

Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos

V. 3  
N. 1  
Jan 1981

# revista de hidrologia e recursos hídricos

REVISTA DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS - V. 3 N. 1 JANEIRO/JUNHO 1981



# revista de hidrologia e recursos hídricos

Volume 3  
Número 1  
Jan./Jun. 1981

Publicação da Associação Brasileira  
de Hidrologia e Recursos Hídricos (ABRH)

## S U M Á R I O

	Páginas
Quantificação e mapeamento das disponibilidades hídricas superficiais: Região Noroeste do Estado de Minas Gerais por SÉRGIO MENIN T.DE SOUZA, CARLOS E.M.TUCCI, RUY L.SILVEIRA e BRUNO S.RESENDE	1-30
Operação hidráulica de reservatórios: Enfoques probabilísticos e determinísticos de condições de contorno por DORON GRULL	31-41
Ritmo e variabilidade das precipitações no vale do rio Paraíba do Sul: O caso de Resende por M.R. MOUSINHO DE MEIS, A.L. COELHO NETTO e P.T.T.M.OLIVEIRA	43-56
Simulação do estado atual e níveis de tratamento para redução da poluição no rio dos Sinos por LIANA MORETTI e CARLOS E. M.TUCCI	57-80
Aplicação de modelos regionais e conceituais em estudos hidroenergéticos: Uma abordagem bayesiana por J.M. DAMAZIO e J. KELMAN	81-97
Instruções gerais para apresentação de trabalhos à Revista de Hidrologia e Recursos Hídricos	99-102

FOR

J.M. Damazio<sup>2</sup>, e J.Kelman<sup>2,3</sup>

RESUMO -- Os dados fisiográficos, pluviométricos e fluviométricos para a Bacia do alto e médio Tocantins obtidos dos arquivos em "malha quadrada" do Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia (SUDAM) alimentam um modelo de regressão com o objetivo de obter estimativas regionais para o valor esperado ( $\mu$ ) e variância ( $\sigma^2$ ) da vazão média anual. Um modelo conceitual do balanço hídrico é utilizado para completar o registro fluviométrico da localidade de Carolina a partir de registros de precipitação, resultando daí estimativas locais para o valor esperado e variância. Utiliza-se o teorema de Bayes para combinar ambas as estimativas. O mercado energético que pode ser suprido com confiabilidade de 95% pelo aproveitamento hidroelétrico em Carolina é avaliado de duas formas: i) usando as estimativas de  $\mu$  e  $\sigma^2$  fornecidas pela série medida de vazões anuais, ii) usando as estimativas combinadas. Os resultados indicam que o uso dos modelos regionais e conceituais reduzem em 25% ( $100 \times (1175 - 885)/1175$ ) a estimativa da capacidade de geração do aproveitamento de Carolina. A consideração das incertezas quanto aos valores de  $\mu$  e  $\sigma^2$  mostra que o risco associado a uma certa demanda energética pode estar situado em uma faixa bastante ampla.

#### INTRODUÇÃO

A avaliação de recursos hídricos de áreas inexploradas, como a Amazônia, é frequentemente realizada com escassez de dados hidrológicos. Usualmente também não estão disponíveis outras informações potencialmente úteis, tais como dados topográficos, pedológicos, geológicos, etc. Felizmente estas informações dependem de medições que podem ser feitas num espaço de tempo relativamente curto (por exemplo, projeto RADAM), ao contrário do banco de dados hidrológicos, que só pode crescer lentamente.

Este estudo pretende analisar o efeito do uso de informações regionais e meteorológicas, bem como da imprecisão existente nas estimativas de propriedades probabilísticas, na avaliação do mercado de energia capaz de ser suprido por um determinado aproveitamento hidroelétrico.

A região estudada, abrange uma área de 300.000 km<sup>2</sup> na região centro-oeste brasileira localizada entre as latitudes 5°S e 18°S, e entre as longitudes 53°W e 46°W, e engloba a bacia hidrográfica do alto e médio curso do rio Tocantins.

<sup>1</sup>Este artigo resulta parcialmente das atividades de pesquisa do projeto 7078 CEPEL, que recebe o apoio da ELETROBRÁS.

<sup>2</sup>Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL

<sup>3</sup>Professor Visitante da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia COPPE/UFRJ

Em 1975 a ELETRONORTE terminou o inventário dos recursos hidroenergéticos do rio Tocantins e parte do rio Araguaia. Segundo o relatório, Engevix e Ecotec (1975), os trabalhos hidroológicos foram bastante dificultados pela falta de dados. Com efeito, para uma área inventariada de 545.000 km<sup>2</sup>, haviam apenas 36 postos fluviométricos que juntos totalizavam 248 anos. A divisão de quedas selecionada prevê 18 aproveitamentos localizados na área analisada por este texto, que juntos representam 3996 Mw firmes. Esta investigação se concentrará no aproveitamento de Carolina Alto, descrito em Engevix e Ecotec (1975). As características que interessam a este trabalho são:

N.A máximo no reservatório	- 197,5 m
N.A normal a jusante	- 144,6 m
Energia Firme	- 952 Mw
Volume utilizado no local	- 36,88 x 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>
Taxa de Evaporação	- 1009 mm/ano
Rendimento	- 0,83
Área de Drenagem	- 276897 km <sup>2</sup>

além das curvas cota x volume x área.

Neste trabalho o intervalo de tempo considerado é de um ano. Assume-se que as vazões anuais afluentes ao reservatório não possuem dependência serial e têm distribuição de probabilidades normal.

