

MODELOS DIÁRIOS CHUVA-VAZÃO EM BACIAS DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

Marcos Airton de Souza Freitas *

RESUMO

Neste estudo é feito uma análise de dois modelos chuva-vazão - Modelo BOUGHTON e Modelo CN-3S - objetivando verificar suas performances quando aplicados à bacias de diferentes características físico-climáticas pertencentes ao semi-árido brasileiro. Tal análise embasa-se, primordialmente, na comparação dos parâmetros estatísticos históricos e modelados (média, desvio padrão e assimetria), análise dos resíduos, bem como em termos de aplicabilidade e tempo computacional.

ABSTRACT

This paper describes and analyses two selected rainfall-runoff models - BOUGHTON Model and CN-3S Model - applied to semi-arid catchments with different physical characteristics. Analysis is done through graphic comparison between historic and synthetic streamflow records and preservation of the historic statistical parameters (mean, standard deviation and skewness) by generated series. Sensibility analysis, applicability and computational time are also verified.

1 - INTRODUÇÃO

Devido à variabilidade climática do Nordeste Brasileiro, é fácil verificar a existência de dois períodos bem característicos: um chuvoso e outro seco.

A concentração nítida da precipitação em um único período, além de as bacias possuírem em sua maior parte solos de natureza cristalina, faz, com que os rios pertencentes ao semi-árido assumam com-

portamento intermitente, o que, notadamente, acarreta problemas na modelagem hidrológica.

A grande maioria dos modelos chuva-vazão empregados no semi-árido são adaptações de modelos desenvolvidos para bacias de clima distinto do semi-árido, com rios de regime perene.

Também vários desses modelos foram adaptados para trabalharem com dados escassos, ou seja, utilizam-se, apenas, na maioria das vezes, de dados de

* Eng. Civil (FUFPI), M. Sc. (UFC), Doutorando em Engenharia (Universidade de Hannover - Alemanha) e Professor do Centro de Ciências Tecnológicas - CCT da Universidade de Fortaleza - UNIFOR.

precipitação, vazão e evapotranspiração mensais ou de dados de precipitação e vazão diários e evapotranspiração mensal.

Neste âmbito, dentre a gama de modelos descritos na literatura, selecionou-se dois pertencentes a classe denominada modelos chuva-vazão (MCV) para um estudo mais aprimorado, principalmente, no que tange a aplicação em bacias do semi-árido do Nordeste Brasileiro

Os modelos utilizados na presente pesquisa foram: o modelo BOUGHTON, desenvolvido em sua versão original para o semi-árido australiano, e o modelo CN-3S, criado, inicialmente, com o propósito de gerar séries sintéticas mensais para a operação de reservatórios em bacias nordestinas. Objetiva-se com esse trabalho a verificação de quão bem esses dois modelos chuva-vazão, utilizando dados de precipitação e vazão, a nível diário, simulam a parte terrestre do ciclo hidrológico.

A comprovação ou não da superioridade de um modelo em relação ao outro, embasa-se, preponderantemente, em diversos fatores: ajuste do modelo a nível mensal; ajuste do modelo a nível diário; facilidade na determinação dos valores ótimos; forma da superfície de resposta próxima aos valores ótimos, indicada através da análise de sensibilidade dos parâmetros; preservação dos parâmetros estatísticos históricos; adequabilidade de aplicação tanto a bacias de menor porte quanto a de maior área de drenagem; viabilidade de utilização com dados de entrada escassos; além da viabilidade econômica de uso, devido ao tempo computacional envolvido.

2 - MODELOS CHUVA-VAZÃO

Desde os primeiros estudos quantitativos em Hidrologia os pesquisadores se deparam com os modelos chuva-vazão. Durante a primeira metade do século XIX foram publicados registros de medições de vazões de vários rios europeus, marco inicial para o desenvolvimento de "modelos" de processo hidrológico (LINSLEY, 1981).

Os primeiros modelos originaram-se, principalmente em resposta aos problemas de esgoto urbano, projeto de sistemas de drenagem e projeto de vertedouro de barragens (TODINI, 1988).

Dentro de uma perspectiva histórica, convém salientar o uso do método racional a partir do início deste século. A seguir, surgiu o conceito de hidrograma unitário (SHERMAN 1932), baseado no princípio da superposição, até que, na década de 50, apareceram os primeiros modelos ditos "conceituais".

