse método recomenda que os reservatórios do Nordeste sejam dimensionados considerando o  $f_K = 2,0$ .

Tal consideração reflete um paradigma que muito tempo vigorou entre os projetistas da região que ficou conhecido como “Parâmetro 2Va” (referências à duas vezes o volume afluente). As origens dessa prática ainda não foram determinadas. Campos (2005) acredita que venha da observação de algumas barragens como Hoover nos Estados Unidos e algumas barragens dimensionada pelo famoso Engenheiro Francisco Gonçalves Aguiar, ao qual as razões entre a capacidade do reservatório e o volume afluente médio anual era aproximadamente dois. Sobre este costume, o autor também comenta “não se pode dizer que os resultados da aplicação dessa prática tenham sido danosos ao Nordeste”.

O objetivo deste é estudar esse paradigma, caracterizando o comportamento de diversos rios nordestinos sendo dimensionados submetidos a este paradigma e eventualmente refutando essa prática.

## **REVISÃO OK!**

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

A utilização de séries sintéticas de vazão em simulações de reservatório tem grande utilidade pois desconsidera a influência do volume inicial do reservatório no cálculo da vazão regularizada, além de aumentar a amostragem para o cálculo da garantia de reservatórios (PATSKOSKI e SANKARASUBRAMANIAN, 2015). Para gerar séries históricas em rios do Nordeste Brasileiro, em escala anual Studart (2002) recomenda a distribuição Gama II e a nível mensal Araújo (1991) recomenda o Método dos Fragmentos proposto por Svanidze (1980).

Para Campos e Studart (2009) a utilização de séries com 5.000 anos de dados não implica em grandes esforços computacionais e vazão regularizada neste pode ser descrita em função das características hidroclimáticas (volume afluente médio, coeficiente de variação e evapotranspiração líquida sobre o lago) e das características morfológicas do reservatório (capacidade e as relações cota-área-volume).

Para representar a perda (ou ganho) de água do reservatório para a atmosfera é muito utilizado o conceito de evaporação líquida ( $E_L$ ), que é definida como o resultado da evaporação menos a precipitação (CAMPOS e STUDART, 2009). Tucci (2002) desconsidera a evaporação em suas simulações de reservatórios, assim como Silva e Portela (2013) em rios Portugueses e Marton e Kapelan (2014) em rios da República Tcheca. Entretanto, em rios como os nordestinos, as taxas de evaporação são grandes e não devem ser negligenciadas (CAMPOS, 2005).

A relação topográfica cota-volume de reservatórios do Nordeste Brasileiro pode ser caracterizado por um fator de forma do reservatório proposto por Campos *et al.* (2016), que considerou a forma do reservatório como sendo um cone, como visto na Equação 2, sem que isso provoque diferenças significativas na determinação da vazão regularizada.

$$\alpha = \frac{K}{h^3} \quad (2)$$

Onde:  $\alpha$  é o fator de forma de reservatório, K é a capacidade do reservatório e h é altura do reservatório.

## **METODOLOGIA OK!**

Para avaliar o desempenho desse parâmetro, foram selecionados 43 postos fluviométricos distribuídos na região Nordeste obtidos do Hidroweb, banco de dados eletrônicos de acesso público da ANA (Agência Nacional de Águas). A partir de cada uma dessas séries históricas, foram geradas séries sintéticas de 5.000 anos em nível anual pela distribuição Gama II e a nível mensal pelo Método dos Fragmentos. Os valores médios mensais de evaporação e precipitação de cada posto fluviométrico foram determinados pela Normal Climatológica (INMET, 2010) mais próxima e, a partir desses valores, foram calculados os valores de  $E_L$  atuante. As características hidroclimáticas das estações fluviométricas escolhidas estão apresentadas na Tabela 1.