#### INFORMAÇÕES AMOSTRAIS

Considerou-se o histórico de vazões ao posto de Carolina nos períodos hidroológicos (outubro a setembro) de 1962 a 1972, apresentados em Engevix e Ecotec (1975). As estatísticas suficientes da série anual (em m<sup>3</sup>/s) são dados por:

$$\bar{z} = \frac{\sum z_i}{N} = 3537 \quad (1)$$

$$n = N = 11 \quad (2)$$

$$s^2 = \frac{\sum (z_i - \bar{z})^2}{N - 1} = 290727 \quad (3)$$

$$v = N - 1 = 10 \quad (4)$$

sendo z<sub>i</sub>, i=1, ... N as vazões medidas.

Os momentos de  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$ , respectivamente média e variância da vazão anual fornecidos por esta amostra, conforme Raiffa e Schlaifer (1969) são dados por:

$$E(\mu_x | amostra) = \bar{z} = 3537 \quad (5)$$

$$V(\mu_x | amostra) = \frac{vs^2}{n(v-2)} = 33037 \quad (6)$$

$$E(\sigma_x^2 | amostra) = \frac{vs^2}{v-2} = 363409 \quad (7)$$

$$V(\sigma_x^2 | amostra) = \frac{2v^2s^4}{(v-2)^2(v-4)} = 4,402 \times 10^{10} \quad (8)$$

#### O MODELO CONCEITUAL

Nos processos dinâmicos que ocorrem dentro das bacias hidrográficas tem grande importância a relação entre a capacidade que o sistema tem de transferir a água do solo para a atmosfera, e a umidade disponível para evaporação. Grande parte dos modelos conceituais hidroológicos definem "evaporação potencial" como a evaporação real que aconteceria caso houvesse um constante fornecimento de umidade para o processo. Em situações nas quais a bacia esteja totalmente úmida, esta seria a taxa de evaporação. Porém, quando restringe-se a evaporação, por exemplo por uma deficiência de umidade do solo, provoca-se um aumento da temperatura, maiores velocidades de vento e umidades de ar decrescentes com o tempo. Obviamente aumenta-se o valor da "evaporação potencial".

Por outro lado, alimentando-se continuamente a evaporação, aumenta a umidade do ar, diminui a velocidade dos ventos, reduzindo-se a "evaporação potencial". O princípio de Bouchet (1963) diz que a "evaporação potencial" é igual a parcela que resta da radiação solar absorvida depois da ocorrência da evaporação sendo o fator de controle a umidade disponível. Este princípio pode ser escrito por:

$$W = (1-a) R_i \quad (9)$$

$$E_p = W - E \quad (10)$$

onde E<sub>p</sub> é a evaporação potencial, a o albedo da superfície, R<sub>i</sub> a incidência de energia solar, E a evaporação e W a radiação solar absorvida. O controle exercido pela umidade disponível na divisão da energia em evaporação e evaporação potencial é influenciado pelas características da bacia, tais como: declividade, tipo de vegetação, distribuição espaço-temporal da umidade disponível. Solomon (1967) propôs o uso da equação empírica de Turc que se escreve:

$$E = \frac{P \cdot E_p}{(E_p^2 + P^2)^{0,5}} \quad (11)$$

onde P é a umidade disponível, ou seja, a precipitação quando se considera intervalos de tempo longo.

Combinando (10) e (11), obtêm-se uma equação relacionando evaporação e precipitação.

$$P = \frac{E \cdot (W - E)}{(W(W - 2E))^{1/2}} \quad (12)$$

Conhecida a precipitação e a evaporação facilmente calcula-se a vazão, como:

$$R = P - E \quad (13)$$

Normalmente o número de estações climatológicas que medem insolação incidente e albedo é muito pequeno ou nulo. Por isso, tem-se desenvolvido relações entre as condições atmosféricas (ex.: horas de sol) e a percentagem da insolação no topo da atmosfera que chega à superfície do solo. Uma das mais conhecidas é a relação de Penman:

$$\frac{R_i}{R_a} = 0,18 + 0,55 \frac{S}{S_a} \quad (14)$$

onde  $R_a$  é a insolação no topo da atmosfera,  $S_a$  o número máximo de horas de sol e  $S$  o número real de horas de sol. Tanto  $R_a$  e  $S_a$  estão tabeladas em função da latitude. O valor médio de  $S$  pode ser estimado de dados de estações climatológicas convencionais. Para a estimativa do albedo existem tabelas reportando medições para diversos tipos de superfície.

Uma outra abordagem seria obter o valor da radiação solar absorvida a partir do registro de vazão e precipitação. Conforme Solomon (1967), 2 a 5 anos são suficientes para uma estimativa bem segura da radiação solar absorvida em zonas tropicais equatoriais. Como se verá adiante, esta foi a alternativa adotada.

A solução de (12) para  $W$  é:

$$W = E \left( 1 + \frac{P}{(P^2 - E^2)^{0,5}} \right) \quad (15)$$

#### Extensão dos Dados

O arquivo de dados de precipitação usado (tabela 1) abrange o período de 1949 a 1974. As medições de vazão em Carolina cobrem os anos hidrológicos de 1962 a 1972. Os valores de precipitação na bacia de Carolina foram calculados através do arquivo da malha quadrada. Em cada ano, a precipitação de cada quadrícula da bacia de Carolina foi estimada como a média das precipitações medidas, ponderadas pelo inverso da distância entre o quadrado e o local da medição. Usando os valores médios do período 62-72 de precipitação e evaporação em (15) obtém-se  $W = 2571$  mm/ano. Este valor corresponderia a um albedo de 0,12 para a bacia se aceitarmos  $R_i = 2918$  mm/ano obtido dos mapas de radiação solar incidente no Brasil, publicado pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (1978). Solomon (1967) analisou dados equatoriais e tropicais de todo o mundo encontrando albedos entre 0,10 e 0,15.

A figura 1 apresenta as relações entre precipitação e, evaporação fornecidas pelo modelo para  $W = 2571$  mm/ano. Este modelo permitiu transformar os dados de precipitação de anos sem medida de vazão em Carolina em uma série de vazões anuais correspondente aos períodos de 1949-61 e 1972-73, que pode ser encarada como outra informação amostral.

