

### USO DA EQUAÇÃO DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE CHUVAS PARA BACIA DO RIO COREAÚ (CEARÁ, BRASIL)

*Use intensity–duration–frequency equation of rainfall for Coreaú river basin (Ceará, Brasil)*

Francisco Rodrigo Cunha de Sousa<sup>1</sup>

Davis Pereira de Paula<sup>2</sup>

#### RESUMO:

Estudos sobre intensidade, duração e frequência (IDF) das chuvas são amplamente utilizados em obras de infraestrutura e na agropecuária e representam uma ferramenta com grande potencial de subsídio ao planejamento de uso dos recursos naturais pela sociedade, possibilitando a convivência com eventos catastróficos como secas ou enchentes diante de situações extremas como as chuvas intensas. Neste sentido, o objetivo deste trabalho consiste em conhecer a distribuição espacial e temporal das precipitações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Coreaú (Ceará-Brasil), por meio da calibração dos parâmetros da equação IDF de chuvas intensas na bacia em questão. Os dados pluviométricos foram organizados em séries históricas de chuvas acumuladas diárias máximas anuais, posteriormente foram utilizados recursos estatísticos como distribuições probabilísticas que permitiram analisar eventos de chuvas com diferentes durações, por meio da desagregação das chuvas diárias em chuvas de menor duração e utilização do complemento Solver do Excel obteve-se os parâmetros para a equação IDF da área de estudo. Os resultados demonstraram o comportamento de chuvas com altos valores de intensidade, principalmente na porção litorânea da bacia hidrográfica, nas áreas de maior elevação e em eventos com menor duração e permitiram a primeira formulação da equação IDF para a região noroeste do Ceará, com valores de validação das equações calibradas satisfatórios e semelhantes às relações IDF estimadas pela literatura.

**Palavras-chave:** Precipitação; Hidrologia; Drenagem; Curva IDF.

#### ABSTRACT:

Studies on rainfall intensity, duration and frequency (IDF) are widely used in infrastructure Works and agriculture, represent a tool with great potential for subsidizing the use of natural resources by society, which may facilitate the coexistence with catastrophic events as droughts or floods in the face of extreme situations as heavy rains. The objective of this work is to know the spatial and temporal distribution of rainfall in the Coreaú river basin (Ceará-Brazil), by means of the calibration of the parameters of the IDF equation of intense rains in the basin in question. The pluviometric data were organized in historical series of accumulated annual maximum rainfall, later statistical resources were used as probabilistic distributions that allowed to analyze events of rains with different durations, through the disaggregation of daily rainfall in rainfall of shorter duration and use of the complement Solver of Excel the parameters for the IDF equation of the study area were obtained. The results showed the behavior of rainfall with high intensity values, mainly in the coastal portion of the hydrographic basin, in the areas of higher elevation and in events with shorter duration, and allowed the first formulation of the IDF equation for the northwestern region of Ceará, with values of validation of the calibrated equations satisfactory and similar to the IDF relations estimated by the literature.

**Keywords:** Precipitation; Hydrology; Drainage; IDF Curve.

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Ceará. [rodrigofrcs@hotmail.com](mailto:rodrigofrcs@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Estadual do Ceará. [davis.paula@uece.br](mailto:davis.paula@uece.br)

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento hidrológico é de fundamental importância para a adequada gestão dos recursos hídricos de bacias hidrográficas, à medida que pode contribuir com o planejamento de obras hidráulicas, que por sua vez, estão associadas ao desenvolvimento territorial a partir da segurança hídrica. Esta questão se torna ainda mais relevante em áreas onde a água é naturalmente mais escassa, como na região semiárida brasileira, caracterizada pelas elevadas temperaturas e regime irregular de precipitações que ocorrem de maneira reduzida e concentradas ao longo de apenas quatro meses do ano (Azevedo et al., 1998).

As precipitações intensas, também denominadas de chuvas extremas, são caracterizadas como precipitações pluviométricas provenientes de uma mesma perturbação meteorológica com intensidades extremas (caracterizadas pelo grande volume precipitado em pequenos intervalos de tempo) e distribuição espacial e temporal críticas para determinada área.

Essas características das precipitações intensas provocam cheias nos sistemas naturais e artificiais de drenagem, com picos demasiadamente elevados de escoamento superficial e vazão, além de inundações, erosão e lixiviação dos solos e assoreamentos de corpos hídricos (Righetto, 1998), em especial no nordeste brasileiro onde são as principais responsáveis pelo escoamento superficial, resultando no abastecimento dos reservatórios hídricos e por consequência na disponibilidade hídrica para os diversos usos da sociedade local.

A intensidade máxima das precipitações para determinado local é definida pela relação duração e frequência das chuvas, demonstradas inicialmente por Chen (1983), que propôs a equação Intensidade, Duração e Frequência (IDF), resultante de parâmetros ajustados por meios empíricos para cada local. Essa relação tem sido definida por meio de regressão linear e regressão não linear (Zuffo et al., 1994; Cardoso et al., 1998; Legates e McCabe JR, 1999; Nhat et al., 2006; Cecílio, et al., 2009; Garcia, et al., 2011; Silva et al., 2013; Campos et al., 2014) baseadas em exaustivos trabalhos de tabulação e análise de dados pluviométricos.

