

## Extensão de séries hidrológicas básicas. Considerações complementares sobre uma nova metodologia

Prof. Dr. Eng. Alfredo Bandini (1)

### Apresentação

Em julho de 1982, publicamos o trabalho Metodologia para Geração e Extensão de Séries Hidrológicas Básicas, de autoria do Dr. Eng. Alfredo Bandini, com um exercício prático daquela metodologia — Aplicação em Bacias de Clima Semi-Árido, desenvolvido pelo notável Eng. Nelson Nucci.

Agora, em julho de 1985, o prof. Bandini apresenta Extensão de Séries Hidrológicas Básicas. Considerações Complementares.

Naquela ocasião dizíamos que nada há de definitivo nesse setor. E essa nova publicação consagra a afirmativa.

Acompanha o trabalho uma aplicação prática elaborada para a bacia do rio Apiai-Guaçu, SP de autoria dos engs. Valter Gomes Gonçalves e Paulo Roberto de Mello, ambos do quadro do DNOS.

Este trabalho, produzido pelo ilustre prof. Bandini, é a consolidação de muitas experiências, de valor inestimável para o setor. Cada dado fornecido para o desenvolvimento do trabalho foi questionado e checado criteriosamente. Quando se verificou em alguns casos que a forma ou o critério de sua elaboração merecia discussão, o informante foi avisado e ponderadas nossas dúvidas. O resultado foi a certeza da informação correta; para o participante, a garantia de um resultado eficaz. Esse cuidado foi parte de nossa responsabilidade.

Assim, cada participante tem a certeza dos efeitos multiplicadores de sua participação e integração no setor. O **feed back** dessa participação proporcionou a excelente qualidade do trabalho.

E, aproveitando o tema e a hora, queremos agradecer a colaboração das Secretárias Lillian Teresa Sansigolo Haasper e Valéria Finatti Tommasi que com muita dedicação datilografaram os textos. E a Celina Kisanuki Koshikene e Manoel Yeisun Koshikene, que, pacientemente, elaboraram os desenhos e gráficos.

Assim sendo, esta publicação do prof. Bandini brinda, a nós profissionais do setor e acadêmicos de engenharia, com o que há de mais moderno, e sem dúvida alguma ficará inserta nos anais da engenharia mundial.

Parabéns aos queridos amigos Prof. Bandini e Eng. Nelson Luiz Nucci e nossos sinceros agradecimentos pela deferência de apresentação.

Santos, SP, julho de 1985

Eng. Antonio de Pádua P. Cordeiro  
Diretor Regional do DNOS, SP

### Preâmbulo

Em um precedente trabalho [1], propusemos uma nova metodologia, aplicável para a extensão de séries hidrológicas básicas, visando estabelecer uma correlação funcional entre afluxos meteóricos — em um intervalo de tempo  $\Delta$  — sobre uma bacia hidrográfica limitada por uma secção fluvial S, e os deflúvios que através S se escoam, no mesmo intervalo  $\Delta$ .

Um teste decididamente positivo da nova metodologia foi feito por Nucci [11], que organizou uma brilhante aplicação da mesma no projeto de aproveitamento dos recursos hídricos de uma grande bacia de clima semi-árido (rio Pajeú-PE-Brasil). Nucci desenvolveu, também, um exame comparativo com os resultados obtidos, aplicando o método tradicional das regressões múltiplas, lineares e não lineares e concluiu, destacando, em favor da nossa metodologia, as seguintes vantagens:

— nitida predominância, no que diz respeito ao cálculo dos deflúvios, em períodos prolongados em que as vazões reais se anulam, quando o método das regressões leva a valores absurdos (vazões negativas);

— obtenção de valores mais cautelosos nos períodos de pico;

— grande simplicidade da análise matemática e maior facilidade de programação.

Na presente nota, sem alterar os critérios que fundamentam a primeira

metodologia, foram introduzidos parâmetros complementares que permitem classificar, com maior fidelidade, os processos hidrometeorológicos e, por consequência, as correlações entre deflúvios, chuvas e lençóis subterrâneos, na sequência de subciclos de alta e baixa pluviosidade e de estiagem.

### I — Proposição do problema

I.1 — Considere-se uma secção fluvial S, que limita uma área de drenagem A, e um período de:

$$1, 2, \dots, j, \dots, n \quad (1)$$

anos, para os quais existem valores reais — isto é, derivados de dados, obtidos por medições diretas — seja dos afluxos meteorológicos sobre A, seja dos deflúvios escoados através S.

Indiquemos, para o ano genérico j, por:

$$h_j \text{ (mm)} \quad (2)$$

as alturas mensais de afluxo meteorológico sobre:

$$A \text{ (km}^2\text{)} \quad (3)$$

Ter-se-ão, portanto: as magnitudes equivalentes:

$$[V_{j,m}] = 10^6 A h_j \text{ (m}^3\text{)} \quad (4)$$

$$[Q_{j,m}] = \frac{A h_j}{86,4 \text{ g}} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (5)$$

— isto é, os volumes (4) e as vazões médias (5), num mês de 30 dias — e as magnitudes derivadas

$$h = \sum_{1}^{12} h_j \text{ (mm)} \quad (6)$$

$$V_{j,m} = \sum_{1}^{12} V_{j,m} \text{ (m}^3\text{)} \quad (7)$$

$$Q_{j,m} = \frac{V_{j,m}}{86.400 \text{ g}} \approx \frac{1}{12} \sum_{1}^{12} Q_{j,m} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

(1) Do Ministério do Interior - Departamento Nacional de Obras de Saneamento - 12.ª Diretoria Regional.

a saber, altura de afluxo anual (6), volume correspondente (7) e vazão média, no ano de g. dias (8).