O U. S. Soil Conservation Service, em 1954, apresentou um procedimento para estimar o escoamento direto a partir da precipitação com base nas denominadas

curvas-número (Curve Number ou CN). Surgiram, a posteriori, diversos modelos que se utilizavam de tais curvas.

A partir da década de 60, em razão da incorporação da ferramenta computacional, os modelos chuva-vazão sofreram um grande impulso até atingirem o estado de arte atual.

Um modelo é denominado chuva-vazão (MCV) quando partindo-se de certos dados, em geral, precipitação e evaporação, pode-se obter, através de equações empíricas e/ou físicas, o escoamento em determinada seção de uma bacia hidrográfica.

Em VIESSUAN et al. (1977), bem como em FLEMING (1975) encontra-se a descrição de diversos modelos hidrológicos.

2.1 Classificação dos Modelos

CLARKE (1973) alocou os modelos matemáticos em Hidrologia em quatro grupos:

- a) Estocástico-conceitual;
- b) Estocástico-empírico;
- c) Determinístico-conceitual;
- d) Determinístico-empírico.

Podendo, contudo, cada um deles ser subclassificado em concentrado ou distribuído. Um modelo é dito concentrado quando ignora a distribuição espacial das variáveis de entrada e dos parâmetros que caracterizam os processos físicos, variando, apenas, em relação ao tempo. Nos modelos distribuídos essa distribuição espacial é levada em conta.

Um modelo é dito estocástico se para um dado valor de entrada existir uma probabilidade ou elemento de aleatoriedade relacionada aos dados de entrada.

Modelos conceituais e empíricos diferenciam-se basicamente pelo fato de aqueles incorporarem intrinsecamente em suas relações processuais formulações físicas, químicas, biológicas e outras, ao passo que nos modelos empíricos ou "caixa-preta" isto não ocorre.

Uma outra classificação foi dada por TODINI (1988), que alocou os modelos, segundo sua estrutura, em:

- a) Puramente estocástico;
- b) Integral concentrado;
- c) Integral distribuído;
- d) Diferencial distribuído.

Em relação aos parâmetros eles poderiam ser estocásticos ou físicos.

2.2 Campos de Aplicação dos MCVs.

Em consonância com KUCZERA (1983), os cam-

pos de aplicação de modelos chuva-vazão são (1) extensão de séries de vazão; (2) geração de estatísticas sobre as vazões; (3) acesso aos efeitos provenientes das mudanças no uso do solo; (4) predição de vazões em bacias não monitoradas e (5) predição dos efeitos provenientes das mudanças do uso do solo em regimes hidrológicos.

Segundo CANEDO (1989) as aplicações potenciais dos MCVs são: (1) no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas; (2) nos projetos hidrológicos de construção e operação de reservatórios; (3) nos projetos de irrigação ou drenagem artificial e (4) nos estudos de cheias ou secas.

2.3 Etapas na Utilização de um MCV

As etapas de uso de um MCV podem ser resumidas em quatro itens, quais sejam: (1) escolha ou formulação do modelo; (2) calibração do modelo; (3) validação e (4) aplicação do modelo.

3 - METODOLOGIA

3.1 Modelos Utilizados

Os critérios de escolha dos modelos empregados neste estudo foram, além da disponibilidade dos mesmos para uso, o fato de esses modelos estarem, já há algum tempo, sendo pesquisados e utilizados por vários organismos públicos e privados em projetos de reservatórios no semi-árido.

Os modelos, então, selecionados foram: o modelo BOUGHTON e o modelo CN-3S.

3.1.1 Modelo BOUGHTON

O modelo BOUGHTON aqui empregado é uma versão modificada do modelo original e consiste na operação conjunta de três reservatórios, através dos quais a água circula simulando o principal processo do ciclo hidrológico, quais sejam: reservatório de retenção; reservatório de superfície e reservatório subterrâneo. A descrição detalhada, assim como o fluxograma do modelo podem ser encontrados em FREITAS (1991). Na versão incrementada o modelo consta de nove parâmetros, a saber:

- RETMAX - capacidade máxima do reservatório de retenção superficial;
- DSMAX - capacidade máxima do reservatório de superfície;
- CONST - constante de proporcionalidade;
- EVPMAX - evapotranspiração máxima diária;

- SSMAX - capacidade máxima do reservatório subterrâneo;
- DELAY - coeficiente de reservação;
- C - coeficiente empírico;
- FK - constante empírica;
- FO - taxa de infiltração diária.