Portanto, a caracterização das precipitações pluviométricas da bacia do rio Coreaú (Nordeste do estado Ceará) surge como conhecimentos de grande importância para a gestão ambiental dos recursos naturais locais, pois será possível subsidiar ações para evitar problemas como a erosão dos solos, inundações em áreas rurais e urbanas, prejuízos às atividades econômicas, danos aos recursos hídricos de drenagem e armazenamento, além da otimização dos projetos hidráulicos.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho consiste em conhecer a distribuição espacial e temporal das precipitações pluviométricas na bacia hidrográfica do rio Coreaú (Ceará-Brasil), por meio da calibração dos parâmetros da equação Intensidade, Duração e Frequência de chuvas intensas para os postos pluviométricos gerenciados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) no local.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento desta pesquisa foi baseada nos dados de chuvas acumuladas diárias, obtidos nos postos pluviométricos gerenciados pela Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), distribuídos ao longo das doze sub-bacias hidrográficas da bacia do rio Coreaú.

A bacia hidrográfica do rio Coreaú está localizada na porção Noroeste do estado do Ceará, a aproximadamente 250 Km da capital Fortaleza, tendo como acesso principal a BR-222 e a

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

CE-085. A bacia encontra-se inserida entre as latitudes  $2^{\circ}47'10,19''S$  e  $3^{\circ}56'37,23''S$  e longitudes  $40^{\circ}12'51,94''W$  e  $41^{\circ}19'25,81''W$  e ocupa uma área de aproximadamente 10.635 km<sup>2</sup>, com perímetro de 565 Km, ocupando aproximadamente 7% do território cearense (Figura 1).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Coreau.



Fonte: elaborada pelos autores.

Os critérios adotados para seleção dos postos pluviométricos foram os seguintes: (1) localização no interior de cada sub-bacia, (2) disponibilidade de dados, (3) série de registros históricos com maior período e (4) menor quantidade de lacunas de dados ausentes. Assim, foram selecionados 12 séries de dados (Tabela 1). Sendo que para as sub-bacias Corrente Laranja e Mourão utilizou-se 2 postos, devido realocação e desativação de postos pluviométricos ao longo do período de registros.

Tabela 1 - Postos pluviométricos considerados na pesquisa.

SUB-BACIA	CÓD.	LOCALIDADE	LONGITUDE	LATITUDE	INÍCIO	FIM	ANOS	STATUS
Coreau	41	Coreau	$41^{\circ} 20' 33,1'' W$	$4^{\circ} 26' 59,6'' S$	1976	2016	41	ATIVO
Corrente Laranja	633	Jatobá	$41^{\circ} 3' 44,5'' W$	$3^{\circ} 1' 39,6'' S$	2001	2015	15	INATIVO
	637	Samabaia	$41^{\circ} 2' 36,7'' W$	$4^{\circ} 48' 6,7'' S$	2001	2016	16	ATIVO
Forquilha	639	Tiaia de baixo	$41^{\circ} 25' 27,0'' W$	$4^{\circ} 59' 14,8'' S$	2001	2016	16	ATIVO
Itacolomi	152	Viçosa do C.	$42^{\circ} 54' 19,5'' W$	$4^{\circ} 25' 54,3'' S$	1974	2016	43	ATIVO
Jaguapari	85	Martinópole	$41^{\circ} 18' 0,9'' W$	$4^{\circ} 46' 55,7'' S$	1974	2016	43	ATIVO
Lago Seco	27	Camocim	$41^{\circ} 9' 17,9'' W$	$3^{\circ} 6' 0,1'' S$	1974	2016	43	ATIVO
Mourão	247	Jericoacoara	$41^{\circ} 32' 53,1'' W$	$3^{\circ} 5' 57,3'' S$	1990	2013	24	INATIVO
	670	Jericoacoara	$41^{\circ} 28' 49,9'' W$	$3^{\circ} 12' 24,8'' S$	2001	2016	16	ATIVO
Pesqueiro	149	Uruoca	$41^{\circ} 26' 22,8'' W$	$4^{\circ} 41' 4,4'' S$	1974	2016	43	ATIVO
Poeira	44	Cruz	$41^{\circ} 49' 8,2'' W$	$3^{\circ} 4' 10,1'' S$	1989	2016	28	ATIVO
Praia	24	Bela Cruz	$41^{\circ} 49' 52,9'' W$	$4^{\circ} 56' 31,2'' S$	1981	2016	36	ATIVO
Tapuio	244	Barroquinha	$42^{\circ} 52' 14,6'' W$	$4^{\circ} 58' 34,3'' S$	1990	2016	27	ATIVO
Timonha	40	Chaval	$42^{\circ} 45' 36,4'' W$	$4^{\circ} 57' 49,2'' S$	1979	2016	38	ATIVO

Fonte: elaborada pelos autores.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

De posse dos dados pluviométricos, inicialmente foi desenvolvida uma análise de consistência (validação básica), por meio da observação dos limites de valores de precipitação fisicamente possíveis e adequados às características climáticas da área da pesquisa.

Posteriormente, foi aplicada uma validação temporal aos dados, que tem por objetivo avaliar o comportamento histórico da precipitação, que segue determinados padrões, como a sazonalidade e a continuidade que, por sua vez, serviram de critérios para identificação de erros a partir da observação do comportamento dos dados em relação à estação (chuvosa ou seca). Na identificação de erros, o dado registrado para cada dia foi comparado com o dia anterior e posterior, e em seguida, com os dados dos dias equivalentes dos anos anteriores por meio do escore  $Z$  (equação 1).

$$z = |(X_d - \bar{x})/s| \quad (1)$$

Onde,  $z$  é o escore que avalia quantas vezes o valor analisado se afastou do desvio padrão,  $X_d$  equivale ao número de elementos,  $\bar{x}$  representa a média aritmética e  $s$  retrata o desvio padrão.

As situações que infringiram essas condições não foram necessariamente descartadas, pois fenômenos atípicos e quebras bruscas de valores extremos históricos podem ocorrer, mas foram considerados dados suspeitos de erros e foram criteriosamente analisados na próxima etapa de validação.