No que se refere aos dados topográficos necessários, como não se dispõe dos levantamentos de cada bacia, optou-se por utilizar o  $\alpha$  para gerar curvas cota-volume de cada reservatório. Toda

simulação em um determinado posto sempre será feita adotando-se quatro valores de  $\alpha$ : 5.000, 20.000, 40.000 e 75.000. A capacidade dos reservatórios foi considerada o dobro do volume afluente anual ( $f_K = 2,0$ )

Tabela 1 – Informações hidroclimáticas das estações fluviométricas selecionadas

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

Foi realizado um estudo de SRY aplicado nas séries sintéticas de vazão utilizando Simulações de Monte Carlo aplicados a Equação do Balanço Hídrico. As simulações, portanto, ocorreram no Estado de Equilíbrio e considerando a natureza estocástica do reservatório. Todas as vazões

regularizadas foram simuladas para uma modulação de retiradas igual ao longo do ano, volume de reserva sendo 5% do volume total e garantia 90%. Caso seja necessário a conversão de uma vazão regularizada com determinada garantia conhecida para uma determinada outra garantia, pode-se usar a equação proposta por Barcelos *et al.* (2006), que descreve uma relação entre vazões regularizadas com diferentes garantias. O parâmetro de análise de desempenho das simulações foi considerado como sendo o fator adimensional de retirada, proposto por Campos (2005).

$$f_M = \frac{M}{\mu} \quad (3)$$

onde:  $f_M$  é o fator adimensional de retirada,  $M$  é o volume regularizado e  $\mu$  é volume afluente médio anual.

## RESULTADOS OK!

A Tabela 2 apresenta os resultados das simulações para as quatro topografias escolhidas.

Analisando-se, revela que a adoção desse critério pode levar a valores bem discrepantes de  $f_M$ . Observa-se na tabela valores de  $f_M$  que correspondem ao máximo possível (que é o valor unitário) nos postos Barra do Corda e Santa Vitória e valores de  $f_M$  que correspondem ao mínimo possível (que é o valor nulo) no posto Malhada. Essa análise já é suficiente para refutar o “Paradigma 2Va”, uma vez que ele de forma alguma constitui um parâmetro confiável para dimensionamento, pois a variação de seus resultados é igual aos limites possíveis de valores de  $f_M$ . Portanto, adotar esse valor de fator adimensional de capacidade é incorrer em uma grande chance de não se otimizar a eficiência de regularização do reservatório. Como os casos analisados no Nordeste apresentaram grande diversidade de parâmetros ( $\mu$ , CV,  $E_L$ ), vários valores de  $f_M$  devem ser testados para determinar o valor ideal para obter o  $f_M$  necessário.

Quando analisado o coeficiente de variação (CV) pode-se observar um grande correlação com  $f_M$ , que denota uma proporcionalidade inversa entre essas duas variáveis. Existe uma clara influência da  $E_L$  que impede que essa proporcionalidade seja perfeita, como pode ser visto nos postos Fazenda Coqueiro e Pedreiras II que possuem o CV semelhante, mas devido a  $E_L$  diferente, geram valores bem diversos de  $f_M$ . Pela tabela, concluímos que, quando o valor de  $CV \leq 0,83$  e o valor da  $E_L$  não ultrapassa 0,76 m/ano, temos um indicativo de excelentes taxas de regularização (cores esverdeadas). Mesmo quando a  $E_L$  é mais alta, como no caso da Fazenda Coqueiro e da Barra do Lance, pode acontecer um médio desempenho em bacias mais planas (cores amareladas). Quando os valores ultrapassam  $CV=1,0$  e  $E_L = 1,70$ m/ano, os valores já começam a serem considerados baixos em bacias mais planificadas. Como valores de  $CV>1,0$  e  $E_L=1,70$ m/ano são característicos do Semiárido Nordeste fica evidente a importância de escolhas bacias mais íngremes para a implantação dos reservatórios e justifica também a inexistência de grandes reservatórios nos litorais, onde os  $\alpha$  tende

a ser maiores. Além disso, para esses valores característicos do Semiárido Nordestino, o paradigma  $f_K = 2,0$  não consegue obter valores de  $f_M$  superiores a 0,6.

