

USO DE MÉTODOS EMPÍRICOS PARA ESTIMAR VAZÃO DE PICO NO RIO PARAÍBA EM CARAÚBAS

Josiclêda Domiciano Galvínio¹
Francisco de Assis Salviano de Sousa²
Magna Soelma Beserra de Moura³

RESUMO

Comumente, no Brasil e especialmente no Nordeste, as séries históricas de vazões são incompletas ou simplesmente não existem. Isso ocorre por duas razões: 1) tradicionalmente, os rios perenes e com volumes importantes são os que despertam interesses para os seus monitoramentos, visto que são suas águas que movimentam as turbinas das hidrelétricas e 2) o custo operacional de estações fluviométricas é relativamente alto quando comparado com o de postos pluviométricos, por exemplo. A modelagem se constitui em uma alternativa para contornar o problema da falta ou escassez de informação quantitativa de vazão. Existem na literatura especializada vários métodos empíricos para se estimar vazão. Esses métodos apresentam diferentes resultados porque utilizam diferentes parâmetros nas suas estimativas. O objetivo deste trabalho é o de avaliar a performance de seis métodos empíricos para estimativa da vazão no rio Paraíba, em Caraúbas. Esses métodos, em geral, são simples e exigem poucas informações endógenas. Dados como precipitação diária, temperatura do ar média mensal, área da bacia, comprimento e declividade do rio principal servem como entrada para esses métodos empíricos. Aqui, as informações fisiográficas utilizadas nos métodos foram obtidas utilizando o software TOPAZ - TOPographic ParametriZation.

Palavras-chaves: Vazão de pico, Rio Paraíba, Caracterização topográfica.

ABSTRACT

Commonly, in Brazil and especially in the Northeast, the streamflows historical series are incomplete or they don't simply exist. That happens for two reasons: 1) traditionally, the perennial rivers and with important capacities are the ones that wake up interests for your managements, because are your waters that move the turbines of the hydroelectric ones and 2) the operational cost of gaging stations is relatively expensive when compared with the one of rain gauge, for example. A modelling it is constituted in an alternative to outline the problem of the lack or shortage of quantitative information of streamflow. Exist in the specialized literature several empiric methods to estimate streamflow. Those methods present different results because they use different parameters in your estimates. The objective of this work is to evaluate the performance of six empiric methods for estimate of the streamflow in the Paraíba river, in Caraúbas. Those methods, in general, are simple and demand few endogenous information. Data as daily precipitation, monthly average air temperature, area of the basin, length and inclination of the main river perform as entrance for those empiric methods. Here, the used river basin physical characteristics were obtained using the software TOPAZ.

Keywords: Runoff, Paraíba River, Topography characterization.

¹ Professora adjunta do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE - josicleda@hotmail.com

² Professor adjunto do DCA/UFCG - fassis@dca.ufcg.edu.br

³ Pesquisadora – EMBRAPA/CPATSA - magna@cpatsa.embrapa.br

INTRODUÇÃO

Das fases básicas do ciclo hidrológico, a mais importante para o hidrólogo é a do escoamento superficial. Essa fase, onde se estuda o transporte de água na superfície terrestre, é de interesse dos projetistas de estruturas hidráulicas e também dos tomadores de decisão no gerenciamento de recursos hídricos.

O escoamento superficial sofre a influência de diversos fatores, que podem ser de natureza climática ou fisiográfica. Dentre os fatores climáticos se destacam a intensidade e duração da precipitação. Os fatores fisiográficos mais importantes são a topografia da bacia, a área, a forma, a permeabilidade do solo e a capacidade de infiltração. Os fatores físicos do solo e a topografia do terreno podem gerar diferentes horizontes à superfície. A variação de horizontes com a profundidade e posição geográfica do solo é uma consideração importante para avaliar o movimento de água em um sistema de drenagem fechado.

Shaffy & Desa (2002) utilizaram métodos sintéticos para estimar a vazão de pico em uma bacia hidrográfica da Islândia. Em seguida, propuseram o método mais adequado a cada uma das sub-regiões da bacia.