Indiquemos, outrossim, por:

$$Q_i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (9)$$

$$V_i = 86.400 \text{ g. } Q_i \text{ (m}^3) \quad (10)$$

$$V = \sum_{i=1}^{12} V_i \text{ (m}^3) \quad (11)$$

$$h_{i,a} = \frac{86,4 \text{ g. } Q_i}{A} \text{ (mm)} \quad (12)$$

$$h_a = \sum_{i=1}^{12} h_{i,a} \text{ (mm)} \quad (13)$$

$$Q = \frac{V}{86.400 \text{ g.}} \approx \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (14)$$

respectivamente:

- vazões médias mensais (9);
- deflúvios correspondentes no mês de g dias (10);
- deflúvio anual (11);
- altura de água (12), sobre as superfícies, A correspondente ao volume (10);
- idem (13), correspondente ao volume (11);
- vazão média, no ano de g. dias.

1.2 — Se entretanto, formos considerar um ciclo T, como sendo uma sequência de 12n meses:

$$1, 2, \dots, 12, 13, \dots, r, \dots, \dots, (r+x), \dots, 12n \quad (15)$$

seguidos, em lugar de agrupações anuais, poderemos formar subciclos parciais, compreendidos entre os meses genéricos:

$$r_i \text{ e } (r_i + x) \quad (16)$$

Então as somatórias (6) (7) (8) (11) (13) e (14) tornar-se-ão:

$$\left[ \begin{array}{c} r_i \cdot x \\ \Sigma \\ r_i \end{array} \right] \quad (17)$$

Tais subciclos, como veremos, serão definidos por características hidrometeorológicas.

1.3 — **Observação** — Para simplificar os cálculos — sem praticamente

alterar a precisão dos resultados — pode-se admitir a sequência de meses, com duração igual de 30 dias, isto é:

$$A_i = (2,592 \times 10^6) \text{ seg}$$

Então, em lugar da função (10), será lícito considerar a função equivalente:

$$V_i = \frac{[V_i]}{[A]} = Q_i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (10')$$

Por consequência:

$$V = \sum_{i=1}^{12} Q_i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (11')$$

$$h_{i,a} = 2592 \frac{Q_i}{A_i} \text{ (mm)} \quad (13')$$

$$Q = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} Q_i \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (14')$$

Teremos, outrossim:

$$V_{i,r} = Q_{i,r} = \frac{A h_i}{2592} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (4')(5')$$

$$Q_{i,r} = \frac{1}{12} Q_{i,r} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (8')$$

Naturalmente, as precedentes considerações são válidas, também no que diz respeito ao cálculo da somatória (17).

1.4 — O procedimento estatístico, que nós escolhemos, visa estabelecer funções de correlação entre afluxos meteorológicos e deflúvios; essas funções, determinadas para o ciclo T de n anos, poderão ser utilizadas em outro período de n' anos, para os quais existem, exclusivamente efemérides pluviométricas.

Obter-se-á, assim, a extensão, da série hidrométrica, para mais n' anos, totalizando-se o ciclo prolongado de:

$$T' = (n + n') = (T + n') \text{ anos.} \quad (18)$$

O processo, naturalmente, é reversível, e permite estender a série de afluxos, caso existissem, nos n' anos, somente dados hidrométricos.

## II — Referências sobre o método proposto no trabalho precedente (I)

II.1 — O ciclo T da série básica foi subdividido em n subciclos iguais, cada um incluindo os 12 meses do ano, na sucessão natural, de janeiro a dezembro.

II.2 — Para cada subciclo, calculam-se respectivamente as alturas h e as vazões médias Q, pelas (6) e (14) e, em seguida, as magnitudes adimensionais:

$$H_i = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{12} h_i \quad (19)$$

$$V_i = \frac{1}{12 \bar{Q}} \sum_{i=1}^{12} Q_i \quad (20)$$

Lançando num plano cartesiano os pontos de coordenadas (h, Q) e, em outro, os 12n pontos de coordenadas (H<sub>i</sub>, V<sub>i</sub>), determinam-se por processos gráficos ou analíticos, as funções

$$Q = f(h) \quad (21)$$

$$V = f(H) \quad (22)$$

que equacionam as curvas de posição média, nas nebulosas formadas pelos n e, respectivamente, 2n pontos.

O uso das (21), (22) permitirá a extensão da série básica, para um período de mais n' anos (I.4).

II.3 — A avaliação do grau de precisão conseguido será feita comparando as vazões  $\bar{Q}$  — calculadas pela (21) — e as vazões mensais:

$$[Q_i]_i = 12 \bar{Q} (V_{i+1} - V_i) \quad (23)$$

com os respectivos valores reais — no ciclo de n anos através do coeficiente de correlação múltiplo, o erro padrão, a dispersão etc.

## II.4 — Comentários

II.4.1 — Os comentários que iremos expor na continuação nos levaram a introduzir, no processamento acima referido, algumas alterações substanciais, em virtude das quais os resultados conseguidos se situam num nível mais próximo da realidade hidrometeorológica.

### II.4.2 — Classificação dos subciclos

O subciclo formado pelos 12 meses do ano — de janeiro a dezembro — é realmente uma unidade convencional, porquanto a sequência dos períodos chuvosos e secos sofre contínuas — e amiúde acentuadas — defasagens, em relação à sequência dos trimestres que constituem, praticamente, as quatro estações do ano.