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

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

Quando se analise exclusivamente a  $E_L$ , nota-se que a (já esperada) diminuição do  $f_M$  conforme se aumenta o  $\alpha$  é mais acentuada quando os valores de  $E_L \geq 0,7$  m/ano. Abaixo deste limite, a influência do valor de  $\alpha$  parece ser desprezível, pois o valor de  $f_M$  mantém-se praticamente constante para um mesmo posto. Essa conclusão vai de encontro com a consideração de metodologia de países

mais frios e de rios perenes, como o Diagrama de Rippl, que ignoram a topografia da bacia e as taxas evaporativas da região. O posto 36045000 – Malhada, apesar de ter um dos maiores valores de CV e  $E_L$  possui diferença de vazões regularizadas por  $\alpha$  pequenos, pois sua taxa de regularização já era baixíssima e tornou-se nula com o  $\alpha$ . Fazendo uma análise de correlação entre os  $\alpha$  de cada posto e seus  $f_M$ , observa-se que há uma forte correlação logarítmica (Equação 4), cujo os coeficientes “m” e “c” de cada posto e sua respectiva  $R^2$

$$f_M = m \cdot \ln(\alpha) + c \quad (4)$$

Onde “m” e “c” são parâmetros correspondentes a própria estação e podem ser encontradas na Tabela 3, que também informa o coeficiente de correlação  $R^2$  para a equação logarítmica acima.

Tabela 3 - Coeficientes "m" e "c" das bacias estudadas para um  $fk=2,0$

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

Conforme se observa na tabela acima, os valores  $R^2$  são praticamente todos maiores que 0,95, indicando que a equação é um bom parâmetro para representar o comportamento das bacias em função de seu  $\alpha$ . Os demais rios ficaram próximos ou maior que 0,7 no valor de  $R^2$ , que indica a existência de correlação, ainda que menor.

Como os valores analisados neste trabalho consideram a capacidade do reservatório como sendo o dobro do volume afluente anual, não é correto afirmar que os reservatórios que não excedem esses limites de CV e El foram prejudicados por usar esse parâmetro, uma vez que apresentaram alto  $f_M$ . Entretanto, tais valores não se encontram na região mais sensível do Nordeste, que é o Semiárido.

De fato, além do valor de  $fk=2,0$  gerar valores baixos de  $f_M$  ainda são extremamente dependentes de uma determinação correta dos valores de  $E_L$  e da caracterização topográfica da bacia.

Tal conclusão pode ser matematicamente demonstrada quando se analisa o coeficiente “m” das equações características da topografia de cada posto. Esse coeficiente, que é sempre negativo, é o responsável na fórmula pela diminuição do  $f_M$ . A Figura 2, apresenta o gráfico da relação entre esse coeficiente e a  $E_L$  do seu respectivo posto, pode ser observado o brusco aumento do coeficiente “m” ocorre quando a evaporação passa de 0,7m/ano.