3.1.2 Modelo CN-3S

O modelo CN-3S, entretanto, tem como base a determinação da lâmina de escoamento superficial através das equações determinadas pelo U. S. Soil Conservation Service. As curvas de regressão potencial são avaliadas a partir dos valores numéricos dos CN's, em função das características da chuva antecedente e dos complexos solo-vegetação. Maiores detalhes do modelo podem ser vistos em TABORGA & FREITAS (1987), FREITAS & PORTO (1990) e FREITAS (1991). Na versão ora elaborada, fez-se necessário apenas a calibração de cinco parâmetros (O parâmetro ALFA foi mantido constante e igual a 0.02), quais sejam:

- CNI - parâmetro de calibragem associado à cobertura vegetal;
- ALFA - parâmetro de calibragem relacionado à interceptação;
- BETA - parâmetro de ajuste de chuva antecedente;
- KO - parâmetro de ajuste de chuva antecedente;
- K1 - taxa de alimentação do reservatório subterrâneo;
- K2 - taxa de depleção do reserv. subterrâneo.

3.2 Método de Otimização e Função Objetivo

O método de otimização utilizado no ajuste dos parâmetros dos modelos foi o método de Rosenbrock. Abordagens pormenorizadas do método tem-se em ROSENBRÖCK (1960), CLARKE (1973) e KUSTER & MIZE (1976).

A função objetivo empregada foi o somatório dos quadrados das diferenças entre as vazões calculadas e as vazões observadas (intervalo de tempo diário).

3.3 Bacias Hidrográficas

As bacias selecionadas para a aplicação dos

modelos são pertencentes ao semi-árido brasileiro. Foram, no total, empregadas seis bacias (quatro localizadas no Estado do Ceará e duas no Estado de Pernambuco). As áreas de drenagem variam desde 16 até 19313 km². As bacias apresentam em sua maioria precipitação média anual em torno de 600 a 800 mm. A evapotranspiração potencial média anual oscila na faixa de 1900 a 2000 mm. Características pormenorizadas das estações fluviométricas, assim como informações adicionais sobre o solo, relevo e vegetação das bacias são compilados em FREITAS (1991).

3.4 Banco de Dados

3.4.1 Pluviometria e Deflúvio

As precipitações médias diárias ponderadas nas bacias foram colhidas junto a SIRAC/SRH-CE - Plano Estadual dos Recursos Hídricos (1991) e NOUVELOT et al. (1979). As séries pluviométricas passaram anteriormente por uma análise de consistência e homogeneização.

As descargas médias diárias observadas em cada bacia foram adquiridas por meio dos estudos acima relacionados. Esses dados, bem como, os de pluviometria e evapotranspiração potencial são listados em FREITAS (1991).

3.4.2 Evapotranspiração potencial

Para aplicabilidade do modelo BOUGHTON foram utilizados valores de evapotranspiração mensais médios, em milímetros, para as diversas bacias

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Efetivou-se, para as várias bacias, a calibração automática dos parâmetros dos modelos analisados através do método de Rosenbrock. O trabalho foi desenvolvido em microcomputador compatível com o PC. O processo de validação não foi possível ser efetuado devido à escassez de dados para as bacias.

Tomando como base os valores ótimos encontrados durante o processo de calibração, efetivou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros, fazendo-os variar, em relação aos valores ótimos encontrados, positiva e negativamente, de 5, 10 e 20%. Pôde-se, assim, classificar, para cada bacia, quais os parâmetros pouco sensíveis (PS), medianamente sensíveis (MS) e bastante sensíveis (BS). O resultado desta avaliação encontra-se nas tabelas 1 e 2.

Quanto aos indicadores estatísticos (média, desvio padrão e assimetria), verificou-se que, em geral, o modelo BOUGHTON consegue reproduzi-los melhor que o modelo CN-3S, de acordo com os valores expostos na tabela 3.

Nas figuras 1 e 2, encontram-se, respecti-

vamente, a título de exemplificação, as vazões médias diárias observadas e calculadas, para as bacias hidrográficas de Lavras da Mangabeira e Arneiroz, para os modelos BOUGHTON e CN-3S.