As estatísticas suficientes desta série são:

$$\bar{z} = 3181 \quad (16)$$

$$n = 4,76 \quad (17)$$

$$s^2 = 1.302.065 \quad (18)$$

$$v = 9,36 \quad (19)$$

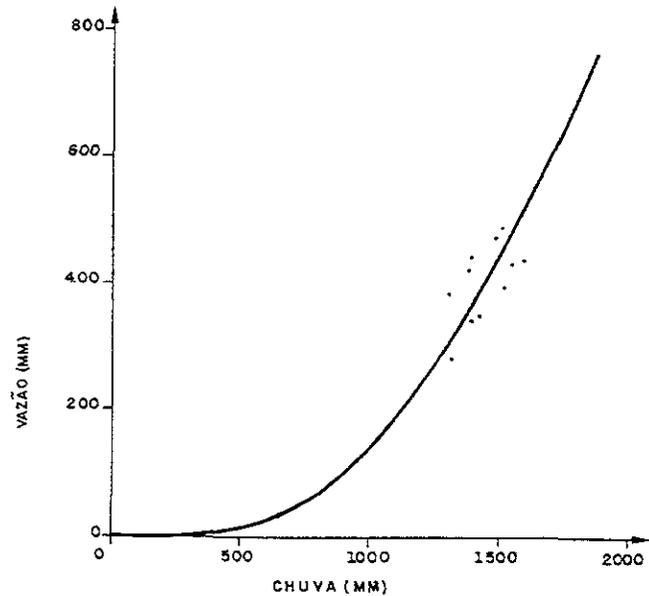
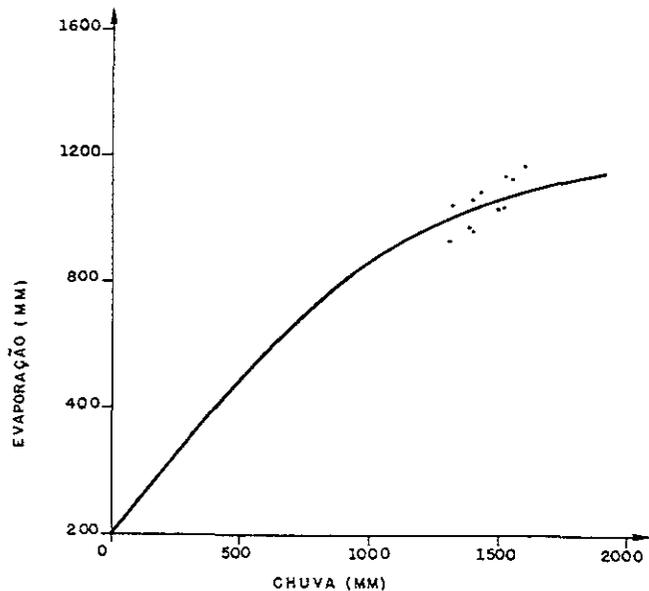
onde  $\bar{z}$  e  $s^2$  foram calculados como (1) e (3).

As estatísticas  $n$  e  $v$ , que indicam o número de anos equivalentes de informação para  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$  respectivamente, foram calculados por:

"Tabela 1. Estações Pluviométricas".

ESTAÇÃO	CÓDIGO	COLUNA	LINHA	Nº DE ANOS	PERÍODO
Alto Paraíso	1000	46	30	4	70-73
Alvorada	1005	30	46	2	72-73
Alv. do Norte	1010	55	27	3	69,72-73
Campinacu	1015	36	34	4	68-69,72-73
Carolina	1020	45	97	25	49-73
Cavalcante	1025	46	33	5	69-73
Ceres	1030	25	18	3	64,72-73
Colinas	1035	40	31	5	69-73
Colinas de Goiás	1040	36	91	2	72-73
Damianópolis	1045	59	26	5	69-73
Dianópolis	1050	53	54	2	72-73
Estrela do Norte	1055	31	33	2	72-73
Fátima	1060	31	63	1	72
Faz. Ingazeiro	1065	56	32	2	72-73
Faz. Lobeira	1070	37	55	2	72-73
Flores de Goiás	1075	46	25	3	69,72-73
Formosa	1080	47	16	25	49-73
Goiânia	1085	30	18	3	71-73
Goiatins	1090	48	93	2	72-73
Gurupi	1095	31	53	2	72-73
Itaguatins	1100	46	113	3	69,72-73
Itapuranga	1105	21	15	5	69-73
Mir. do Norte	1110	37	75	3	69,72-73
M. Alegre	1115	52	40	3	69,72-73
Niquelândia	1120	36	26	5	69-73
Nova Roma	1125	52	32	2	72-73
Novo Acordo	1130	43	70	2	72-73
Paraíso do Norte	1135	32	69	2	72-73
Paraná	1140	44	42	25	49-73
Pedro Afonso	1145	39	81	9	49-57
Peixe	1150	35	50	4	70-73
Petrolina	1155	28	10	1	64
Pirenópolis	1160	31	13	10	49-52,55,69-73
Ponte Paraná	1165	48	36	3	69,72-73
Ponte Quebralinha	1170	32	21	3	69,72-73
Porto Gilândia	1175	43	63	3	69,72-73
Porto Nacional	1180	36	63	25	49-73
Porto Real	1185	41	79	5	69-73
Porto Rio Bagagem	1190	38	27	2	72-73
Porto Uruaçu	1195	29	25	6	64,69-73
Rubintaba	1200	23	19	1	64
Sama	1205	38	36	3	69,72-73
Santa Sê	1210	46	17	3	69,72-73
São Domingos	1215	58	37	3	69,72-73
São Félix	1220	40	34	2	70-71
São João da Aliança	1225	46	24	3	71-73
Taguatinga	1230	57	48	22	49-66,70-73
Tocantinópolis	1235	46	107	5	69-73
Tupirantins	1240	39	87	3	69,72-73
Uruana	1245	23	15	3	71-73

OBS.: Os totais anuais foram calculados para o ano hidrológico que inicia em outubro.