Por fim, desenvolveu-se uma validação espacial, por meio da qual, os dados (suspeitos a erros, identificados nas etapas de validação anteriores) foram comparados com dados de outros postos vizinhos por meio de técnicas estatísticas de regressão linear, conforme proposto na metodologia de Baba et al. (2014). Essa metodologia sugere a estimativa do valor da variável analisada (precipitação) pelo método do inverso do quadrado da distância (equação 2), ponderado com base nos erros médios quadráticos (equação 3), gerados em cada um dos postos próximos.

$$x_d = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{d_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (2)$$

Onde,  $x_d$  representa a precipitação estimada,  $n$  o número de postos vizinhos,  $x_i$  o valor registrado no  $i$ -ésimo posto vizinho e  $d_i$  a distância euclidiana em

relação ao  $i$ -ésimo posto vizinho, ou seja,  $d$  representa o valor de ponderação para obtenção de uma precipitação ausente, que pode ser substituído pelo Erro Médio Quadrático (RMSE<sub>*i*</sub> - equação 3).

$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{d=1}^n (x_d - x_i)^2}{n}} \quad (3)$$

De posse dos dados pluviométricos devidamente validados, desenvolveu-se o ajuste dos parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  da equação IDF (equação 4).

$$i = \frac{a \cdot (TR)^b}{(t+c)^d} \quad (4)$$

Inicialmente, foram identificadas as precipitações de intensidades máximas diárias registradas para cada ano e construídas séries anuais para cada posto pluviométrico, que serviram à aplicação da distribuição de Gumbel, também conhecida como distribuição de eventos extremos ou de Fisher-Tippett, que destaca-se pela grande aplicação no campo da hidrologia, pois permite desen-

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

volver estatísticas probabilísticas baseadas em um conjunto de dados extremos, a priori, aleatórios (no caso deste estudo, as precipitações máximas), pois assume que os valores da variável analisada (precipitação) são limitados apenas no sentido positivo (Villela e Mattos, 1975).

Assim, procedeu-se a aplicação da equação de distribuição probabilística de Gumbel com a finalidade de identificar as probabilidades de ocorrência de precipitações máximas para determinados tempos de retorno (equação 5). Ressalta-se que a distribuição de Gumbel é mais adequada a este estudo, pois eventos extremos de precipitação são geralmente os principais responsáveis pela geração do escoamento superficial no clima regional semiárido brasileiro.

$$P = 1 - e^{-e^{-b}} \quad (5)$$

Onde, P representa a probabilidade

e de um valor extremo da série, ser igual ou maior ao valor da variável e, por sua vez, podendo ser representada pela base dos logaritmos naturais (equação 6), enquanto b é a variável reduzida (dada pela equação 7).

$$\log(x) = (\overline{\log(x)} + S_{\log(x)}) \cdot k \quad (6)$$

Onde,  $\log(x)$  representa o logaritmo da precipitação máxima,  $\overline{\log(x)}$  representa a média dos logaritmos das precipitações máximas diárias e  $S_{\log(x)}$  é o desvio padrão dos logaritmos das precipitações máximas diárias.

$$b = \left(\frac{1}{0,7797 \cdot s}\right) \cdot (x - \bar{x} + 0,45 \cdot s) \quad (7)$$

Onde, x é o valor da precipitação máxima,  $\bar{x}$  é a média das precipitações máximas e s é o desvio padrão das precipitações máximas.

Ao substituir as equações 6 e 7 na equação 5, a distribuição de Gumbel pode ser reorganizada conforme a equação 8.

$$x = \bar{x} - x \cdot \left\{0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[ \ln \left( \frac{TR}{TR-1} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

Onde, x é a precipitação máxima provável,  $\bar{x}$  e s representam respectivamente a média e o desvio padrão das precipitações máximas da série histórica e TR, o Tempo de Retorno (em anos) da precipitação máxima.

As séries históricas dos dados de precipitação analisadas foram construídas a partir de registros com intervalos diários (24 horas). Entretanto, geralmente, as precipitações pluviométricas apresentam duração inferior a um dia, o que torna necessário desagregar as precipitações máximas para períodos de 5, 10, 15, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1.440 minutos. Nesse caso, foram utilizados os coeficientes de desagregação propostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB, 1986), conforme a Tabela 2.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

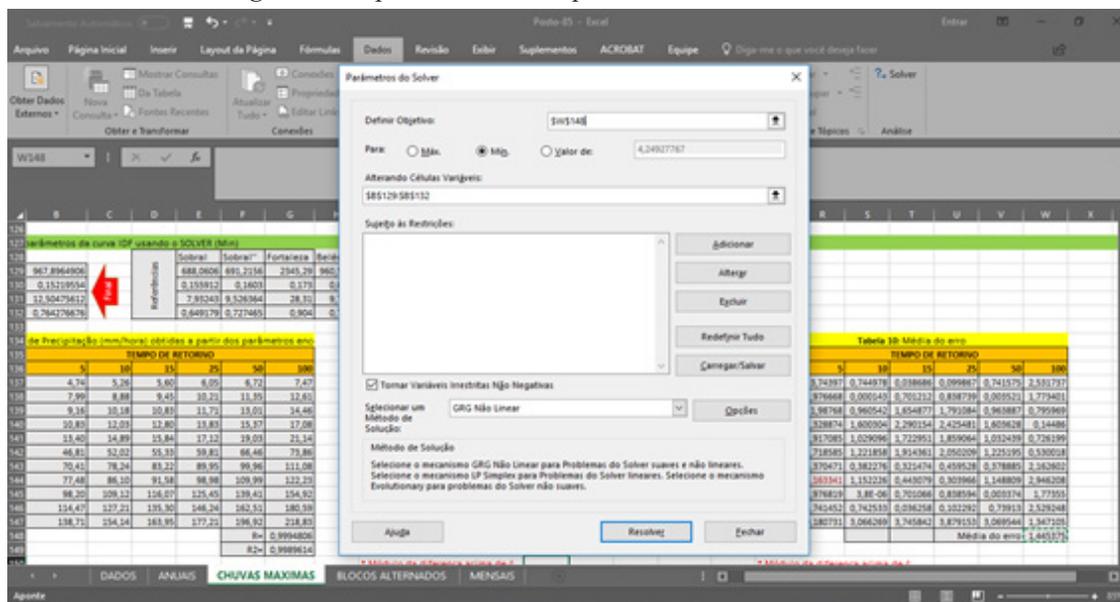
Tabela 2 - Coeficientes de desagregação das chuvas sugerida para o Brasil.