Para o cômputo do desempenho computacional foi avaliado, para fins comparativo, o tempo médio gasto em uma iteração durante o processo de calibração dos parâmetros. O Modelo CN-3S mostrou-se cerca de 14% mais rápido. Em aplicações práticas, porém, essa diferença não traz um ganho econômico maior.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Baseado nos resultados do presente estudo, chegou-se às seguintes conclusões:

- (1) O modelo BOUGHTON apresentou, de modo geral, parâmetros ótimos detentores de mediana sensibilidade. Já para o modelo CN-3S muitos parâmetros foram classificados como sendo pouco sensíveis, isto é, o valor da função objetivo alterou-se bem pouco, para as variações impingidas aos valores ótimos;
- (2) A nível mensal, o modelo BOUGHTON mostrou um ajuste bem mais expressivo, para todas as bacias. Como exemplo, vê figura 3. O modelo CN-3S não obteve, notadamente nos meses chuvosos, vazões calculadas condizentes com os valores históricos. A nível diário, novamente, o modelo BOUGHTON demonstrou superioridade na reprodução dos deflúvios;
- (3) O modelo BOUGHTON reproduziu satisfatoriamente as vazões observadas, tanto para as bacias de maior área de drenagem, quanto para as de menor. De maneira adversa comportou-se o modelo CN-3S;
- (4) O modelo BOUGHTON reproduziu com maior precisão os parâmetros estatísticos média, desvio padrão e assimetria;
- (5) Em termos de programação, aplicabilidade e dados necessários a implementação dos modelos, o que se pode concluir é que os modelos apresentam dificuldades equivalentes;
- (6) Com base nos motivos acima mencionados, pode-se afirmar que o modelo BOUGHTON apresenta-se com um potencial e confiabilidade de uso bem maior que o modelo CN-3S, em aplicações as bacias do semi-árido semelhantes às estudadas.

Em trabalhos futuros deve ser levado em consideração, entretanto, os seguintes aspectos:

- (1) A conselha-se a incorporação aos modelos estudados de algoritmos distribuídos de infiltração e percolação, analisando, assim o desempenho de cada modelo;

(2) Recomenda-se que seja feito um rigoroso estudo acerca do transporte de água na zona não saturada do solo e do armazenamento subterrâneo no semi-árido. Devido as características do sub-solo, notadamente de natureza cristalina, estes fatores tornam-se determinantes para um melhor desempenho dos modelos chuva-vazão;

(3) Sugere-se, por fim, que maiores esforços sejam voltados no estudo de modelos distribuídos baseados na Física do Solo, bem como de modelos de simulação conjunta (escoamento superficial e de base), de forma a estabelecer uma adequada modelagem desta parte do ciclo hidrológico, em bacias do semi-árido.

Tabela 1 - Classificação dos Parâmetros - Modelo BOUGHTON

	Arneiroz	Iguatu	Lapinha	Lavras	Matriz	Salobro
RETMAX	BS	PS	BS	BS	BS	BS
DSMAX	MS	MS	PS	MS	MS	MS
CONST	MS	BS	PS	MS	MS	MS
EVPMAX	MS	PS	BS	PS	MS	PS
SSMAX	MS	MS	MS	MS	MS	MS
DELAY	MS	MS	MS	BS	BS	BS
C	MS	MS	BS	MS	MS	MS
FK	PS	MS	BS	MS	MS	MS
FO	PS	MS	MS	MS	PS	MS

(BS) - Bastante Sensível

(PS) - Pouco Sensível

(MS) - Medianamente Sensível

Tabela 2 - Classificação dos Parâmetros - Modelo CN-3S

	Arneiroz	Iguatu	Lapinha	Lavras	Matriz	Salobro
CNI	BS	BS	PS	PS	PS	MS
BETA	MS	MS	PS	PS	PS	PS
K0	MS	PS	PS	PS	PS	PS
K1	PS	PS	MS	MS	MS	PS
K2	PS	PS	PS	PS	BS	PS