Garbrecht & Martz (1999) analisaram, com base em modelo digital de terreno - MDT, a importância da topografia na distribuição do escoamento superficial. Galvêncio & Sousa (2003), utilizando a mesma metodologia de Garbrecht & Martz (1999), afirmam que a extração automática de parâmetros de bacia hidrográfica, utilizando informações digitais, é uma alternativa viável para se obter informações de características físicas do terreno, principalmente quando existe boa cobertura de dados digitais na área estudada. Em geral, um MDT ajusta os pontos altimétricos para representar a morfologia do terreno. Com base em MDT e em Sistemas de Informações Geográficas - SIG é possível estimar características físicas de bacia hidrográfica tais como área, rede de drenagem, comprimento, declividade de canais, dentre outras.

Os avanços tecnológicos promovidos pelos SIGs e a disponibilidade crescente de dados digitais de terreno têm ampliado o potencial de aplicação de modelos hidrológicos mais sofisticados nas áreas de recursos hídricos e ciências ambientais. Segundo Tucci (1998) o uso de SIGs e de Sensoriamento Remoto tem composto a estrutura de alguns modelos visando à obtenção de informações físicas e climáticas de bacias hidrográficas.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é o de avaliar a performance de seis métodos empíricos para estimativa da vazão no rio Paraíba, em Caraúbas, utilizando dados topográficos e climáticos.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 mostra a bacia hidrográfica em estudo, sua localização espacial no Estado da Paraíba, os postos pluviométricos (●) e o posto fluviométrico em Caraúbas (Δ), localizado nas coordenadas geográficas 07° 42'42'' de latitude sul e de 36° 30'30'' de longitude oeste. Essa bacia contribui de forma significativa para a formação do volume de água armazenado no principal reservatório do Alto Paraíba, o açude Epitácio Pessoa, responsável pelo abastecimento de água da cidade de Campina Grande -PB. A bacia do Alto Paraíba possui área de drenagem corresponde a 6700 km² aproximadamente. A bacia de Caraúbas possui área de 4800 km² aproximadamente.

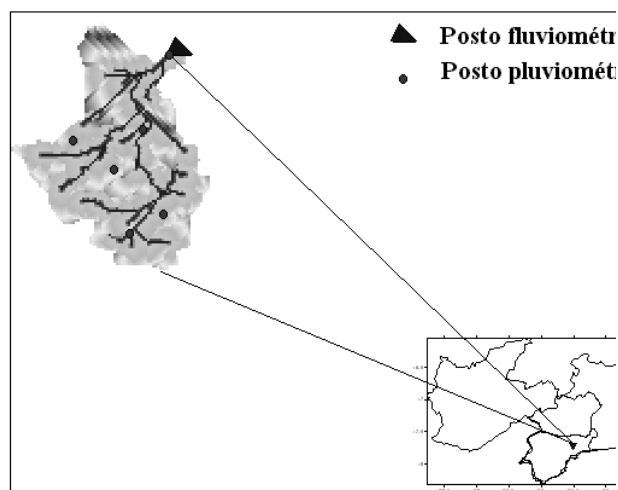


Figura 1 – Bacia hidrográfica de Caraúbas

Neste estudo, as características físicas da bacia hidrográfica, foram obtidas pelo programa TOPographic ParametriZation – TOPAZ, proposto por Garbrecht & Martz (1999), as temperaturas médias mensais, estimadas pelo método Estima T, proposto por Cavalcanti & Silva (1994) e as precipitações médias mensais, observadas no âmbito da bacia de Caraúbas, no período de 1973 a 1999, foram usadas como variáveis endógenas, nos métodos empíricos, para estimar a vazão de pico na seção transversal do rio Paraíba, em Caraúbas. As vazões médias mensais observadas no posto fluviométrico de Caraúbas foram utilizadas para estimar os parâmetros, verificar e validar os modelos.

MÉTODOS

O principal problema na construção de obras hidráulicas é a falta ou escassez de dados confiáveis de vazões. É a partir deles que se pode avaliar o volume produzido por uma bacia hidrográfica e a vazão de projeto para um dado período de retorno. Para contornar o problema, existem na literatura especializada vários métodos empíricos para estimar vazão. Neste trabalho serão utilizados seis deles para estimar vazão no rio Paraíba, em Caraúbas. Aqui se dividiram os métodos empíricos em duas categorias: métodos que utilizam características fisiográficas e fatores climáticos da bacia hidrográfica e métodos que usam apenas as características fisiográficas.

Métodos que utilizam características fisiográficas e fatores climáticos

Método 1: Método de Burkli-Ziegler, segundo Villela & Mattos (1975) é dado por:

$$Q = 0,022A(10r)c\sqrt{\frac{S}{A}} \quad (1)$$

em que, Q é a vazão de pico (m³/s), A é a área de drenagem (hectares), r é a precipitação média durante a chuva crítica (mm), S é a declividade média da bacia e c é o coeficiente de escoamento superficial.