Por consequência, acontece que, de um ano para outro, os deflúvios de janeiro sofrem influências diferentes por parte dos afluxos dos meses anteriores, assim como os afluxos do mês de dezembro afetam em medida dife-

rente os deflúvios do sucessivo janeiro.

Mais ainda, num subciclo anual, os deflúvios apresentam distribuições cronológicas diversas, em função da duração e intensidade dos períodos de afluxo. Em outras palavras, um certo volume de afluxo pode dar lugar a deflúvios diferentes, se concentrado em períodos mais ou menos prolongados; assim como precipitações concentradas em períodos de igual duração, mas de intensidades diferentes, são responsáveis por diferentes distribuições de deflúvios.

Finalmente, em períodos secos ou de precipitações insignificantes, os deflúvios mensais não dependem mais das chuvas, e sim da contribuição dos lençóis subterrâneos.

III.4.3 — Outra ponderação deve ser feita, no que diz respeito à avaliação do provável grau de precisão, conseguido na extensão da série básica.

Tais extensões tornam-se necessárias especialmente para elaboração de estudos, que visam ao aproveitamento de recursos hidráulicos, regularizando as vazões naturais dos cursos de água, por intermédio de reservatórios de capacidade adequada, com ciclo de operação plurianual.

A credibilidade dos resultados obtidos pela extensão poderá então ser razoavelmente testada, projetando para o ciclo T (ver sub-I — Item 1.4), o regime de operação da capacidade regularizadora, que receba os volumes de água calculados pelas (21) e (22); verificar-se-ão, em seguida, as diferenças que se experimentam, substituindo, aos referidos volumes, os deflúvios reais do curso de água.

### III. — Análise e programa do método modificado

#### III.1 — Determinação dos subciclos

III.1.1 — É a fase mais delicada da análise do sistema, para a qual não é possível fixar regras matemáticas rigorosas.

Contudo, a experiência adquirida, pesquisando sobre numerosas bacias hidrográficas, nos sugere formular um esquema de cálculos, baseado na sequência de operações, que resumimos a seguir.

III.1.2 — Desenhem-se para o período de

$$T = 12n \text{ meses}$$

(ver I.1), os três gráficos:

a) Diagramas dos afluxos meteorológicos mensais

$$Q_{i,r} \quad (4' \cdot 5')$$

e das vazões mensais

$$Q_i \quad (9)$$

na sucessão natural dos tempos, adotando, com preferência, as mesmas unidades de medida, por exemplo ( $m^3/s$ ).

b) Diagramas dos volumes acumulados:

$$\sum_{i=1}^t V_{i,r} = \sum_{i=1}^t Q_{i,r} \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^t V_i = \sum_{i=1}^t Q_i \quad (25)$$

$$i = (1, 2, 3, \dots, i, \dots, 2n) \quad (26)$$

c) Diagramas de durações das vazões (5') e (9) das quais poderão deduzir-se valores característicos, quais sejam, médio, semipermanentes, e outros com durações progressivas, por exemplo:

$$t = 10\%, 20\%, \dots \quad (27)$$

O exame dos diagramas (5), (9), (24), (25), (26) conjuntos, permitirá em geral, agrupar os valores contemporâneos de

$$Q_{i,r}, Q_i$$

em subciclos chuvosos, de escassa pluviosidade e secos, obedecendo às normas orientadoras, que propomos a seguir.

#### III.1.3 — Subciclos chuvosos - (ch)

a) Os afluxos  $Q_{i,r}$  e os deflúvios  $Q_i$ , superam os respectivos valores médios. Os limites inferiores:

$$(Q_{i,r})_{m,i}, Q_{m,i} \quad (28)$$

dependem, naturalmente das condições hidroclimatológicas. Contudo, pode-se estimar que, nas condições médias de bacias com runoff permanente, os valores (28) correspondem, em geral, a durações compreendidas, no intervalo:

$$40 \leq t \leq 50\% \quad (29)$$

b) As curvas (24) e (25), apresentam os trechos de maior declividade média positiva, em relação à horizontal.

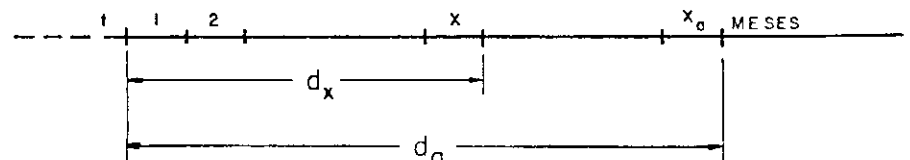


Figura 1

#### III.1.4 — Subciclos (E,CH) de escassa pluviosidade

Os valores máximos de  $Q_{i,r}$  e  $Q_i$  são inferiores aos (28). Os valores mínimos

$$(Q_{i,r})_{m,i}, Q_{m,i} \quad (30)$$

poderão ser deduzidos, observando que, nesses subciclos o valor limite dos deflúvios mensais é dado pelo trecho da curva (25) que tem a mínima declividade média, porquanto os próprios deflúvios ainda sofrem a influência dos afluxos meteorológicos.

#### III.1.5 — Subciclos secos ou áridos (A), quando:

$$Q_{i,r} < (Q_{i,r})_{m,i} \quad (31)$$

$$Q_i < (Q_i)_{m,i} \quad (32)$$

#### III.1.6 — As Abscissas:

$$r_i \quad (r_i \neq x_i) \quad (16)$$

definidas pelas interseções das retas horizontais:

$$(Q_{i,r})_{m,i} = \text{const} \quad (33)$$

$$(Q_{i,r})_{m,i} = \text{const} \quad (34)$$

com o diagrama  $Q_{i,r}$ , se identificam com o início e o fim dos diferentes subciclos, que se alternam no ciclo T, sendo  $x_i$  meses a permanência de cada um.