(BS) - Bastante Sensível

(PS) - Pouco Sensível

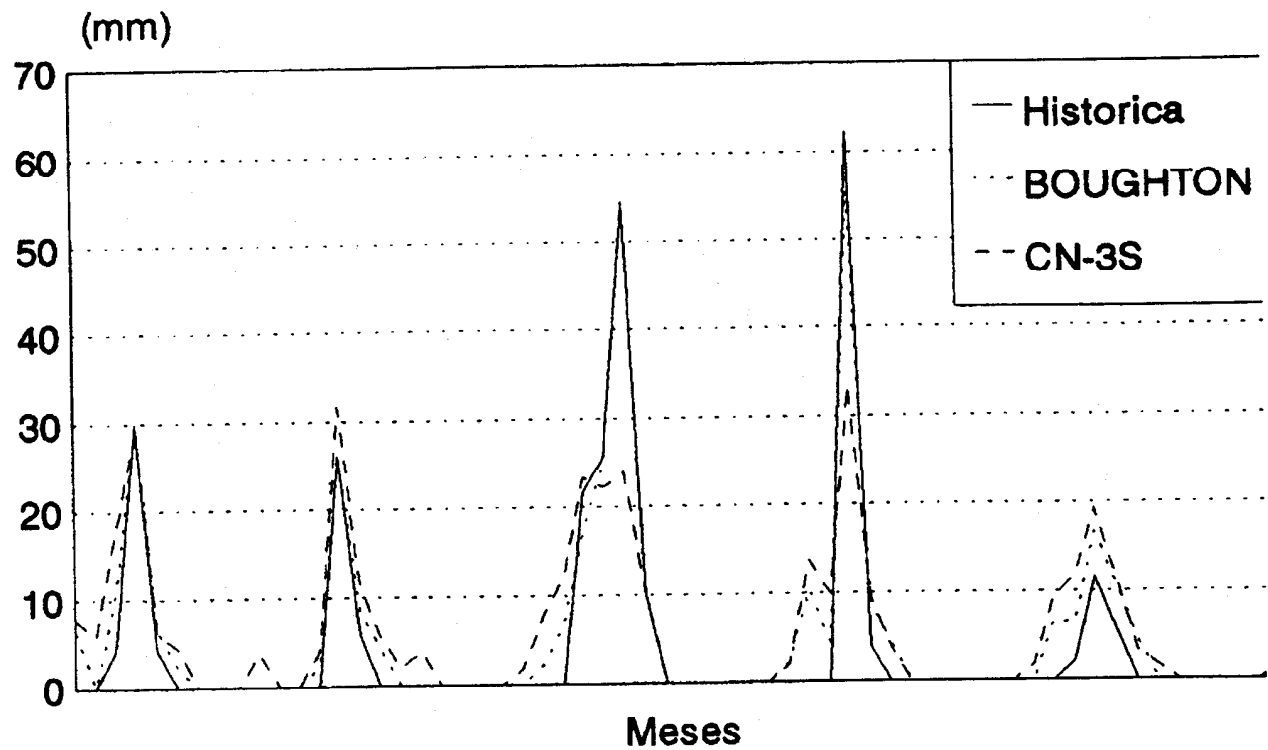
(MS) - Medianamente Sensível

Tabela 3 - Indicadores Estatísticos*

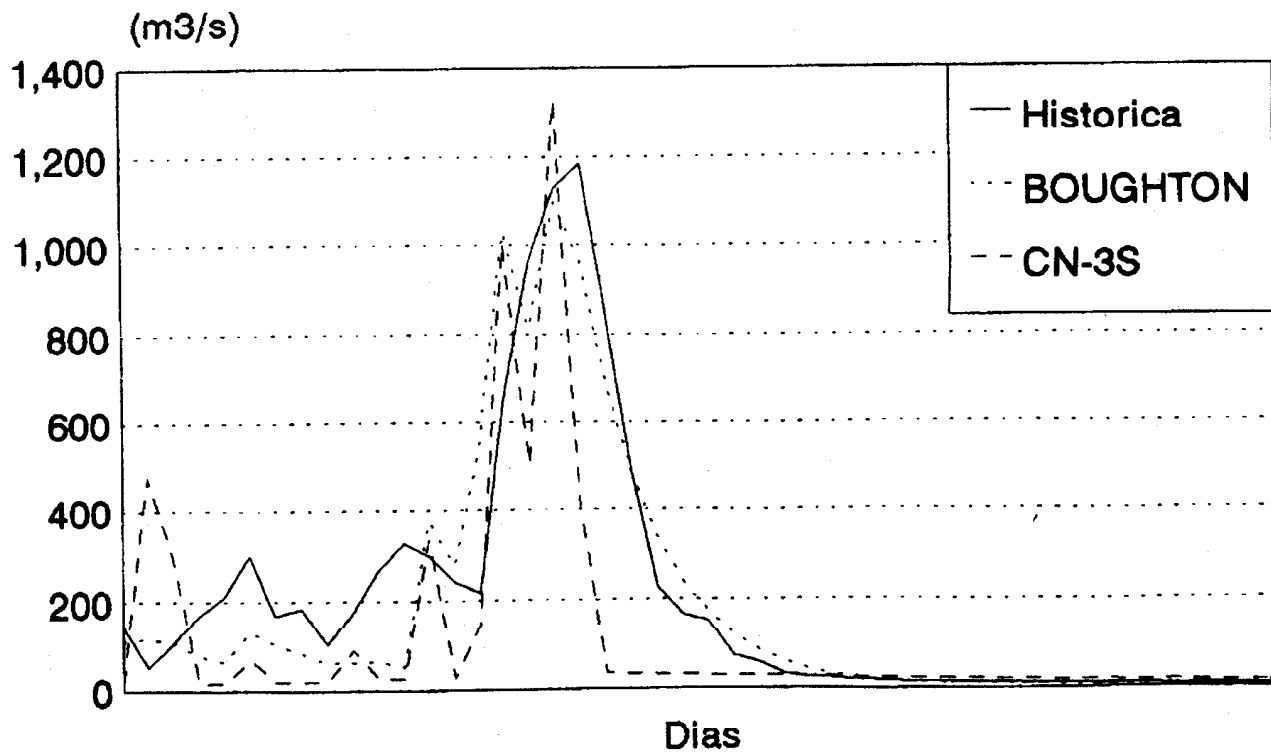
BACIA	HISTÓRICO Média Desvio Padrão Assimetria	BOUGHTON Média Desvio Padrão Assimetria	CN-3S Média Desvio Padrão Assimetria
Armeiroz	6.79	7.11	8.94
	57.11	54.58	75.41
	15.01	15.15	26.92
Iguatu	38.12	44.94	52.10