Método 2: Fórmula de Iszkowski segundo Pinto et. al. (1976)

$$Q = \frac{k.m.h.A}{1000} \quad (2)$$

em que, Q é a vazão de pico (m³/s), k e m são parâmetros que dependem da morfologia e da área da bacia, respectivamente, h é a precipitação média (mm) e A é a área da bacia (km²). Os valores de m e k podem ser vistos na Tabela 1 e 2 em Anexo.

Métodos que utilizam apenas as características fisiográficas da bacia

Método 3: Foi proposto por Kinnison (1945)

$$Q_p = \frac{0,00036 \left[(h / 0,03048)^{2,4} \right] + 124 (A / 4,84)^{0,95}}{a^{0,04} (L / 2200)^{0,7}} \quad (3)$$

em que, Q_p é a vazão de pico, h é a altitude média da exutória da bacia (metros), A é área da bacia (Km²), a é o percentual de área de espelho de água e L é o comprimento médio do canal (metros).

Método 4: Foi proposto por Füller (1914)

$$\frac{(Q_m - Q_{24})}{Q_{24}} / 0,0283 = 2 \left(\frac{A}{484 \times 10^{-2}} \right)^{-0,30} \quad (4)$$

em que, Q_m é a vazão de pico (m³/s), Q₂₄ é a vazão média das máximas consecutivas em 24 horas, durante o período e A é a área da bacia (km²).

Método 5: Kresnik, Ganguillet e Kutter, segundo Vilela & Mattos (1975) é dado por:

$$Q_p = a \frac{32}{0,5 + \sqrt{A}} A \quad (5)$$

em que, Q_p é a vazão de pico (m³/s), A é a área (km²) e α é um coeficiente que varia entre 0,03 e 1,61.

Método 6: Proposto por Creager (1950)

$$Q = 1,3k \left(\frac{A}{2,59} \right)^{0,936A^{-0,048}} \quad (6)$$

em que, Q é a vazão de pico (m³/s); k é um coeficiente em função das características físicas da bacia e A é a área de drenagem (km²).

Utilizaram-se os Coeficientes de Determinação (R²) e de Eficiência (CE) para avaliar o desempenho da aplicação desses métodos. O coeficiente de determinação mede o grau de associação entre os valores observados e estimados. O coeficiente de determinação não detecta erros sistemáticos, ou seja as vazões estimadas e observadas podem estar altamente correlacionadas mas apresentar “viés”. Já o Coeficiente de Eficiência indica se os resultados se alinham randomicamente em torno de uma reta de 45°. Se os valores estimado e observado forem significativamente associados, mas não se alinharem segundo uma reta de 45°, o CE será menor do que o R².

O coeficiente de determinação é calculado por:

$$R^2 = \frac{\sum (q_0 - \overline{q_0})^2 - \sum (q_0 - q_{est})^2}{\sum (q_0 - \overline{q_0})^2} \quad (7)$$

onde: q₀ = vazões observadas; q_c = vazões calculadas; $\overline{q_0}$ = vazão média da série observada; q_{est} = vazões estimados pela reta de regressão de q₀ sobre q_c.

O coeficiente Eficiência (CE) é determinado por:

$$E = \frac{\sum (q_0 - \overline{q_0})^2 - \sum (q_0 - q_c)^2}{\sum (q_0 - \overline{q_0})^2} \quad (8)$$

onde: q_c = vazões calculadas pelo modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A divisão da bacia de Caraúbas em sub-bacias é mostrada na Figura 2. Pode ser visto que a bacia de Caraúbas foi dividida em sete sub-bacias com áreas maiores ou iguais a 400 hectares e comprimentos de rio principal maiores ou iguais a 50 quilômetros. As principais características fisiográficas da bacia de Caraúbas estão na Tabela 3.

As características físicas das sete sub-bacias: área de drenagem direta a montante e total, altitude média, declividade média e comprimento do rio principal, mostradas na Tabela 4, foram utilizadas nos seis métodos descritos anteriormente.