O gráfico da figura N.A (mostrado no trabalho "Aplicação do Modelo Bordini, para extensão de séries hidroclimáticas básicas, à bacia do rio Apiaí-Guaçu, de autoria dos engs. Paulo Roberto de Mello e Valter Gomes Gonçalves às páginas 176/177 — Figura 2) organizado no trabalho (III), onde se aplica a proposta metodológica, no caso, real da bacia do rio Apiaí-Guaçu (SP), oferece uma imagem evidente dos resultados obtidos, na fase de demarcação dos subciclos. As retas horizontais que os limitam têm por equações:

$$(Q_{i,r})_{m,i} = 93,35 \text{ m}^3/\text{s} = \text{const} \quad (33')$$

$$(Q_{i,r})_{m,i} = 60,00 \text{ m}^3/\text{s} = \text{const} \quad (34')$$

sendo que às referidas vazões de afluxo correspondem as durações de 44% e, respectivamente, 73% no ciclo T.

**III.2 — As funções do modelo nos períodos de alta (ch) e de escassa (e.ch) pluviosidade**

III.2.1 — Vamos, em primeiro lugar, separar em duas séries distintas, os subciclos (CH) e, respectivamente, os subciclos (E.CH), agrupando em cada série, os subciclos de igual duração.

III.2.2 — Começemos a operar, na primeira série (CH).

2.2.1 — Considere-se um subciclo de duração

$$d_x = x_x \text{ meses}$$

no qual (figura N.1),

temos, os afluxos mensais, (5'):

$$(Q_{ar})_1, (Q_{ar})_2, \dots, (Q_{ar})_x$$

e os deflúvios mensais,

$$Q_1, Q_2, \dots, Q_x, \dots, Q_{xx}$$

Calculem-se os volumes globais:

$$Q_{ar}(d_x) = \sum_{x=1}^{x_x} (Q_{ar})_x \quad (35)$$

$$Q(d_x) = \sum_{x=1}^{x_x} Q_x \quad (36)$$

e as magnitudes adimensionais progressivas:

$$H(d_x) = \frac{1}{Q_{ar}(d_x)} \sum_{x=1}^x (Q_{ar})_x \quad (37)$$

$$V(d_x) = \frac{1}{Q(d_x)} \sum_{x=1}^x Q_x \quad (38)$$

$$x = 1, 2, \dots, x_1, \dots, x_x$$

as quais, para  $(x = x_x)$  se identificam com a unidade.

2.2.2 — Sendo  $n_x$  o número total de subciclos, que têm início em tempos genéricos e duração  $d_x$ , executando para os restantes  $(n_x - 1)$ , as mesmas determinações, obteremos, como resultado dos cálculos:

$$n_x \text{ valores} \quad (35)$$

$$n_x \text{ valores} \quad (36)$$

$$(n_x \cdot x_x) \text{ valores} \quad (37)$$

$$(n_x \cdot x_x) \text{ valores} \quad (38)$$

Lancemos, em um plano cartesiano, os  $n_x$  pontos, tendo como coordenadas:

$$Q_{ar}(d_x); Q(d_x)$$

e, em outro plano cartesiano, os  $(n_x \cdot x_x)$  pontos, de coordenadas:

$$H(d_x); V(d_x)$$

Poderão, então, ser determinadas, por processos gráfico-analíticos, as funções

$$O(d_x) = f [Q_{ar}(d_x)] \quad (39)$$

$$V(d_x) = f [H(d_x)] \quad (40)$$

$$(O \leq V \leq i); (O \leq f \leq 1)$$

que equacionam, respectivamente, as curvas de posição média, nas duas nebulosas de pontos lançados.

2.2.3 — A mesma programação será desenvolvida para os outros subciclos da série, classificados, naturalmente, em função das respectivas durações.

Em cada grupo, reúnem-se os  $n_x$  subciclos, que têm a mesma duração:

$$d_y = x_y \text{ meses} \quad (41)$$

$$(y = b, c, d, \dots)$$

Ficam, portanto, válidas as fórmulas (37), (38) (39), (40), nas quais, o subíndice (a), será substituído pelo subíndice (y).

III.2.3 — Lancemos mãos, agora, dos subciclos, da 2.ª série (e.ch), e vamos repetir as mesmas sequências de operações, indicadas no precedente subitem 2.2.2.

Chegaremos, em definitivo, a funções análogas às (39), (40), isto é:

$$O(d_y) = f [Q_{ar}(d_y)] \quad (42)$$

$$V(d_y) = f [H(d_y)] \quad (43)$$

onde o subíndice y define a duração do subciclo.

**III.2.4 — Observação**

Uma vez determinadas as funções (42) e (43), poderemos, para cada uma das duas séries, em separado, reunir todas as funções (42), em único gráfico, e todas as (43), em outro gráfico.

É possível, então, que diagramas relativos a períodos de durações pouco diferentes (por exemplo: 3-4 meses, 7-8 meses), possam ser sintetizados num único diagrama, ao qual será lícito atribuir uma credibilidade ainda maior, levando em conta a estrutura das fórmulas (42) e (43).