DURAÇÃO INICIAL	RELAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	DURAÇÃO FINAL
1 dia	1,14	24 h
24 h	0,85	12 h
24 h	0,82	10 h
24 h	0,78	8 h
24 h	0,72	6 h
24 h	0,42	1 h
1 h	0,74	30 min
30 min	0,91	25 min
30 min	0,70	15 min
30 min	0,54	10 min
30 min	0,34	5 min

Fonte: CETESB (1986).

A estimativa dos parâmetros a, b, c e d da equação 4 foi desenvolvida por meio do suplemento Solver, do Excel 2016 (Figura 2), objetivando a minimização das diferenças entre as intensidades de precipitação originárias da equação 4 e as intensidades resultantes da aplicação da distribuição probabilística de Gumbel (equação 8).

Figura 2 - Captura de tela do suplemento Solver do Excel 2016.



Fonte: elaborada pelos autores.

O suplemento Solver, do Excel, trata-se uma ferramenta de teste de hipóteses, a partir do qual é possível identificar um valor ideal (mínimo ou máximo) para uma equação (fórmula) inserida em uma célula denominada de objetivo, levando-se em consideração determinadas regras que limitam e/ou restringem os valores das variáveis (células de variáveis de decisão).

O uso do Solver justifica-se pela facilidade de implementação, pois ao serem definidas as células objetivo (células com os parâmetros a serem calibrados), o valor a ser alcançado (máximo ou

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

mínimo), as variáveis que devem ser utilizadas como critério para os testes das hipóteses e o método de resolução (equação linear ou não-linear), o respectivo algoritmo encarrega-se de testar as diversas possibilidades e apontar a melhor combinação possível de valores para as células objetivo.

No caso dessa pesquisa, o Solver foi instruído para obter valores ideais para as variáveis a, b, c e d da equação 4, tendo por regra básica o menor Erro Médio Relativo ao quadrado (EMR<sup>2</sup>). Tal fórmula é dada pela equação 9.

$$EMR^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{i-i_2}{i_2} \cdot 100 \right)}{n} \right]^2 \quad (9)$$

Onde, i representa o valor ideal para a intensidade (resultante da aplicação da distribuição probabilística de Gumbel) e i<sub>2</sub> é a intensidade aproximada à intensidade ideal (resultante da aplicação do teste de hipótese na equação 4 no Solver).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da distribuição probabilística de Gumbel, aplicada às análises estatísticas de precipitações máximas diárias anuais dos postos pluviométricos da bacia do Coreaú, foram obtidas as precipitações máximas para tempos de retorno (TR) igual a 5, 10, 15, 25, 50 e 100 anos, com duração de 24h (Tabela 3).

Tabela 3 - Precipitações máximas diárias estimadas pela aplicação da distribuição de Gumbel.

SUB-BACIA	CÓD.	VALORES EMPÍRICOS			DISTRIBUIÇÃO DE GUMBEL						
		PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS (mm)			TEMPO DE RETORNO (anos)						
		MÁXIMA	MÉDIA	DESVIO P.	5	10	15	25	50	100	
Coreaú	41	137	74,49	27,46	Intensidade máxima da precipitação (mm)	94,25	110,32	119,38	130,62	145,68	160,63
C. Laranja	633	102	69,23	17,94		82,14	92,63	98,55	105,89	115,73	125,49
Forquilha	639	127	79,31	28,82		100,05	116,91	126,42	138,21	154,01	169,70
Itacolomi	152	150	86,60	25,65		105,06	120,07	128,53	139,03	153,10	167,06
Jaguapari	85	136	79,06	23,71		96,12	110,00	117,82	127,53	140,53	153,44
Lago Seco	27	180	92,62	33,49		116,72	136,31	147,37	161,07	179,44	197,68
Mourão	247	125	70,71	24,97		88,68	103,29	111,53	121,75	135,45	149,04
Pesqueiro	149	212,8	84,92	38,88		112,90	135,65	148,48	164,39	185,72	206,88
Poeira	44	167,4	93,34	34,97		118,50	138,96	150,51	164,82	184,00	203,04
Praia	24	140	78,06	29,35		99,18	116,35	126,04	138,05	154,15	170,13
Tapuio	244	158	96,61	31,66		119,40	137,92	148,38	161,33	178,70	195,93
Timonha	40	158	74,49	27,46		104,30	121,11	130,60	142,35	158,11	173,75