A avaliação dos métodos pode ser vista na Tabela 5. Nos dois primeiros métodos os critérios de avaliação foram baseados nos valores observados e estimados, partindo da hipótese de que os valores observados estão isentos de erros. Dentre os métodos que utilizam informações fisiográficos e fatores climáticos, o de Burkli-Ziegler foi o que apresentou melhor ajuste. Observar que quanto maior o Coeficiente de Determinação (R²) menor a diferença entre as vazões observada e estimada. Nos métodos que são função apenas das características fisiográficas, o R² foi utilizado para explicar a variância entre a área da bacia e as vazões.

Para a bacia de Caraúbas foi efetuada a diferença percentual entre o valor da vazão observada e a estimada. As estimativas das vazões, utilizando as áreas das sub-bacias, não foram testadas por não haver vazões observadas nessas sub-bacias. A Figura 3 mostra a comparação entre vazões observada e estimada pelo método de Burkli-Ziegler, com CE igual a 0,7336. Note que o CE é menor do que o R^2 . A Figura 4 mostra a relação linear entre as vazões observada e estimada pelo método de Isikowski, com CE igual a 0,2292.

A Figura 5 mostra a relação linear entre as áreas das sub-bacias e vazões estimadas pelo método de Kimisson.

A Figura 6 mostra a relação linear entre as vazões médias anuais, estimadas pelo método de Füller, e a área da bacia hidrográfica.

Nas Figuras 7 e 8 pode visto a relação linear entre as áreas das sub-bacias e as vazões estimadas pelos métodos de Kresnik e Creager, respectivamente.

Tabela 3 - Principais características físicas da bacia hidrográfica do rio Paraíba em Caraúbas

Comprimento médio do rio principal (km)	373
	4781,5
Área da bacia (km²)	
Elevação mínima (m)	105,0
Elevação máxima (m)	1173,0
Elevação da exutória (m)	304,0
Inclinação média da bacia	0,31



Figura 2- Divisão da bacia de Caraúbas em sub-bacias

Tabela 5 – Avaliação dos métodos utilizados

<i>Métodos</i>	R^2	<i>CE</i>	<i>D (%)</i>
<i>Burkli-Ziegler</i>	0,7958	0,7336	—
<i>Iszkowski</i>	0,5042	0,2292	—
<i>Kinnison</i>	0,9196	—	36,6
<i>Füller</i>	0,9152	—	40,0
<i>Kresnik</i>	0,9885	—	2,6
<i>Creager</i>	0,9795	—	2,6

CE – Coeficiente de Eficiência, D _ diferença percentual entre o observado e estimado e R^2 = coeficiente de determinação.

O método de Iszkowski foi o que apresentou maior dispersão em torno da reta e a mais baixa eficiência. Os demais métodos apresentaram resultados considerados muito bons (com R^2 médio em torno de 91%). As características fisiográficas da bacia influenciaram em mais de 60 % na estimativa da vazão. Este fato evidencia a importância dessas características no processo de escoamento superficial. A área da bacia é a característica física que mais influencia o escoamento superficial. Dos métodos aqui aplicados, sugere que se adote o Burkli-Ziegler como o “ideal” para estimar vazões na área em estudo. Esse método mostrou eficiência em torno de 75% e R^2 de aproximadamente de 80%. O fato de apresentar eficiência menor do que o R^2 , significa que os valores obtidos pelo método estão bem explicados pela variável preditora. Isso porque o coeficiente de determinação serve para explicar a variância entre os dados observados e estimados. A eficiência dos métodos que utilizam apenas a área da bacia para estimar vazão não foi testada por não haver dados históricos de vazão na exutória das sub-bacias.

Os métodos que utilizam características fisiográficas da bacia, como área, comprimento do rio principal, inclinação e elevação, apresentam alta correlação linear entre essas características e as vazões. Diante disso, é importante ressaltar a importância dessas características e do método utilizado para obtê-las.

Análise de correlação

Os coeficientes de correlação linear (r) entre a vazão de pico (Q_p) e os totais diários precipitados antecedentes ao dia dessa vazão (TPA); e entre a vazão de pico (Q_p) e a precipitação do dia em que ocorreu essa vazão (PD), são mostrados na Tabela 6. As análises foram realizadas apenas para os meses de março e abril, visto que são nesses meses que ocorrem vazões significativas na bacia em estudo. Como mostra a Tabela 6 os TPAs do posto pluviométrico do município de São Sebastião do Umbuzeiro (SSU), explica 91,82% da vazão de pico na exutória da bacia, no mês de março. Por outro lado a PD, no mês de abril, no posto de Prata, explica 71,72% da Q_p na exutória. Os postos pluviométricos de São Sebastião do Umbuzeiro e de Prata estão localizados no sul e no oeste da bacia em estudo, respectivamente. Destaca-se, aqui a boa relação dos TPAs com a Q_p . Esse resultado reforça a tese de que mesmo em terrenos de solo raso, que é o caso da bacia em estudo, há um certo retardo na relação chuva-vazão.