Utilizamos os gráficos das figuras N B e N C, preparados no já mencionado trabalho (III), visando exemplificar configurações típicas dos diagramas que representam as referidas funções, em subciclos reais.

**III.3 — Períodos secos**

III.3.1 — Como já foi visto (ver subitem II.4.2) nos subciclos secos, os deflúvios mensais independem das chuvas contemporâneas, aliás insignificantes e sim da alimentação procedente dos lençóis subterrâneos.

Naturalmente, não será, em geral, possível, dispor de elementos relacionados com as correntes que se estabelecem entre as acumulações de águas subterrâneas — de regime fluvial ou lacual — e o runoff.

Temos, entretanto, a possibilidade de estudar os efeitos da contribuição freática através das funções que expressam a diminuição progressiva dos deflúvios mensais, a partir do início,

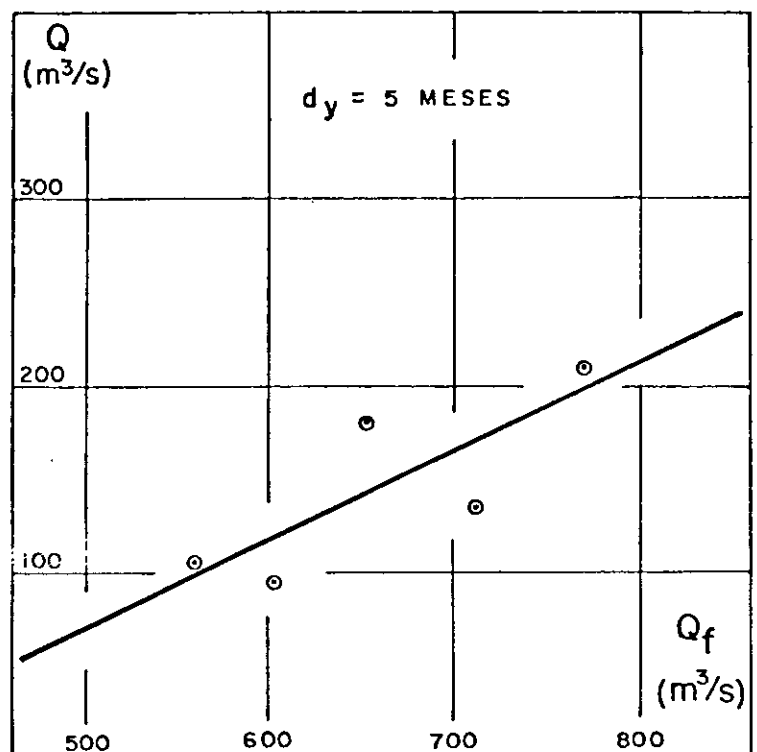


Figura B

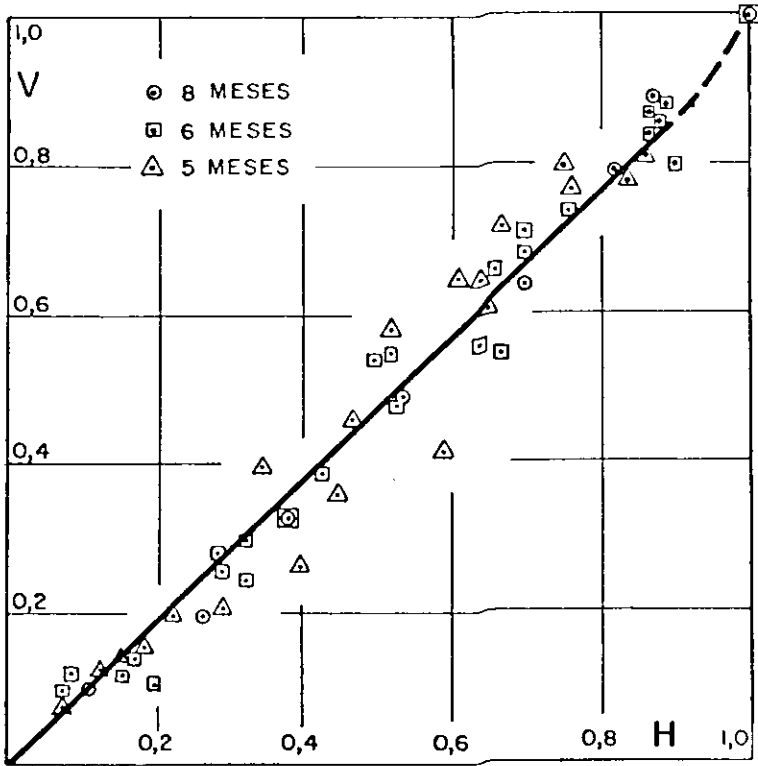


Figura C

Separando as variáveis da equação diferencial e integrando entre os limites:

$$t = 0 \quad Q = Q_0 \quad (48)$$

obtemos:  $t = 0$

$$\ln \frac{Q}{Q_0} = -\frac{t}{a} \quad (49)$$

ou melhor:

$$Q = Q_0 e^{-\frac{t}{a}} \quad (50)$$

Função esta que satisfaz também a condição teórica:

$$Q = 0 \text{ para } t \rightarrow \infty$$

III.3.3 — Para aplicar a equação (50) ao nosso caso, consideremos um sub-ciclo seco (figura N. 2), que tem início no mês 1 e termina no mês  $t_a$  genérico.

O diagrama das vazões médias mensais poderá apresentar algumas irregularidades, devido a fenômenos contingentes, responsáveis por pequenas contribuições, que se somam às do lençol. Sugere-se, então, fixar dois pontos, que o exame do gráfico indique como sendo os mais significati-

ate o fim do sub-ciclo: funções essas que equacionam as chamadas curvas de esgotamento das vazões naturais dos cursos de água.