"Figura 1. Relações entre Precipitação, Vazão e Evaporação".

$$n = 0,34 N \quad (20)$$

$$v = 0,72 (N-1) \quad (21)$$

onde os fatores de redução 0,34 e 0,71 foram obtidos empiricamente por Damazio (1980), comparando médias e variâncias de séries medidas e simuladas pelo modelo para o posto de Porto Nacional no Rio Tocantins. A combinação das duas amostras é feita calculando-se novas estatísticas suficientes:

$$\bar{z} = \frac{n_1 \bar{z}_1 + n_2 \bar{z}_2}{n_1 + n_2} \quad (22)$$

$$n = n_1 + n_2 \quad (23)$$

$$v = v_1 + v_2 \quad (24)$$

$$s^2 = \frac{v_1 s_1^2 + n_1 \bar{z}_1^2 + v_2 s_2^2 + n_2 \bar{z}_2^2 - n \bar{z}^2}{v} \quad (25)$$

onde  $\bar{z}_i$ ,  $n_i$ ,  $v_i$  e  $s_i^2$ ,  $i = 1, 2$ , são as estatísticas suficientes de cada amostra (Raiffa e Schlaifer, 1969). A tabela 2 compara os momentos de  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$  (fórmulas (5) a (8)) fornecidos por cada série e pela combinação das duas séries.

"Tabela 2. Momentos de  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$ . Uso do Modelo Conceitual".

INFORMAÇÃO	$E(\mu_x)$	$V(\mu_x)$	$E(\sigma_x^2)$	$V(\sigma_x^2)$
SÉRIE MEDIDA				
$n=11; v=10$	3537	33 037	363 409	$4,402 \times 10^{10}$
SÉRIE DO MODELO CONCEITUAL				
$n=4,76; v=9,36$	3181	347 875	1 655 887	$102,312 \times 10^{10}$
SÉRIE ESTENDIDA (AMOSTRAL + MODELO CONCEITUAL)				
$n=15,76; v=19,36$	3429	56 899	896 730	$10,470 \times 10^{10}$

#### O MODELO REGIONAL

O processamento de informações regionais pode ser facilitado pelo uso de um sistema racional de arquivos capaz de ser manuseado de forma simples por computadores. Isto pode ser alcançado retalhando a região numa malha de quadrados. O arquivo pode ser criado de forma que cada registro contenha todas as informações disponíveis para um certo quadrado, inclusive sua localização em relação ao referencial adotado. Este processo foi inicialmente aplicado no Canadá (Solo mon, 1968). O governo brasileiro, através do Ministério do Interior e da Superintendência de Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM), firmou convênio com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), para o desenvolvimento conjunto de estudos hidrometeorológicos na Amazônia através do Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia (PHCA). Inicialmente, foi feito em PHCA (1979) um es

tudo piloto na bacia do Tocantins a montante de Itaguatins. A região foi dividida em 2485 quadrados com aproximadamente 11 km x 11 km. Foi criado um arquivo fisiográfico, contendo informações topográficas, de solo, de vegetação e de geologia superficial. Foi criado também um outro arquivo definindo as condições de drenagem na área. A partir desses arquivos, operações tais como identificação de áreas de drenagem de quaisquer postos e cálculo de suas respectivas características médias são facilmente executadas por computadores. As informações topográficas deste arquivo e os dados hidrológicos registrados até 1974 na região foram usados em modelos de regressão multivariada linear para a definição de equações de predição para a média e variância anual da vazão líquida na bacia do rio Tocantins. Não fizeram parte desta aplicação os dados sobre tipo de solo, vegetação e geologia superficial, já que segundo o PHCA (1979) estas informações não são seguras e produzem resultados pouco confiáveis. A seguir é apresentada uma descrição sumária das equações utilizadas em regressão multivariada linear e o uso do arquivo de malha quadrada na obtenção de estimativas para a vazão.

#### Modelos de Regressão Multivariada Linear

As variáveis que fazem parte de modelos de regressão multivariada linear se classificam em variáveis independentes e variáveis dependentes ou variáveis-resposta. O objetivo da análise é conhecer o efeito nas variáveis-resposta, causado por alterações nas variáveis independentes (ou em subconjuntos delas) de modo que se possa fazer predições com nível de incerteza conhecido.

O modelo proposto é:

$$Y = X\beta + \epsilon \quad (26)$$

onde,

- Y = vetor (n x 1) contendo n observações da variável-resposta.
- $\beta$  = vetor (p x 1) de coeficientes, desconhecido a priori e cuja estimativa é denotada por b.
- X = matriz (n x p) contendo n observações das p variáveis independentes consideradas.
- $\epsilon$  = vetor (n x 1) contendo as n perturbações, desconhecidas a priori, cuja estimativa é denotada por e.

A inclusão do vetor de perturbações na equação (26) é devida a erros de medição, à inadequacidade do modelo e/ou à aleatoriedade intrínseca da natureza. Em geral, propõe-se:

$$E(\epsilon) = 0 \quad (27)$$

$$V(\epsilon) = V \cdot \sigma^2 \quad (28)$$

onde  $\sigma^2$  é um escalar desconhecido cuja estimativa é denotada por  $s_r^2$  e V é uma matriz (n x n) conhecida.