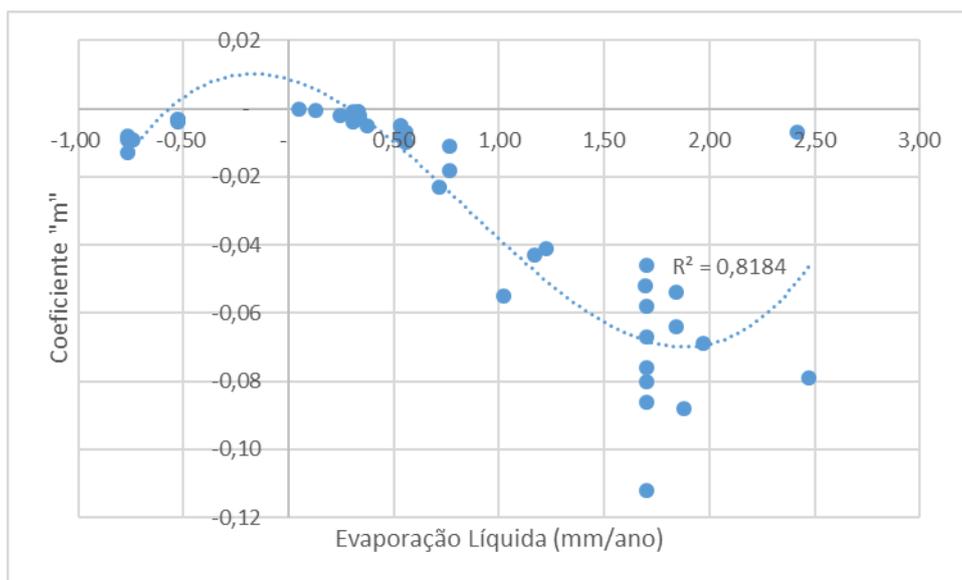


Figura 1 - Correlação entre o coeficiente "m" e a  $E_L$  para os postos estudados

Como discutido anteriormente o CV parece ter mais influência na regularização quando a  $E_L < 0,7m/ano$ , podendo esse ser considerado o limite pelo qual os fatores topográficos começam a ter influência. Quando analisados os postos que possuem esses valores de  $E_L$  e descartados os demais, percebe-se que a correlação é de fato muito alta e segue um padrão linear, como pode ser depreendido da Figura 3 abaixo, que mostra os valores referente a  $\alpha=5.000$ .

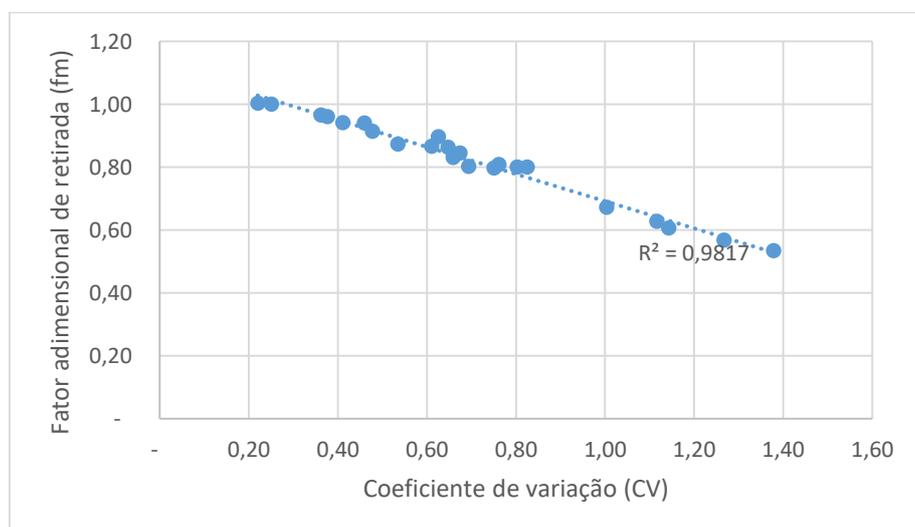


Figura 2 - Correlação entre o CV e o coeficiente regularizado para  $\alpha=5.000$ ,  $E_L < 0,7m/ano$ ;  $fk=2,0$

A Tabela 4 abaixo mostra os demais valores de  $R^2$  para os  $\alpha$  analisados. Também é exibido os valores da regressão linear.

$$(f_M = a \cdot CV + b) \quad (5)$$

Tabela 4 - Regressão linear para  $E_L < 700$  m/ano

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

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

$$f_M = (-0,43 \cdot CV) + 1,12 \quad (6)$$

Como visto pela Tabela que contém os resultados das simulações, não é possível estabelecer uma relação linear para as simulações que consideraram  $E_L > 0,7$  m/ano, uma vez que os valores de  $\alpha$  e  $E_L$  irão ter impacto maior no dimensionamento.