III.3.2 — Para determinar a equação das curvas de esgotamento, nos baseamos sobre as seguintes considerações [IV].

Se indicamos por V o volume do lençol e por Q a vazão na secção fluvial S, num instante genérico t, sera:

$$V = f(Q) \quad (44)$$

No intervalo infinitesimal sucessivo dt, ter-se-á o decréscimo:

$$-dV = -\frac{df}{dQ} dQ = Q dt \quad (45)$$

sendo que, ao decréscimo de volume no lençol, corresponde o deflúvio Qdt.

A função  $\frac{df}{dQ}$  é uma característica

física da bacia hidrográfica, limitada pela secção S e depende de numerosos elementos, que não podem ser, praticamente testados. Todavia é lícito admitir que a variação de tais elementos é muito lenta, de sorte que — a não ser que seja demonstrado o contrário — poderemos supor:

$$\frac{df}{dQ} = a = \text{const} \quad (46)$$

e, por consequência, a (45) torna-se:

$$a dQ = Q dt \quad (47)$$

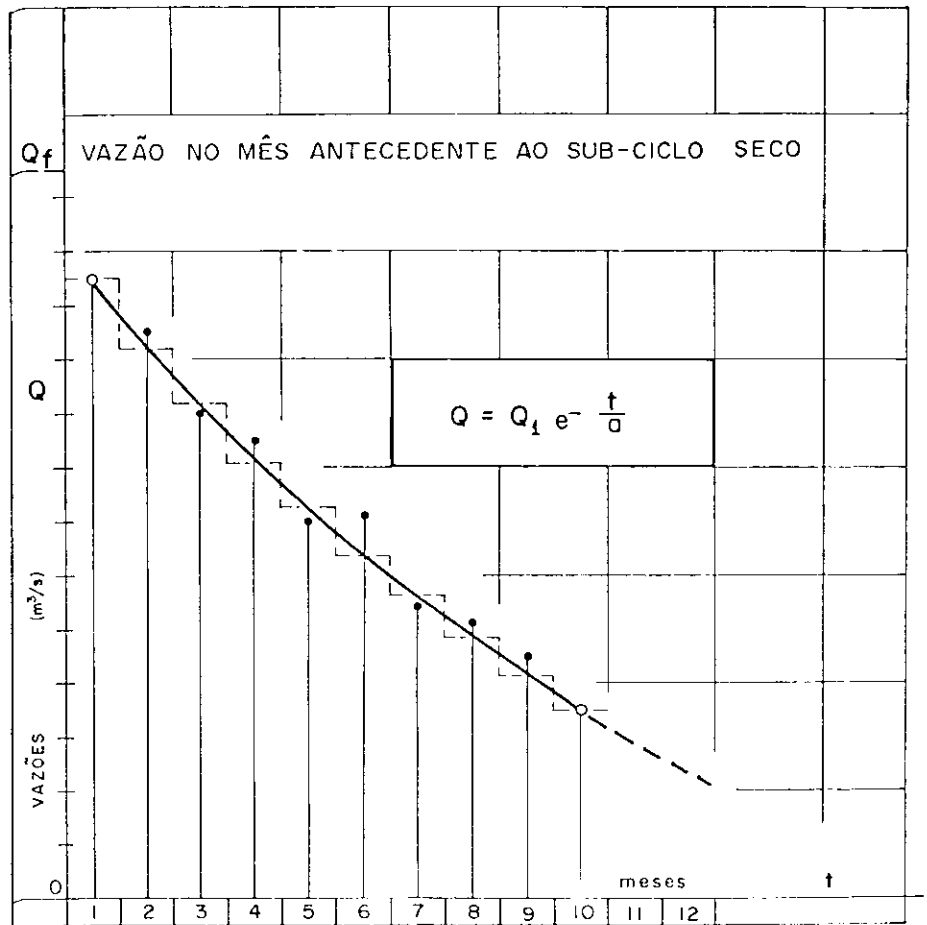


Figura 2

vos. Em geral, convém fixar, em primeira aproximação, o valor inicial  $Q_1$  — vazão média mensal do primeiro mês da estiagem — para o tempo ( $t = 0$ ) e o valor  $Q_m$  do último mês da estiagem. Então, para que a curva passe pelos referidos pontos, deverá ser:

$$Q_m = Q_1 e^{-\frac{t_m}{a}} \quad (51)$$

E, por consequência:

$$a = \frac{t_m}{\ln \frac{Q_1}{Q_m}} \quad (52)$$

Será então suficiente verificar que a curva calculada pela equação (50), onde seja posto:

$$Q_0 = Q_1 \quad (53)$$

$$a = (52)$$

tenha ordenadas próximas às vazões reais, sem superá-las, obedecendo, assim, a uma norma cautelosa. Se isto não acontecer, será fácil reajustar a, coeficiente do expoente, alterando ligeiramente os valores  $Q_1$  e  $Q_m$ , ou, porventura, tomando como pontos característicos da curva vazões de outros meses.

III.3.4 — Seja  $Q_r$  a vazão média no mês que antecede a estiagem. Se dividirmos ambos os membros da equação (50) por  $Q_r$  e pomos:

$$Z = \frac{Q}{Q_r} \quad (54)$$

a equação adimensional:

$$Z = Z_0 e^{-\frac{t}{a}} \quad (55)$$

dará a diminuição das vazões no subciclo seco, em relação à vazão do mês anterior ao seu início, isto é, quando termina o período de chuvas.