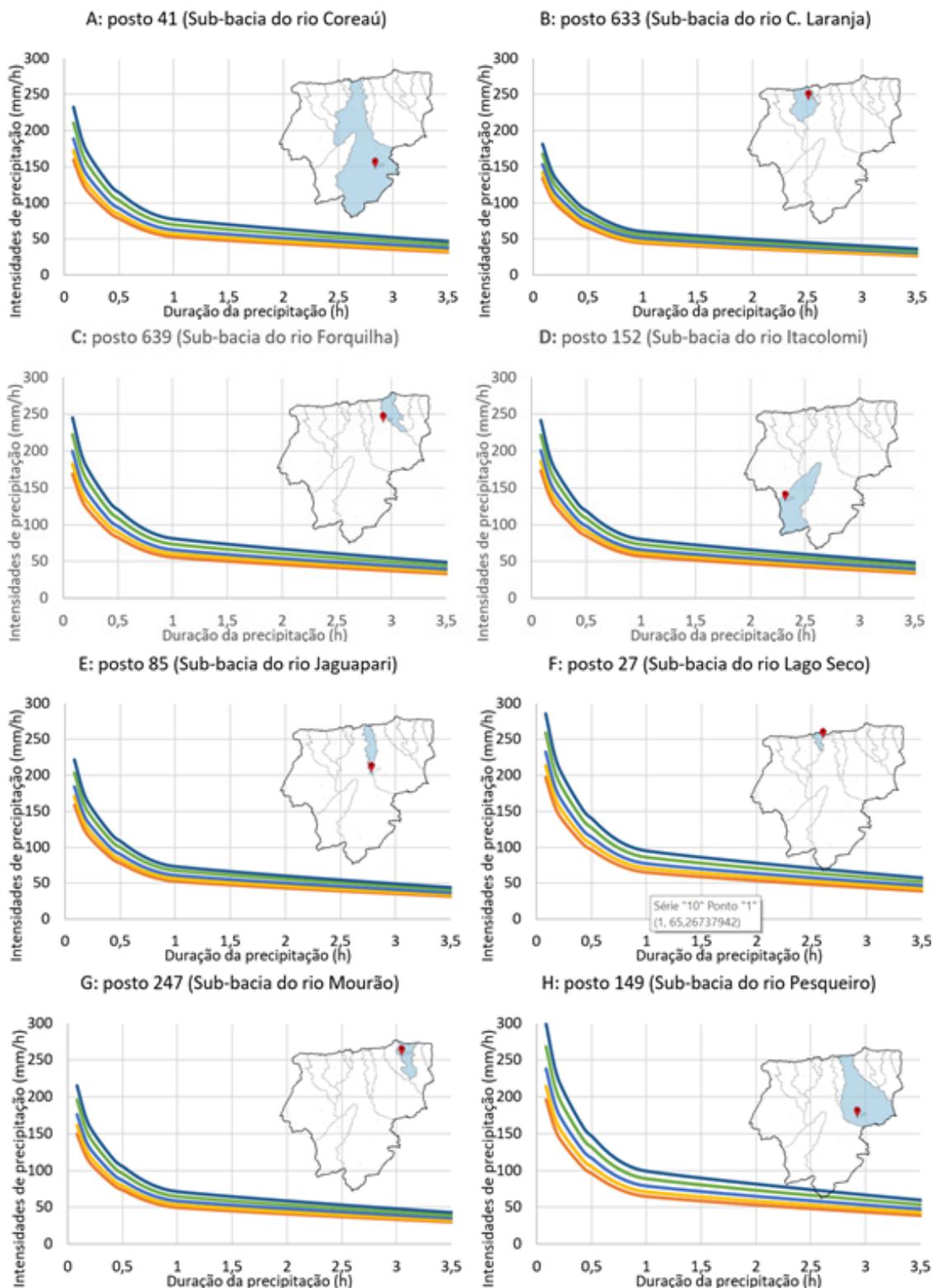
Fonte: elaborada pelos autores .

A desagregação das precipitações diárias, apresentada na Tabela 3 em precipitações com intervalos de tempos menores que 24h, permitiu calcular as intensidades máximas prováveis para os respectivos postos das sub-bacias hidrográficas do Coreaú. Nesse caso, as curvas IDF foram apresentadas nos gráficos da Figura 3. Essas curvas permitem observar que somente a sub-bacia Corrente