O estimador linear, não-tendencioso, de menor variância de  $\beta$ , é dado por:

$$b = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} Y \quad (29)$$

cujas matrizes de média e covariância são:

$$E(b) = \beta \quad (30)$$

$$V(b) = (X^T V^{-1} X)^{-1} \sigma^2 \quad (31)$$

O estimador de  $\sigma^2$  é:

$$s_r^2 = \frac{e^T V^{-1} e}{n - p} \quad (32)$$

Uma estimativa para a variável dependente associada aos valores das variáveis independentes de um vetor (1 x p),  $X_0$  é dada por:

$$Y_0 = X_0 b \quad (33)$$

De momentos, dadas pelas fórmulas:

$$E(Y_0) = X_0 \beta \quad (34)$$

$$V(Y_0) = X_0 (X^T V^{-1} X)^{-1} X_0^T \sigma^2 \quad (35)$$

que podem ser usadas substituindo-se  $\beta$  e  $\sigma^2$  por b e  $s_r^2$ , dados por (29) e (32). Para se levar em conta a incerteza em  $\sigma^2$  deve-se multiplicar  $s_r^2$  pelo fator  $(\frac{n-p}{n-p-2})$ , (Raiffa e Schlaifer, 1969).

Modelos para a Média e Variância de Vazão Anual -- Foram usados dados de 24 estações pluviométricas e listadas na tabela 3. As possíveis variáveis independentes consideradas foram a área de drenagem em km<sup>2</sup> (Ad), as características físicas do arquivo do PHCA, adotando-se para cada grandeza o valor médio ao longo das quadrículas formadoras da área de drenagem; e a precipitação média na bacia. Esta última foi obtida através de uma regressão relacionando a precipitação num posto pluviométrico com os dados do arquivo do PHCA (Damazio, 1980). A escolha das variáveis a serem consideradas nas regressões foi feita através do "stepwise regression method" (ver, por exemplo, Draper e Smith (1966)).

Para a variância, a matriz V da equação (28) é formada pelos elementos  $v_{\sigma^2}(i,j)$  dados por Gomide (1979) como:

$$v_{\sigma^2}(i,j) = r_{\sigma^2}(i,j) \cdot 2 \frac{\sigma_i^2 \sigma_j^2}{(n_i \cdot n_j)^{0,5}} \quad (36)$$

sendo  $n_i$  e  $n_j$  número de anos dos registros dos postos i e j,  $r_{\sigma^2}(i,j)$  a correlação entre as variâncias amostrais dos postos i e j, dada por (Damazio, 1980) como:

$$r_{\sigma^2}(i,j) = \frac{n}{(n_i \cdot n_j)^{0,5}} r^2(i,j) \quad (37)$$

onde n é o número de anos em comum dos registros dos postos i e j e  $r(i,j)$  é a correlação entre as vazões anuais do posto i e j. Os coeficientes de correlação  $r(i,j)$  foram calculados pela fórmula:

$$r(d) = 0,9681 e^{-0,0014d} + 0,0319 \quad (38)$$

sendo d a distância em km entre os postos i e j. Esta equação foi obtida de da

dos de postos nas regiões sul e sudeste do Brasil (Damazio, 1980).

Como os valores de  $\sigma_i$  são desconhecidos, deve-se aplicar a equação (29) de forma iterativa até que os valores obtidos em (33) para  $\hat{\sigma}_i^2$  converjam para os valores usados em (36) (Gomide, 1979).

Para o valor esperado, a matriz V na equação (28) é formada por elementos  $v_{\mu}(i,j)$  dados por Gomide (1979) como:

$$v_{\mu}(i,j) = r_{\mu}(i,j) \frac{\sigma_i \sigma_j}{(n_i \cdot n_j)^{0,5}} \quad (39)$$

sendo  $r_{\mu}(i,j)$  a correlação entre as médias amostrais dos postos i e j, calculada por:

$$r_{\mu}(i,j) = \frac{n}{(n_i \cdot n_j)^{0,5}} r(i,j) \quad (40)$$

Os valores de  $\sigma_i$  em (39) devem ser aqueles obtidos pelo processo iterativo do modelo para a variância.

"Tabela 3. Estações Fluviométricas".

ESTAÇÃO	CÓDIGO	COLUNA	LINHA	Nº DE ANOS	PERÍODO
P. Quebra Linha	2005	33	20	3	67-68,71
Jaraguá	2010	27	13	2	71,72
Uruana	2020	23	15	4	67-68,71-72
Ceres	2025	25	18	2	71-72
Porto Uruaçu	2050	30	25	4	67-68,71-72
P. Rio Bagagem	2070	38	27	2	71-72
Tocantinzinho	2090	39	28	1	72
São Félix	2105	39	36	7	61-66,71
Nova Roma	2150	52	32	1	72
Ponte Paraná	2160	48	36	2	71-72
Barra Palma	2189	42	44	1	72
Paraná	2190	42	44	1	72
Peixe	2205	35	50	2	71-72
Jacinto	2215	34	51	1	72
Faz. Lobeira	2225	37	55	2	71-72
Porto Nacional	2235	36	63	24	49-72
Mir. do Norte	2250	36	75	4	69-72
Porto Gilândia	2260	43	63	4	69-72
Novo Acordo	2270	43	70	1	72
Porto Real	2290	40	79	4	69-72
Tupirantins	2310	39	87	4	69-72
Goiatins	2325	48	93	1	72
Tocantinópolis	2360	46	107	18	55-72
Itaguatins	2370	46	113	4	69-72

OBS.: As estatísticas anuais foram calculadas para o ano hidrológico, considerado começando em outubro. As estações com 1 ano hidrológico não foram usadas no modelo para a variância anual.

O "stepwise regression method" escolheu para prever a variância as variáveis S e Ad. Como o processo iterativo da variância não convergiu em 500 iterações, abandonou-se a variável S e obteve-se a equação de predição:

$$\sigma_q^2 = 5955,2 + 0,05 Ad \quad (41)$$

onde  $\sigma_q^2$  é a variância do escoamento anual em  $mm^2$ .