Com este artifício, obtemos para os subciclos secos, funções homogêneas e comparáveis. O exame dos correspondentes diagramas lançados em um plano cartesiano poderá sugerir a unificação de feixes de curvas, em curvas únicas, aptas para o cálculo de  $Z$  independentemente do valor  $Q_r$  e da duração  $t_m$  da estiagem.

III.3.5 — A equação (55), torna-se particularmente útil quando aplicada a bacias localizadas em regiões semi-áridas, nas quais, por períodos de meses consecutivos, anula-se o escoamento superficial nos álveos dos rios.

Verifica-se, em geral, uma queda rápida do diagrama  $Z$ , do valor inicial  $Z_1$ ,

até o valor  $Z = 0$  atingindo num certo tempo  $t$ : em seguida, a função  $Z$  continua-se identificando com o eixo das abscissas ( $Z = 0$ ), até terminar o subciclo seco.

### III.4 — Extensão da série básica — Programa de operação

III.4.1 — Resumimos, a seguir, a sequência de determinações a serem executadas para estender a série básica dos deflúvios, a um período de  $n'$  anos (ver subitem 1.4), em que somente os afluxos meteorológicos são conhecidos.

III.4.2 — Desenhe-se, para o período de  $n'$  anos, o diagrama dos afluxos meteorológicos mensais:

$$Q_{1,r} \quad (4') \quad (5')$$

na sucessão natural dos tempos, e o diagrama de durações, classificando os  $Q$  em ordem decrescente.

III.4.3 — Tracem-se, nos dois gráficos precedentes, as retas horizontais, de equações já fixadas, no estudo da

$$(Q_{a,r})_{m,1} = \text{const} \quad (28)$$

$$(Q_{a',r})_{m,1} = \text{const} \quad (30)$$

série básica gerada de  $T = n$  anos.

Uma comparação de regime, entre os dois ciclos, poderá ser estabelecida, conferindo as durações dos afluxos mensais, no ciclo básico de extensão de  $n'$  anos.

III.4.4 — As duas retas horizontais (28 e 30) limitam as três faixas, em que se situam, respectivamente, os subciclos:

de alta pluviosidade (ch); de escassa pluviosidade (E.CH); secos (S).

III.4.5 — Subciclos da 1.ª série (ch) e da 2.ª série (E.CH), de duração genérica  $d_x = x_r$  meses.

4.5.1 — Para cada um dos referidos subciclos, calculem-se:

a) o valor da função análoga à (35):

$$Q_{a,r}(d_x) \quad (35')$$

b) os  $y$  valores da função análoga à (37):

$$H(d_x) \quad (37')$$

$x = (1, 2, \dots, x_r)$  meses

4.5.2 — Em função de  $Q_{a,r}(d_x)$ , obteremos o valor correspondente de  $Q(d_x)$ , aplicando uma equação (39) de série (ch)í pondo-se ( $a=y$ ) ou por uma equação (42) da série (e.ch).

4.5.3 — Em função de cada valor  $H(d_x)$ , calcula-se o valor correspondente:

$$V(d_x)$$

$$(x = 1, 2, \dots, x_r)$$

aplicando uma equação (40), da série (ch), com o subíndice ( $a=y$ ), ou uma equação (43) da série (e.ch)

4.5.4 — Então, entrando numa função da série (38) com o subíndice ( $a=y$ ) ou numa função (43), obteremos, definitivamente, os  $x_r$  valores.

$$\sum_{x=1}^x Q = Q(d_x) \cdot V(d_x) \quad (56)$$

$$(x = 1, 2, \dots, x_r)$$

E, por consequência as vazões médias, nos meses genéricos  $x$ :

$$Q_x = \sum_{x=1}^x Q_x - \sum_{x=1}^{(x-1)} Q_x \quad (57)$$

### III.4.6 — Subciclos secos

Aplicando a cada subciclo a equação (55) correspondente a sua duração, obteremos para os sucessivos meses

$$1, 2, \dots, t_m$$

os valores da função:  $Z$

$$Z_1, Z_2, \dots, Z_m$$

Sendo  $Q_r$  o valor da vazão média, no mês  $x_r$  que antecede a estiagem, calculam-se, em seguida, as vazões médias mensais.

$$Q_x = \frac{Z_x}{Q_r} \quad (58)$$

$$x = (1, 2, \dots, x_m)$$

completando, assim, a extensão da série básica.

### III.5 — Teste de precisão do modelo proposto (ver subitem II.4.3) [V]

III.5.1 — Supõe-se sem afetar a generalidade do critério orientador, que um único reservatório, com barragem localizado na secção S, por onde se escoam as vazões  $Q$ , possa realizar a regularização total, isto é, transformar, no ciclo:

$$T = n \text{ anos}$$

o regime  $Q(t)$ , no regime:

$$\bar{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T Q dt = \frac{1}{12m} \sum_{x=1}^{12n} Q_x \quad (59)$$

onde, como sabemos,  $Q_x$  são as vazões médias mensais.