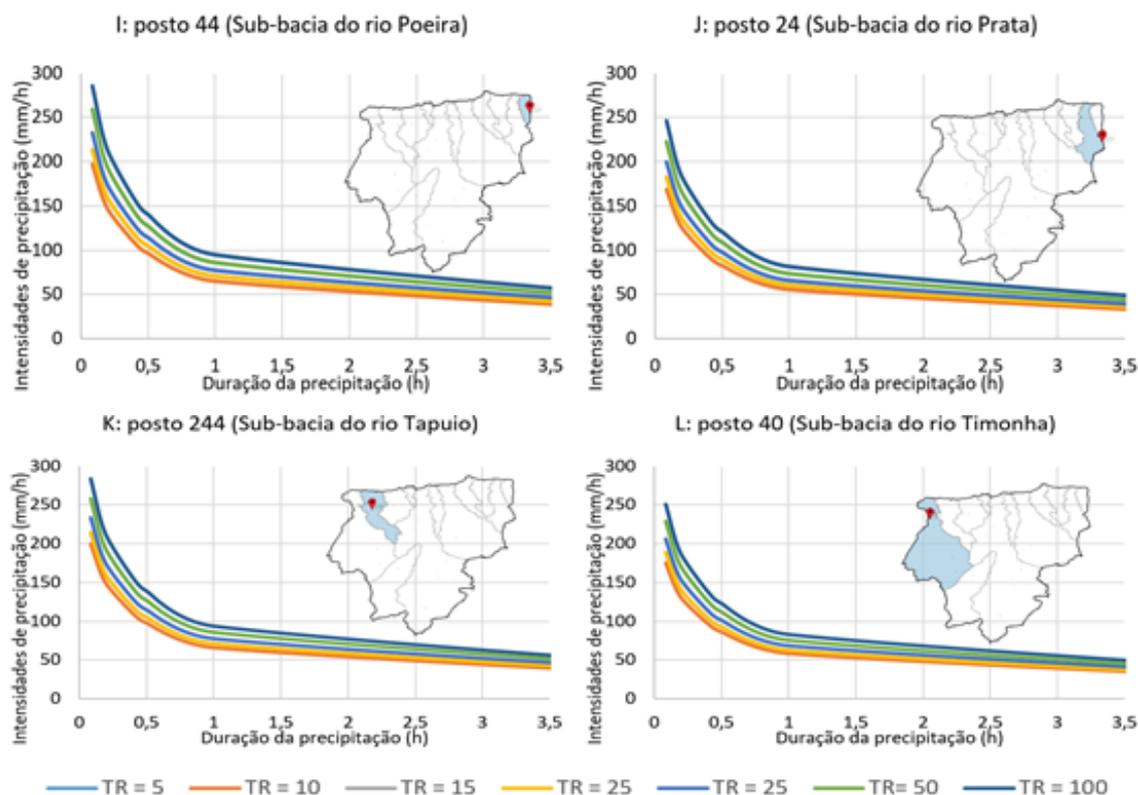
SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

Laranja (Figura 3 – B) apresentou intensidade máxima abaixo de 250 mm para precipitações com Tempo de Retorno (TR) igual a 100 anos.

**Figura 3** - Curvas IDF de precipitações máximas para os dados dos postos pluviométricos.



SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de



Fonte: elaborada pelos autores.

Por outro lado, as precipitações máximas com TR de 100 anos para as demais sub-bacias tendem a permanecer entre 250 e 300 mm. Também é importante destacar que os postos localizados nas sub-bacias Corrente Laranja, Mourão e Jaguarari apresentaram as menores amplitudes entre tempos de retorno (TR) de 5 e 100 anos, o que representa uma menor variação temporal das intensidades das precipitações.

De forma geral, ao comparar os valores obtidos para bacia do Coreaú com os valores observados por Silva et al. (2013) para Fortaleza, é possível constatar que os primeiros são bem mais elevados. Porém, ao serem cotejados com os valores observados por Sobrinho et al. (2014) para região do Cariri cearense, observa-se semelhança.

É importante destacar também que os dados apresentados nas curvas IDF permitem observar a inexistência de discrepâncias que possam descaracterizar os dados de precipitação coletados nos postos pluviométricos.

Assim, foi possível estabelecer a primeira determinação da equação IDF para a região Noroeste do estado do Ceará, mais especificamente, para os postos localizados nas sub-bacias da bacia do rio Coreaú (Tabela 4).

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

Tabela 4 - Parâmetros da equação IDF calibrados para as sub-bacias.

SUB-BACIA	CÓD.	PARÂMETROS DA EQUAÇÃO IDF				COEFICIENTES DE VERIFICAÇÃO			
		a	B	c	d	R	R <sup>2</sup>	SMD	EMR
Coreaú	41	902,381	0,173	12,059	0,761	0,99946	0,99892	76,885	1,680
C. Laranja	633	837,698	0,139	12,479	0,764	0,99953	0,99907	56,138	1,314
Forquilha	639	958,774	0,172	12,050	0,761	0,99947	0,99894	80,542	1,660
Itacolomi	152	1035,397	0,152	12,148	0,761	0,99955	0,99910	72,710	1,413
Jaguapari	85	902,381	0,173	12,059	0,761	0,99946	0,99892	76,885	1,680
Lago Seco	27	967,896	0,152	12,505	0,764	0,99948	0,99896	71,320	1,445
Mourão	247	857,896	0,169	12,153	0,761	0,99947	0,99894	70,606	1,624
Pesqueiro	149	1055,904	0,195	12,082	0,760	0,99931	0,99862	112,046	2,020
Poeira	44	1132,828	0,175	12,063	0,761	0,99945	0,99890	98,030	1,703
Praia	24	940,183	0,175	11,901	0,759	0,99948	0,99895	80,831	1,708
Tapuio	244	1168,735	0,162	12,316	0,762	0,99947	0,99894	91,870	1,534
Timonha	40	1006,159	0,166	12,066	0,761	0,99950	0,99899	80,317	1,587

Fonte: elaborada pelos autores.

Como é possível observar na Tabela 4, a calibração dos parâmetros da equação IDF para os postos pluviométricos da área da pesquisa resultaram em Erros Médios Relativos (EMR) abaixo de 2%, coeficientes de correlação ao quadrado (R<sup>2</sup>) superiores a 0,99 e Soma do Módulo da Diferença inferior a 115. Esses dados indicam excelentes resultados na calibração dos parâmetros a, b, c e d, e são semelhantes aos encontrados na literatura relacionada ao tema.

O método implementado pelo suplemento Solver do Excel 2016 estima as variáveis da equação IDF por meio de regressão não linear, o que justifica a grande variação entre os parâmetros a, b, c e d nas equações IDF para as sub-bacias. Uma vez que a regressão não linear prioriza uma melhor interação entre as variáveis (a, b, c e d), ela permite a obtenção de resultados mais precisos do que regressões lineares (Moruzzi e Oliveira, 2009).