	160.37	146.20	193.95
	8.56	9.31	13.41
Lapinha	4.43	4.58	5.73
	14.42	18.44	7.93
	6.75	5.23	1.91
Lavras	15.32	18.51	21.35
	58.49	55.87	30.83
	7.43	8.66	2.15
Matriz	0.38	0.44	0.66
	2.00	1.74	0.70
	9.50	9.36	1.40
Salobro	0.02	0.02	0.02
	0.11	0.06	0.10
	10.95	6.24	17.00

* Média e Desvio Padrão em m³/s

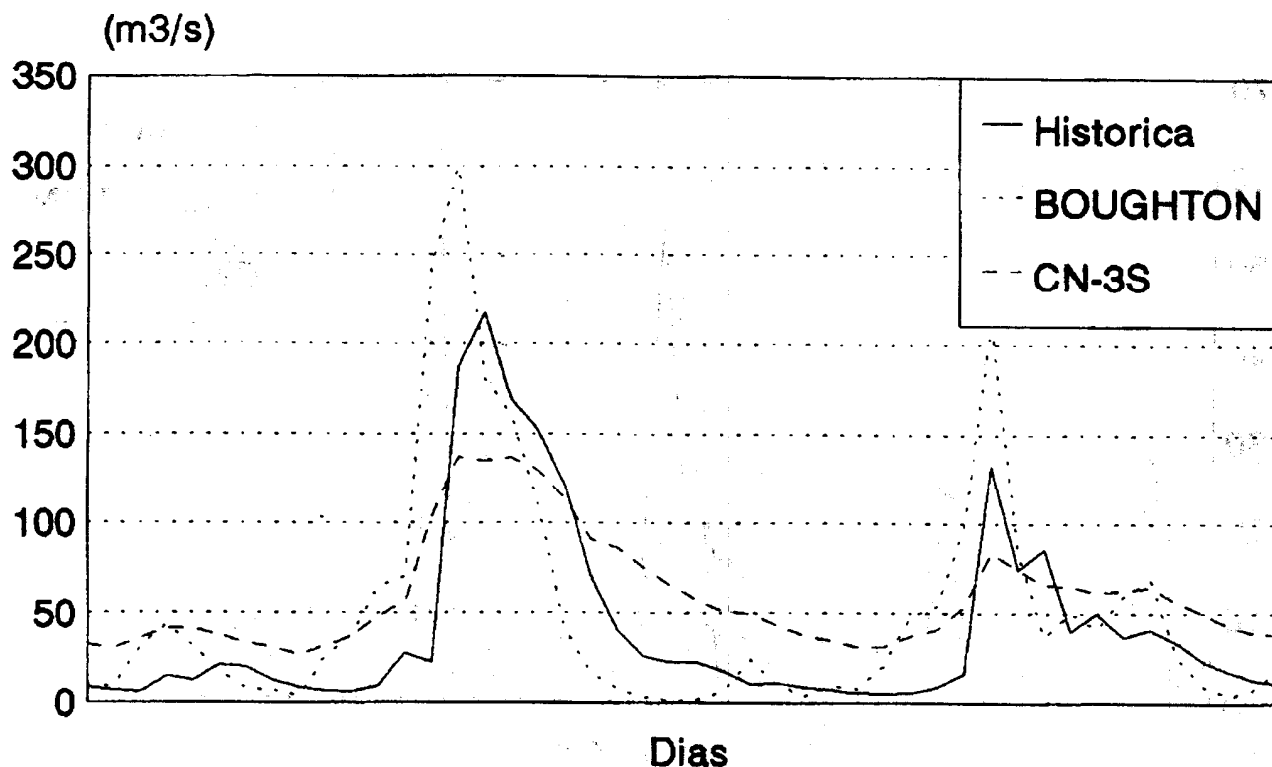
Lâminas Médias Mensais Lavras (1965 - 1969)