Tabela 6 – Coeficientes de correlação linear

Postos	março		abril	
	Qp x TPA	Qp x PD	Qp x TPA	Qp x PD
SSU	0,9182	0,6760	0,2661	0,6108
Congo	0,4715	0,5153	0,2808	0,2070
Prata	0,6905	0,3770	0,5678	0,7172

A fim de expressar a vazão de pico em função da precipitação no âmbito da bacia em estudo, realizou-se análises de regressão polinomial de segundo grau entre a vazão de pico (Qp) e a precipitação do dia em que ocorreu essa vazão (PD); e entre vazão de pico (Qp) e os totais diários precipitados antecedentes ao dia dessa vazão (TPA). Os resultados podem ser vistos na Tabela 7 para os meses de março e abril.

Os melhores ajustes de regressão foram obtidos para Qp versus a PD no posto pluviométrico de SSU, no mês de março; e Qp versus os TPAs nos postos pluviométricos de Congo e Prata, nos meses de março e abril, respectivamente. Com exceção da regressão entre Qp versus a PD no posto SSU, no mês de março, os valores de R^2 demonstram que os ajustes das equações de regressão, de modo geral, são melhores quando se expressa a Qp em função dos TPAs. As explicações para esse fato podem estar relacionadas ao tempo de retardo dos escoamentos superficial e subsuperficial da bacia e a localização geográfica dos postos pluviométricos.

Tabela 7 – Coeficientes de determinação da regressão polinomial para o mês de março

Postos	R^2 para $Qp=f(PD)$		R^2 para $Qp=f(TPA)$	
	março	abril	março	abril
SSU	0,89	0,10	0,41	0,39
Congo	0,41	0,08	0,57	0,21
Prata	0,51	0,40	0,25	0,52

CONCLUSÃO

Os métodos aqui apresentados para se estimar vazão de pico são aqueles de aplicação possível em bacia hidrográfica onde a disponibilidade de dados é limitada. Neste estudo, as características fisiográficas da bacia influenciaram em mais de 60% os métodos de estimativa da Qp. De todos os métodos propostos, o de pior desempenho foi de Iszkowski.

Deste estudo pode-se concluir que, em geral, no âmbito da bacia estudada, a vazão de pico, Qp, apresenta melhor estimativa quando se utilizam métodos que levam em conta as características fisiográficas da bacia. Essas características devem ser obtidas de forma automática para não comprometer o resultado da estimativa.

REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, E.P., SILVA, E.D.V. Estimativa da temperatura do ar em função das coordenadas locais. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia e II Congresso Latino—Americano de Ibérico de Meteorologia, Anais: Sociedade Brasileira de Meteorologia, v1, 154-157. (1994).

- CREAGER, W. P. ; JOEL, D. J. Hydroelectric Handbook. Nova York, John Wiley and Sons. Inc. 1950.
- FULLER, W. E. Flood flows. Trans. American Society. Civil Engineering. 77: 564-617, 1914.
- GALVÍNCIO, J. D.; SOUSA, F. A. S. de. Uso Do Modelo Topaz Para a Caracterização Fisiográfica da Bacia Hidrográfica Do Açude Epitácio Pessoa. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol 09, nº 04, out/dez, 2004.
- GARBRECHT, J., STARKS, P. Note on the Use of USGS Level 17.5- Minute DEM Coverage for Landscape Drainage Analyses. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 61 (5): pp. 519-522, 1995.
- GARBRECHT, J., MARTZ, L.W. Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling. Presented at the 19th ESRI International User Conference, Environmental Systems Research Institute. **Published in the Proceedings of this Conference**. San Diego, California, July, 26-30, 1999.
- JENSON, S. K., DOMINGUE. J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 54 (11), p.p 1593-1600, 1988.
- KINNISON, H.B.; COLBY, B. R. Flood formulas based on drainage basin characteristic. Proceeding. American. Society. Civil. Engineering 69: 849-876, 1945.
- NERC. Flood Studies Report. London, 5v, 1975.
- PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. Hidrologia Básica. Editora Edgard Blucher LTDA. 279p., São Paulo, 1976.
- TRIBE, A. Automated Recognition of Valley Heads from Digital Elevation Models. **Earth Surface Processes & Landforms**, vol. 16(1), 33-49p., 1992.
- TUCCI, C.E.M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre; Ed. Universidade – UFRGS- Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- VILELA, S. M.; MATOS, A. Hidrologia Aplicada. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 245p., 1975
- WIGHAM, J. M. Infiltration and the Physics of Flows of Water Through Porous Media, in Section V, of the Handbook on the Principles of Hydrology, 5.1-5.58p., 1970.