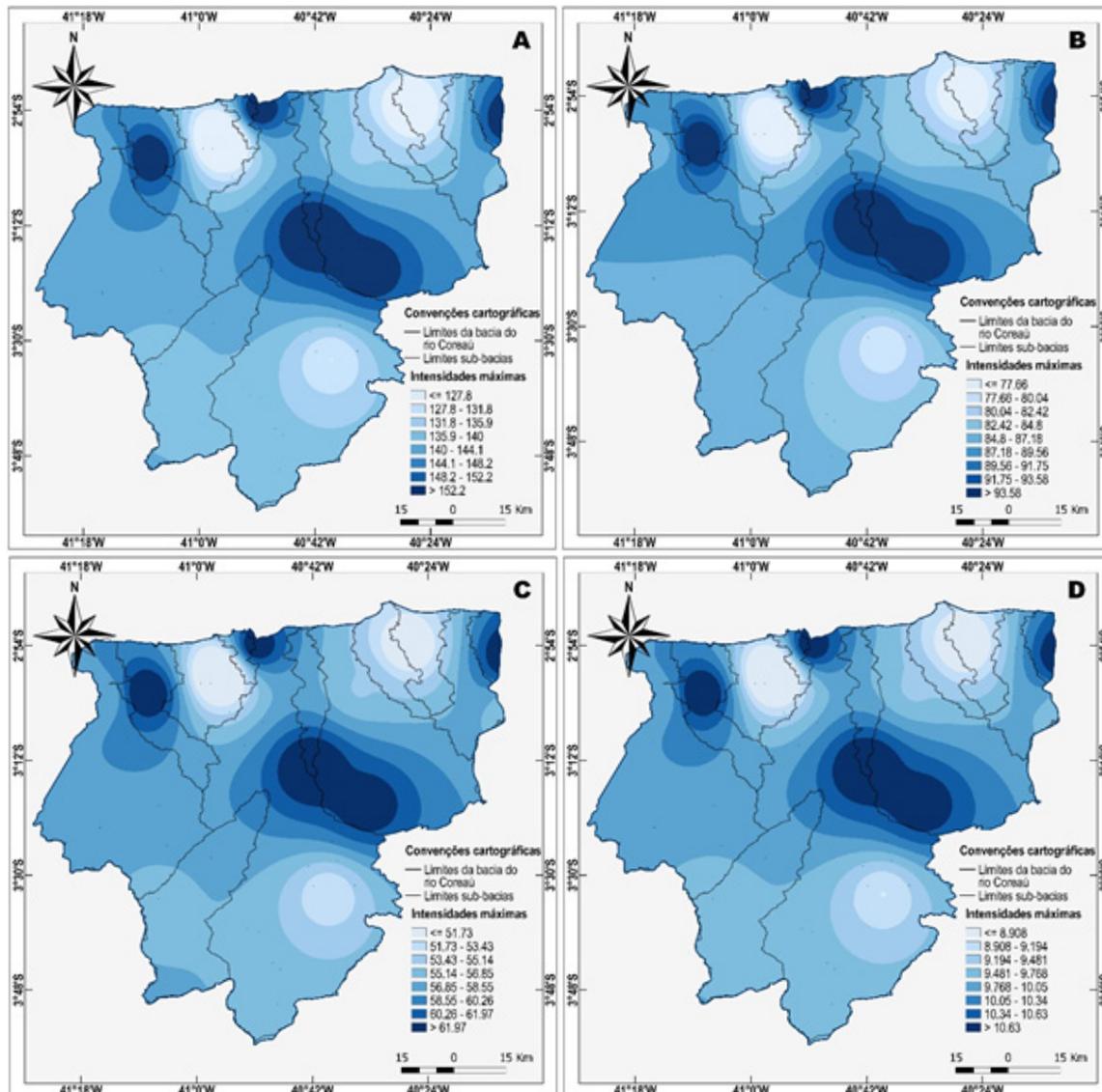
Nesse mesmo sentido, é comum que o parâmetro a tenha uma maior variação, pois ele é o principal responsável por determinar a variabilidade nas intensidades das precipitações. No caso, o posto 633 (localizado na sub-bacia Corrente Laranja) apresentou o menor valor para a (837,698), enquanto o posto 244 apontou o maior valor para essa variável (1168,735).

Essa grande variação nos parâmetros da equação IDF dentro de uma mesma área também foram observadas por Campo et al. (2014), Sobrinho et al. (2014) e Silva (2009). Isso reforça a necessidade de serem desenvolvidos cada vez mais estudos dessa natureza, para abarcar a maior quantidade de postos pluviométricos possíveis e, assim, calibrar os parâmetros da equação IDF para cada local específico.

A espacialização das intensidades máximas prováveis para as precipitações com tempos de retorno (TR) igual a 10 anos e duração de 10, 30, 60 e 720 minutos (Figura 4) possibilitou observar que as precipitações mais intensas ao longo da bacia ocorrem na Depressão Sertaneja, na região do alto curso do rio Pesqueiro e no médio curso do rio Coreaú. Também é possível destacar os baixos cursos dos rios Tapuio, Coreaú e Poeira, na planície costeira da bacia do Coreaú.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

**Figura 4** - Espacialização das intensidades máximas prováveis estimadas para a bacia do rio Coreaú, com tempo de retorno igual a 10 anos e durações de 10 min (A), 30 min (B), 60 min (C) e 720 min (D).



Fonte: elaborada pelos autores.