O valor obtido para  $s_r^2$  foi 1,48. Levando-se em conta a incerteza em  $\sigma^2$  as equações (34) e (35) fornecem para Carolina:

$$E(\sigma_q^2) = 19829 \quad (42)$$

$$V(\sigma_q^2) = 28325238 \quad (43)$$

Para o valor esperado, obteve-se a equação de predição:

$$\mu_q = 790,7 - 0,54 Be + 0,64 Ds + 0,12 En + 1,64 AZ \quad (44)$$

onde  $\mu_q$  é a média do escoamento anual em mm.

O valor obtido para  $s_r^2$  foi 3,4, estatisticamente diferente de 1,00, indicando outra fonte de aleatoriedade além da amostral. Levando-se em conta a incerteza no parâmetro  $\sigma^2$ , (34) e (35) fornecem para Carolina:

$$E(\mu_q) = 375 \quad (45)$$

$$V(\mu_q) = 1358 \quad (46)$$

Para se obter os momentos de  $\sigma_x^2$  e  $\mu_x$ , respectivamente variância e média da vazão anual em potências de  $m^3/s$ , as fórmulas são:

$$E(\sigma_x^2) = A_d^2 \cdot K^2 \cdot E(\sigma_q^2) \quad (47)$$

$$V(\sigma_x^2) = A_d^4 \cdot K^4 \cdot V(\sigma_q^2) \quad (48)$$

$$E(\mu_x) = Ad \cdot K \cdot E(\mu_q) \quad (49)$$

$$V(\mu_x) = A_d^2 \cdot K^2 \cdot V(\mu_q) \quad (50)$$

onde  $K = 3,17097 \times 10^{-5}$  é a constante de conversão de unidades. Logo para Carolina:

$$E(\sigma_x^2) = 1528697 \quad (51)$$

$$V(\sigma_x^2) = 1,6835 \times 10^{11} \quad (52)$$

$$E(\mu_x) = 3291 \quad (53)$$

$$V(\mu_X) = 104703 \quad (54)$$

Os momentos acima, definem uma distribuição "a priori",  $f'(\mu_X, \sigma_X^2)$ , da forma normal-gama invertida de parâmetros dados em Damazio (1980) por:

$$\bar{z}' = E(\mu_X) = 3291 \quad (55)$$

$$n' = \frac{E(\sigma_X^2)}{V(\mu_X)} = 14,6 \quad (56)$$

$$v' = \frac{2 E(\sigma_X^2)}{V(\sigma_X^2)} = 27,8 \quad (57)$$

$$s'^2 = \frac{v'-2}{v'} E(\sigma_X^2) = 1418719 \quad (58)$$

A combinação das informações amostrais e regionais pelo teorema de Bayes é feita usando-se os parâmetros acima como se fossem estatísticas suficientes de uma amostra hipotética através das fórmulas (22) a (25). As estatísticas combinadas obtidas são parâmetros da distribuição posterior,  $f''(\mu_X, \sigma_X^2)$ , também da forma normal-gama invertida.

A tabela 4 compara os momentos de  $\mu_X$  e  $\sigma_X^2$  fornecidos pela série estendida, pelos modelos de regressão e pela combinação das duas fontes de informação através do teorema de Bayes.

"Tabela 4. Momentos de  $\mu_X$  e  $\sigma_X^2$ .  
Uso dos Modelos Conceitual e de Regressão".

INFORMAÇÃO	$E(\mu_X)$	$V(\mu_X)$	$E(\sigma_X^2)$	$V(\sigma_X^2)$
SÉRIE ESTENDIDA (AMOSTRAS)				
$n=15,76; v=19,36$	3429	56 899	896 730	$10,470 \times 10^{10}$
MODELOS DE REGRESSÃO ("A PRIORI")				
$n'=14,6; v'=27,8$	3291	104 703	1 528 697	$19,638 \times 10^{10}$
COMBINAÇÃO DE TODAS AS INFORMAÇÕES (POSTERIOR)				
$n''=30,36; v''=47,16$	3363	40 173	1 219 673	$6,893 \times 10^{10}$

#### AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

Neste item é descrito um método para o cálculo da curva demanda energética versus risco de não atendimento para um dado aproveitamento hidroelétrico.

"Tabela 5. Definição dos Estados".

ESTADO	VOLUME ARMAZENADO
i (vazio)	$v(t) = 0$
.	.
.	.
i	$(i-2) \Delta_V < v(t) < (i-1) \Delta_V$
.	.
.	.
K (cheio)	$v(t) = v_U$

Seja um reservatório de volume útil igual a  $v_U$ . O estado do reservatório, a cada instante  $t$ , é caracterizado pelo nível de armazenamento  $v(t)$ . Considere-se  $K$  possíveis estados definidos como na tabela 5, onde  $\Delta_V = v_U / (K - 2)$ . A regra de operação do reservatório é tal que a vazão turbinada deverá atender, sempre que possível as necessidades energéticas definidas pelo mercado  $M$  em Mw. Define-se como risco associado ao mercado  $M$  a probabilidade do reservatório ocupar o estado vazio, ou seja, de que a demanda energética não seja atendida. Assume-se que as vazões anuais afluentes ao reservatório se comportam como um processo estocástico independente e estacionário, com distribuição de probabilidade marginal normal,  $f_X(x | \theta) = (\mu_X, \sigma_X^2)$ . Se  $\theta$  é conhecido, é possível montar, para cada mercado  $M$ , a matriz  $A(M)$  de dimensão  $K \times K$ , cujos elementos  $a_{ij}$  indicam a probabilidade de que se o estado do reservatório ao início de qualquer ano é  $i$ , o estado ao final do ano seja  $j$ . Seja o vetor  $\pi^T(M) = (\pi_1(M), \pi_2(M), \dots, \pi_K(M))$ , onde  $\pi_i(M)$  é a probabilidade de ocupação do estado  $i$  e portanto  $\pi_1(M)$  indica o risco associado ao mercado  $M$ . Este vetor é calculado por:

$$\pi(M) = (B(M) - I)^{-1} C^T \quad (59)$$

onde  $B(M)$  é a matriz  $(A(M) - I)$  com a primeira linha modificada para  $(1, 1, \dots, 1)$  e  $C$  o vetor  $(1, 0, 0, \dots, 0)$ .