Anexos

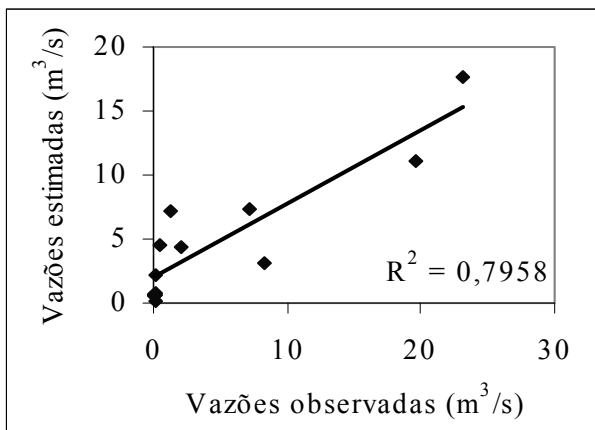


Figura 3 – Relação linear entre vazões observadas e estimada pelo método Burkli-Ziegler

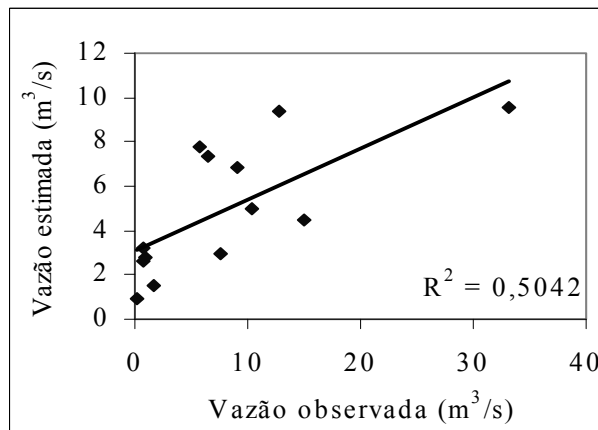


Figura 4 – Relação linear entre vazões observadas e estimadas pelo método Iszkowski