Vazões Médias Diárias Arneroz (15.03.81 - 15.04.81)



Vazões Médias Diárias Lavras (1965 - 1969)



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. CANEDO, P.M., "Hidrologia Superficial", in: Engenharia Hidrológica, Rio de Janeiro, ABRH, Ed, da UFRJ, vol 2, 1989.
02. CLARKE, R.T., "Mathematical Models in Hydrology", Environmental Science Series, New York, 1973b, 334p.
03. FLEMING, G., "Computer Simulation Techniques in Hydrology", American Elsevier Publ. Co. Inc., N.Y., 1975, 334p.
04. FREITAS, M.A.S., "Considerações Sobre Modelos Determinísticos Chuva Vazão Aplicados às Bacias do Semi-Árido Brasileiro", Dissertação de Mestrado, UFC, 1991.
05. FREITAS, M.A.S. & PORTO, A.S., "Considerações Sobre um Modelo Determinístico Chuva-Vazão Aplicado às Bacias do Semi-Árido Nordeste", Revista Tecnologia, Universidade de Fortaleza - UNIFOR, ano 11, n. 11, 1990
06. KUCZERA, G., "Improved Parameter Inference in Catchment Models 1. Evaluating Parameter Uncertain", Water Resources Research, vol. 19, n. 5, p. 1151-1162, 1983.
07. KUSTER, J.L. & MIZE, J.H., "Optimization Techniques with FORTRAN", McGraw Hill Book Company, 1976.
08. LINSLEY, R.K. Jr., "Rainfall-Runoff Models - An Overview", Rainfall-Runoff Relationships, Edit by V.P. Singh, Water Resources Research, p.3-22, 1981.
09. NOUVELOT, J.F., FERREIRA, P.A.S. & CADIER, E., "Bacia Representativa do Riacho do Navio-Relatório Final", SUDENE, Serie Hidrológica, n. 6, 1979
10. ROSENBROCK, H.H., "An Automatic Method for Finding The Greatest or Least Value of a Function", The Computer Journal, 3, p. 175-184, 1960.
11. SHERMAN, L.W., "Streamflow from Rainfall by The Unit-Graph Method". Eng. News-Record, 108, 1932.
12. SIRAC/SRH-CE-plano Estadual dos Recursos Hídricos, Estudos Hidrológicos, 1991.
13. TABORGA, J. & FREITAS, M.A.S., "Simulação da Lâmina de Escoamento Mensal", VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, vol. 2, p.558-570, 1987.
14. TODINI, E., "Rainfall-Runoff Modeling - Past, Present and Future", Journal of Hydrology, 100, p.341-352, 1988.
15. VIESSMAN, W. et al., "Introduction to Hydrology", IEP a DUN-Donnelley Publisher, New York, 1977, 704p.