Quando  $\theta$  é desconhecido, estando disponível uma distribuição posterior  $f''(\theta)$ , o vetor  $\pi(M)$  é estimado tirando valor esperado em (54).

$$\hat{\pi}(M) = E[\pi(M)] = \int_{\theta} \pi(M|\theta) f''(\theta) d\theta \quad (60)$$

A resolução da integral em (60) pode ser feita pelo método de Monte-Carlo resolvendo-se (59) para um número grande de vetores de parâmetros  $\theta_i = 1, \dots, g$  ramos conforme  $f''(\theta)$  e computando-se a média dos valores de  $\pi(M)$  assim obtidos. Uma aproximação de primeira ordem de (60) é dada resolvendo-se (59) apenas uma vez, usando-se a distribuição bayesiana de uma vazão futura para a construção de  $(A(M) - I)$  (Damazio, 1980). Esta distribuição é calculada por:

$$f_Q(q) = \int_{\theta} f_X(x | \theta) f''(\theta) d\theta \quad (61)$$

Isto é,  $f_Q(q)$  é a distribuição student generalizada, cujos momentos são funções dos parâmetros de  $f''(\theta)$ .

$$E(Q) = \bar{z}'' \quad (62)$$

$$V(Q) = s^{n^2} \frac{v^{n^2}}{(v^{n^2}-2)} \frac{n^{n^2}+1}{n^{n^2}} \quad (63)$$

A curva a da figura 2 mostra a relação entre mercado e o risco fornecida pela equação (59) usando  $E(\mu_x | amostra)$  e  $E(\sigma_x^2 | amostra)$  como se fossem  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$ . O mercado correspondente ao risco de 5% na curva 1 é 1175 Mw. Ou seja, baseado-se nas estimativas  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$  fornecidas pelo histórico de 11 anos de vazões afluentes ao local do aproveitamento, a capacidade de geração é estimada em 1175 Mw.

A curva b da figura 2 mostra a relação entre mercado e risco fornecida pela equação (59), levando-se em conta a incerteza em  $\mu_x$  e  $\sigma_x^2$  através da distribuição bayesiana de uma vazão futura baseada apenas nas informações da série medida de 11 anos. A estimativa da capacidade de geração em Carolina fornecida na curva b (1162 Mw) é aproximadamente a mesma da curva a.

As curvas c e d da figura 3 mostram as relações entre o mercado e o risco baseados na combinação de todos os tipos de informação disponível levando-se em conta a incerteza dos parâmetros através da distribuição bayesiana (curva d) e considerando as estimativas combinadas como se fossem verdadeiras (curva c). As curvas também mostram estimativas de capacidade de geração (curva c - 895 Mw e curva d - 885 Mw) praticamente idênticas, mas significativamente menores que as estimativas da figura 2.

As figuras 2 e 3 mostram ainda o intervalo de confiança de 95% para o risco obtidos pelo método de Monte-Carlo em Damazio (1980), indicando que o risco pode estar situado numa faixa bastante ampla.

#### CONCLUSÕES

Os resultados alcançados neste estudo mostram que o uso dos modelos regionais e conceituais reduzem em 25%  $(100 \times (1175 - 885)/1175)$  a estimativa da capacidade de geração de Carolina. Convém observar que a diferença entre o mercado recomendado a risco de 5% (885 Mw) e a energia firme (952 Mw) obtido em Engevix e Ecotec (1975) é de apenas 8%  $[100 \times (952-885)/885]$ . A consideração das incertezas quanto aos parâmetros para o cálculo dos riscos associados a cada mercado tem um efeito insignificante nas avaliações de potencial, mas serve para mostrar que o risco pode estar situado numa faixa bastante ampla.

O modelo conceitual usado para extensão da série tem um conteúdo de informação reduzido porque se comporta mal fora do período de calibração. Isto pode ser causado por erros de medida de precipitação, mas em geral este é o principal defeito do uso de modelos conceituais em transferência de informação (Clarke, 1976).

#### REFERÊNCIAS

- BOUCHET, R.J. (1963), "Evapotranspiration Reelle et Potentielle Signification Climatique", Gen. Assembly Berkeley, publicação 62, AIHS.
- CLARKE, R.J. (1976); "Comments and Summary of Discussions"; Hydrological Network Design and Information Transfer. World Meteorological Organization, Report Number 8.
- DAMAZIO, J.M. (1980), "Aplicação de Modelos Regionais e Conceituais em Estudos

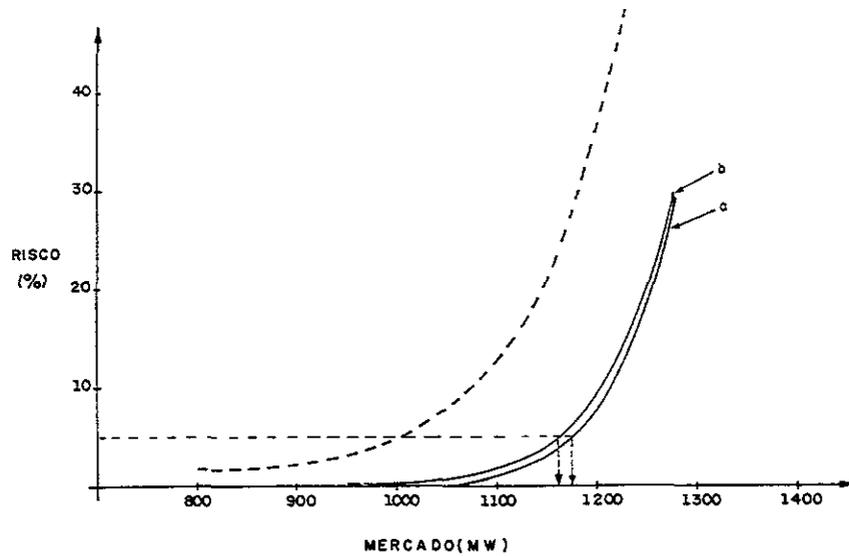
Hidroenergéticos. Uma Abordagem Bayesiana". Tese de Mestrado a ser submetida a Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ.