## CONCLUSÃO

Utilizar o parâmetro  $f_K=2,0$  em dimensionamento de reservatórios no Nordeste Brasileiro pode gerar valores de  $f_M$  que variam entre todos os resultados possíveis deste parâmetro (0,0 a 1,0), sendo dependentes de fatores como  $\alpha$ ,  $E_L$  e  $CV$  para se determinar exatamente o valor de  $f_M$ . Portanto a conjuntura desses fatores hidroclimáticos e morfológicos devem ser considerados para determinar um  $f_K$  que corresponda a um  $f_M$  que supra as necessidades de volumes regularizados, principalmente em rios que apresentem  $E_L > 0,7$  m/ano e  $CV > 1,0$  (Regiões Semiáridas Nordestinas).

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

## REFERÊNCIAS

ALRAYESS, H; ZEYBRKOGLU, U; ULKE, A. (2017). “Different design techniques in determining reservoir capacity”. European Water 60, pp. 107-115.

- ARAÚJO, J. K. (1991). *“Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios”*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE.
- BARCELOS, D, G; STUDART, T. M.C; CAMPOS, J, N, B; NASCIMENTO, L. S. V. (2006). *“Relações matemáticas entre vazões regularizadas com diferentes garantias”*, In *Hidrologia de Reservatórios: a construção de uma teoria* Org. por Campos, J. N. B. e Studart, T. M. C. ASTEF/, p. 285.
- CAMPOS, J. N. B. (2005). *“Dimensionamento de Reservatórios: o método do diagrama triangular”*. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza – CE, 112 p.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. (2009). *“Método Monte Carlo e Simres: laboratório computacional para análise de reservatórios”* In XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande – MS, Nov. 2009.
- CAMPOS, J. N. B; LIMA NETO, I. E; STUDART, T. M.C; NASCIMENTO, L. S.V. (2016). *“Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil”* In Anais da Academia Brasileira de Ciência, Rio de Janeiro, v. 88, n. 2, p. 1113-1125.
- COLLISCHONN, W; DORNELLES, F. (2015). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. 2ª ed. ABRH, ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, 342 p.
- KURIA, F; VOGEL, R. (2015). *“Uncertainty analysis for water supply reservoir yields”*. Journal of Hydrology, n. 529, pp. 57-264.
- MARTON, D; KAPELAN, Z. (2014). *“Risk and Realiability of Open Reservoir Water Shortages Using Optimization”*. Procedia Engineering, n.89, pp. 1478-1485.
- MCCMAHON, T. A; PEGRAM, G. G. S; VOGEL, R. M; PEEL, M. C. (2007). *“Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database”*. Advances in Water Resources, n. 30, 1858-1872.
- PATSKOSKI, J; SANKARASUBRAMANIAN, A. (2015). *“Improved reservoir sizing utilizing observed and reconstructed streamflows within a Bayesian combination framework”*. Water Resour. Res., n. 51, 567-5697.
- SILVA, A. T; PORTELA, M. M. (2013). *“Stochastic Assessment of Reservoir Storage-Yield Relationships in Portugal”*. Journal of Hydrologic Engineering, v. 18, n. 5, p. 568-575.
- STUDART, T. M. C. (2000). *“Análises de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-Áridos”*. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE.
- SVANIDZE, G.G. (1980). *Mathematical Modeling of Hydrologic Series*. Water Resources Publications, Fort Collins, 314 p.
- TUCCI, C. E. M. (2002). *Regionalização de vazões*. Ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, 256 p.
- VIEIRA, V. P. P. B.; GOUVEIA NETO, A. (1983). *Roteiro para projeto de pequenos açudes*. 2ª ed. DNOCS, Fortaleza – CE, 108 p.