É possível observar também que quanto maior a duração das precipitações, maiores são as áreas com valores extremos de intensidades, conforme é possível observar na Figura 4 – D. Além disso, as precipitações com duração entre 15 e 45 minutos (Figura 4 – B) apresentaram a maior variação na distribuição espacial, enquanto as precipitações acima de 60 minutos (Figura 4 – C e D) mostraram-se com pouca variação, isso quando comparadas às precipitações de intensidades inferiores.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No contexto do planejamento dos diversos usos dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, o conhecimento sobre a dinâmica hidrológica é indispensável, pois o equilíbrio dos complexos sistemas ambientais depende das relações e processos desencadeados pela água e pelas potenciais alterações no balanço hídrico da bacia do rio Coreaú. Assim, o estudo realizado sobre características das precipitações pluviométricas, tendo por principal resultado, a calibração da equação IDF, trará subsídios à gestão ambiental local, em especial às ações de planejamento de obras hidráulicas e ações

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

de planejamento relacionadas à amenização dos danos do escoamento superficial, como a erosão hídrica e assoreamentos de corpos hídricos.

Por meio dos dados históricos registrados de precipitação pluviométrica diária foram construídas as curvas representativas da relação Intensidade, Duração e Frequência dos eventos de chuvas e elaborada a equação IDF para doze postos inseridos no interior da bacia do rio Coreaú, um representativo de cada sub-bacia. As equações desenvolvidas permitem calcular o valor da intensidade máxima (em mm/hora) de precipitações pluviométricas, levando-se em consideração sua duração (em minutos) e o tempo de retorno (em anos), podendo ser aplicada à construção de chuvas de projeto.

Os resultados confirmaram o comportamento de chuvas com altos valores de intensidade, sobretudo na porção litorânea da bacia hidrográfica, nas áreas de maior elevação (Planalto da Ibiapaba) e em eventos com menor duração. Os resultados de validação das equações calibradas apontaram para satisfatórios coeficientes de correlação, soma do módulo da diferença e erro médio relativo entre as intensidades de chuvas obtidas por meio de distribuição probabilística e posterior desagregação e aquelas obtidas pelas equações IDF calibradas, permitiram ainda, constatar que as relações entre as chuvas de diferentes durações estão próximas àquelas estimadas pela literatura.

Desta forma, a metodologia e os recursos empregados mostraram-se como sendo adequados e permitem obter resultados satisfatórios, mesmo diante de uma realidade em que os dados de registros de chuvas não sejam muito detalhados, como é o caso da área da pesquisa, mas é importante ressaltar que, estudos desta natureza devem estar constantemente sendo atualizados, à medida que o advento dos avanços tecnológicos sugerem uma maior disponibilidade e detalhamento de dados pluviométricos.

Apesar das equações desenvolvidas nesta pesquisa apresentarem limitações, pois baseiam-se em estudos probabilísticos, representam ferramentas úteis à tomada de decisão no planejamento e gestão dos recursos naturais, se levado em consideração as limitações e potencialidades de cada região, mesmo no interior de uma bacia hidrográfica, no caso, da bacia hidrográfica do rio Coreaú.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa durante o período de estudos e Mestrado Acadêmico em Geografia (MAG) da Universidade Estadual Vale do Acaraú, por todo o apoio durante a realização do mestrado.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; RODRIGUES, M. F. G. Previsão Estatística das Chuvas de Outono no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro. v. 13, n. 1, p. 19–30, 1998.
- BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. da. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 515–526, jan. 2014.
- CAMPOS, A. R.; SANTOS, G. G.; SILVA, J. B. L.; FILHO, J. I.; LOURA, D. de S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza. v. 45, n. 3, p. 488–498, set. 2014.
- CARDOSO, C. O.; ULLMANN, L. M.; BERTOL, L. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 131–140, 1998.
- CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PRUSKI, F. F.; HOLLANDA, M. P. de; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensas no Espírito Santo. **Revista Ambiente e Água**, v. 4, n. 3, p. 82–92, 2009.
- CETESB. São Paulo: **Drenagem urbana: manual de projeto**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1986.
- CHEN, C. Rainfall Intensity - duration - frequency formulas. **Journal of Hydraulic Engineering – ASCE**, v. 109, n. 12, p. 1–21, 1983.
- GARCIA, S. S.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; STOPA, W. H. Determinação da equação intensidade-duração-frequência para três estações meteorológicas do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 575–581, 2011.
- GENOVEZ, A. M.; ZUFFO, A. C. Chuvas intensas no Estado de São Paulo: Estudos existentes e análise comparativa. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, p. 45–58, 2000.
- LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.
- MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, S. C. de. Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Claro. v. 13, n. 1, p. 59–68, 2009.
- NHAT, L. M.; TACHIKAWA, Y.; TAKARA, K. Establishment of Intensity-Duration-Frequency Curves for Precipitation in the Monsoon Area of Vietnam. **Res. Inst., Kyoto Univ**, v. 49, n. b, p. 93–103, 2006.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Paulo: EESC-USP, 1998. 398 p.
- SILVA, B. M. **Chuvas Intensas em Localidades do Estado de Pernambuco**. 2009. 117f. Dissertação (Chuvas Intensas em Localidades do Estado de Pernambuco)- Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, Pernambuco, 2009.
- SILVA, F. O. E. da; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, Fortaleza. v. 192, n. 192, p. 48–59, maio 2013.

SOUSA, F. R. C. de; PAULA, D. P. de

SOBRINHO, V. F.; RODRIGUES, J. O.; MENDONÇA, L. A. R.; ANDRADE, E. M. de; TAVARES, P. R. L. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 18, n. 7, p. 727–734, jan. 2014.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 237 p.

ZUFFO, A. C.; GENOVEZ, A. M.; BERNADES, M. Estudo comparativo do método GRADEX para pequenas bacias hidrográficas no estado de São Paulo - Brasil. In: XVI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, **anais III**, Santiago, CHILE, p. 279-90, 1994.