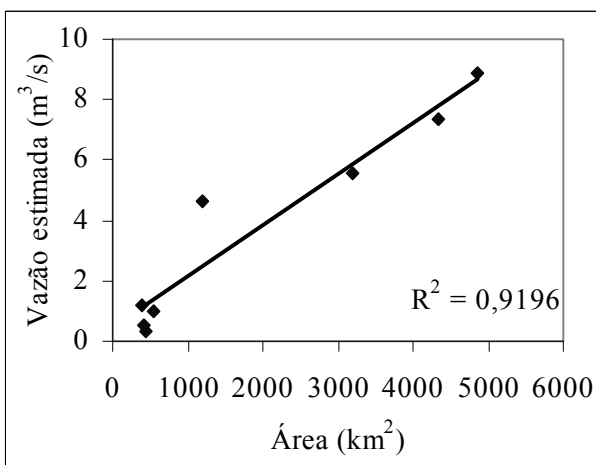


Figura 5 – Relação linear entre área e vazão estimada pelo método Kinisson

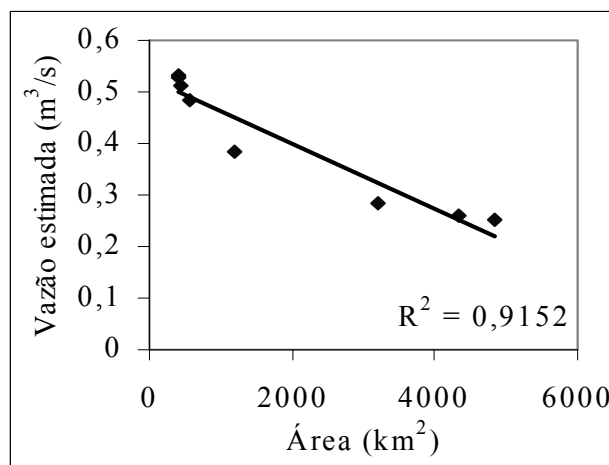


Figura 6 – Relação linear entre área e vazão estimada pelo método Füller

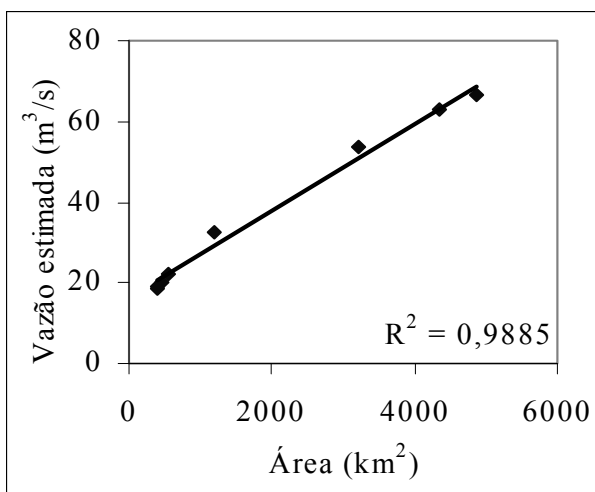


Figura 7 – Relação linear entre área e vazão estimada pelo método Kresnik

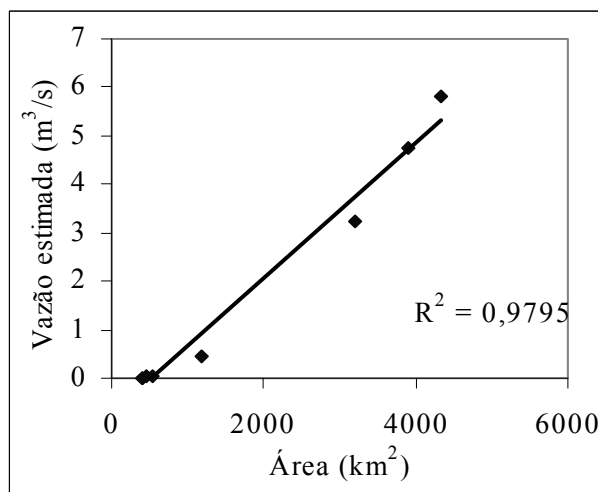


Figura 8 – Relação linear entre área e vazão estimada pelo método Creager

ANEXO A

Tabela 1 - Valores de m em função de A

A (km ²)	m	A (km ²)	m
1	10	500	5,90
10	9	1000	4,70
40	8,23	2000	3,77
70	7,60	10000	3,02
100	7,40	30000	2,80

Tabela 2 - Valores dos coeficientes de k em função da Morfologia

Organograma da bacia

	Valores de k			
	I	II	III	IV
Zona pantanosa	0,017	0,030	—	—
Zona plana e levemente ondulada	0,025	0,040	—	—
Zona em parte plana e em partes com colinas	0,030	0,056	—	—
Zona com colinas não muito íngremes	0,035	0,070	—	—
Zonas com montes altos segundo a declividade	0,060	0,160	0,360	0,600
	0,070	0,185	0,460	0,700
	0,080	0,210	0,600	0,800

Categoria I - terreno muito permeável com vegetação normal e terreno de média permeabilidade com vegetação densa.

Categoria II - terreno de colina ou montanha com vegetação

Categoria III - terreno impermeável com vegetação normal em colina

íngreme ou montanhoso.

Categoria IV - terreno impermeável com escassa ou nenhuma vegetação em colina íngreme ou montanhoso.

Tabela 4 – Características físicas das sub-bacias da bacia hidrográfica de Caraúbas

Sub-bacias	Área de drenagem direta (km ²)	Área de drenagem a montante (km ²)	Área de drenagem total (km ²)	Altitude do terreno (m)	Inclinação média do rio principal (m/m)	Comprimento do rio principal (km)
	-	4852,6				-
7	519,4	4333,1	519,5	304	0,0421	566
5	515,1	3204,9	515,1	304	0,0626	558
3	944,2	1189,2	944,2	305	0,0167	1568
1	177,5	551,0	728,5	305	-	486
2	55,5	405,1	460,6	305	0,0008	299
4	669,7	401,8	1071,6	304	0,0623	898
6	162,2	450,8	613,1	304	0,1658	132