- DRAPER, N.R., e SMITH, H. (1966), "Applied Regression Analysis", John Wiley & Sons, Inc.
- ENGEVIX e ECOTEC (1975), "Estudos Hidroenergéticos da Bacia do Rio Tocantins", Centrais Elétricas do Norte do Brasil, ELETRONORTE.
- GOMIDE, F.S. (1979), "Estimativa de Valores Médios de Variáveis Hidrológicas Parte I e Parte II", IIIº Simpósio Brasileiro de Hidrologia, Anais. Volume 1.
- NUNES, G.S.S., ANDRÉ, R.G.B., VIANELO, R.L., e MARQUES, V.S. (1978), "Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil", Instituto de Pesquisas Espaciais. Relatório INPE-1190-NTE/110.
- Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazonia (1979), "Síntese de Informações Hidrológicas com o método da Malha Quadrada, Segunda Parte, Aplicação do Método à Bacia do Rio Tocantins", Publicação Número 8, SUDAM.
- RAIFFA, H., e SCHLAIFER, R. (1961), "Applied Statistical Decision Theory", MIT Press.
- SOLOMON, S.I. (1967), "Relationship Between Precipitation, Evaporation and Runoff in Tropical Equatorial Regions", Water Resources Research. Volume 3, Number 1.
- SOLOMON, S.I., DENOUIVILLIEZ, J.P., CHART, E.J., WOOLLEY, J.A., e CADOU, C. (1968), "The Use of a Square-Grid System for Computer Estimation of Precipitation, Temperature and Runoff", Water Resources Research, Volume 4, Number 5.

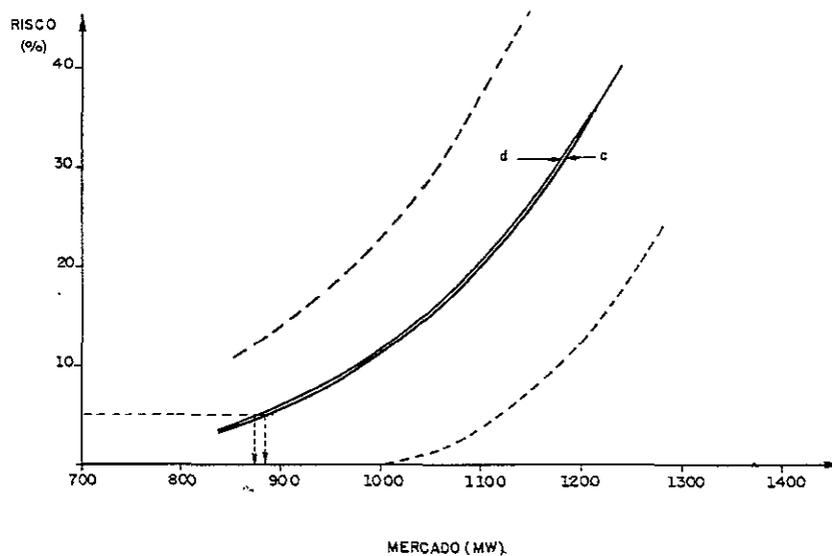
ANEXO

Informações existentes para cada quadrícula no arquivo do PHCA.

- 1 - NOCOL - Número da coluna do quadrado
- 2 - NOROW - Número da linha do quadrado
- 3 - LONG - Código de longitude
- 4 - LAT - Código de latitude
- 5 - A - Área do quadrado (km<sup>2</sup>)
- 6 - ELN - Elevação do canto nordeste (m)
- 7 - ALT - Altitude média (m)
- 8 - S - Declividade média (100 x %)
- 9 - AZ - Azimute da declividade (graus)
- 10 - Dn - Distância até o oceano na direção norte (km)
- 11 - Dne - Distância até o oceano na direção nordeste (km)
- 12 - De - Distância até o oceano na direção este (km)
- 13 - Dse - Distância até o oceano na direção sudeste (km)
- 14 - Ds - Distância até o oceano na direção sul (km)
- 15 - Bn - Barreira na direção norte (km)  
Barreira é definida pela diferença entre a altitude média do quadrado e a maior altitude entre o quadrado e o oceano na direção considerada. Se não existe altitude maior que a do quadrado entre o quadrado e o oceano a barreira é zero.
- 16 - Bne - Barreira na direção nordeste (km)
- 17 - Be - Barreira na direção este (km)
- 18 - Bse - Barreira na direção sudeste (km)
- 19 - Bs - Barreira na direção sul (km)
- 20 - En - Escudo na direção norte (km)  
Escudo é definido como a soma dos trechos ascendentes do oceano até o quadrado (km)
- 21 - Ene - Escudo na direção nordeste (km)
- 22 - Ee - Escudo na direção este (km)
- 23 - Ese - Escudo na direção sudeste (km)
- 24 - Es - Escudo na direção sul (km)
- 25 - GEO - Código de geologia superficial
- 26 - VEG - Código de vegetação
- 27 - SOIL - Código de solo
- 28 - OUT - Código da direção da drenagem no quadrado  
(Norte: 1; Este: 2; Sul: 3 e Oeste: 4)
- 29 - - - Não usada
- 30 - NREC - Número do próximo registro



"Figura 2. Curvas Mercado-Risco para Carolina. Sô Série Medida".



"Figura 3. Curvas Mercado-Risco para Carolina. Uso de todas as Informações".