III.5.2 — Sejam  $Q_{x,r}$  as vazões calculadas pelas fórmulas (57), (58). Trace-

DIAGRAMA DE OPERAÇÃO DO RESERVATÓRIO

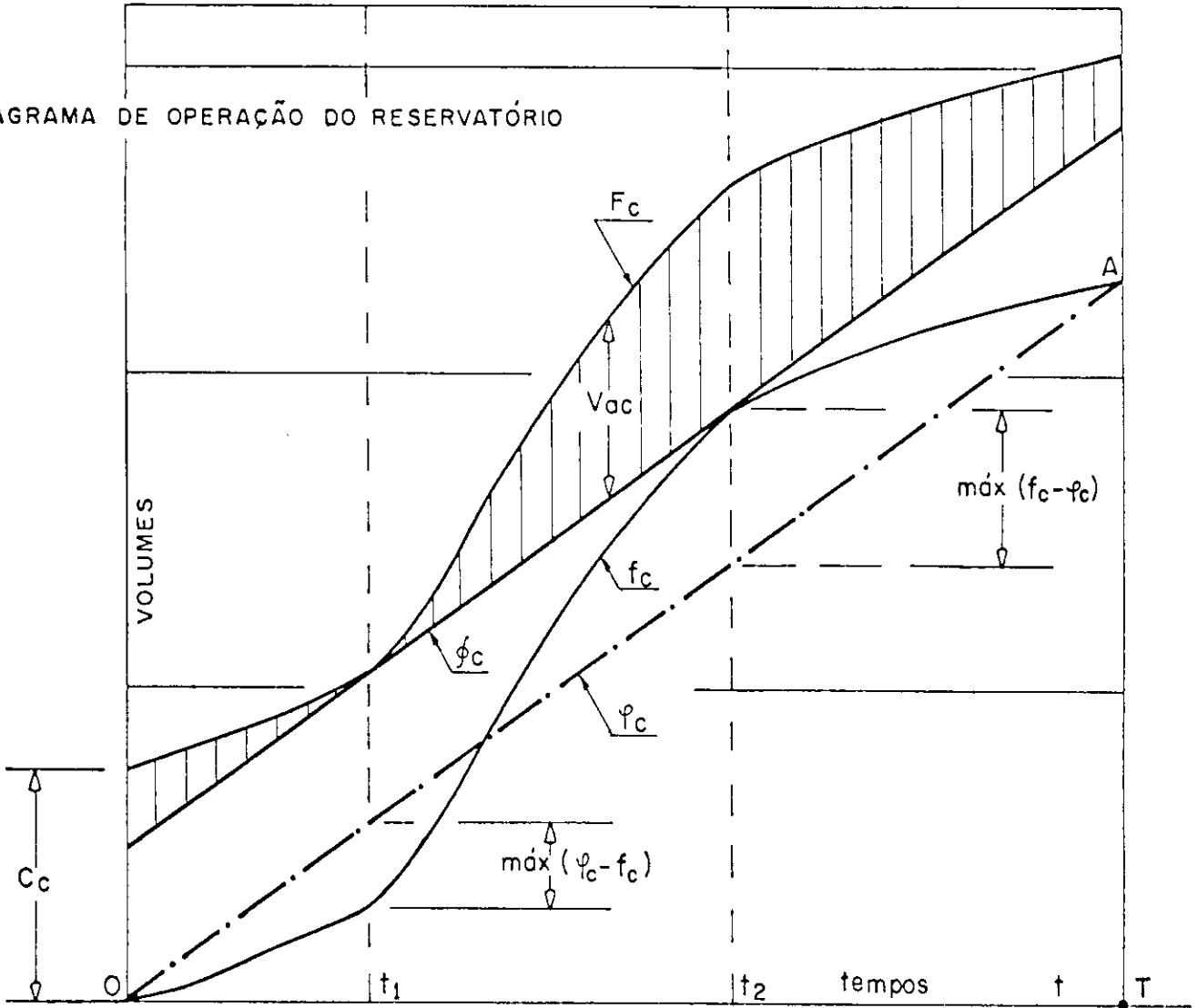


Figura 3

mos (figura nº 3), os diagramas das funções:

$$f_c = \sum_1^x Q_{i,c} \quad (60)$$

$$q_{i,c} = x \cdot \bar{Q}_i \quad (61)$$

(x = 1, 2, ..., 12 n) meses

A capacidade C para realizar a regularização total, é:

$$C_c = \text{máx} (f_c - q_{i,c}) + \text{máx} (q_{i,c} - f_c)$$

$$(q_{i,c} - f_c) \quad (62)$$

Desenhemos então, os gráficos das funções:

$$q_{i,c} = f_c + \text{máx} (f_c - q_{i,c}) \quad (63)$$

$$F_c = f_c + C_c \quad (64)$$

Os seguimentos verticais interceptados entre  $F_c$  e  $q_{i,c}$  representam, por-

tanto, os volumes armazenados no reservatório, no fim de cada mês, a saber:

$$V_{a,c} = F_c - q_{i,c} \quad (65)$$

Resulta:

$$V_{a,c} = 0 \text{ para } t = t_1$$

$$V_{a,c} = C_c \text{ para } t = t_2$$

III.5.3 — Sendo O as vazões reais, calculem-se as funções:

$$f = \sum_1^x Q \quad (66)$$

$$F = f + C_c \quad (67)$$

Então, operando com o mesmo regime regularizado, os segmentos verticais:

$$V_a = F - q_{i,c} \quad (68)$$

representam os volumes **realmente**,

armazenados no reservatório, no ciclo T.

III.5.4 — Por consequência, para testar a credibilidade dos deflúvios calculados pelas fórmulas, será suficiente executar os seguintes cálculos de verificação:

a) Diferenças entre os volumes (65) e (68):

$$V_{a,c} - V_a = F_c - F = (f_c - f) \geq 0 \quad (69)$$

em valor absoluto e em porcentagem de  $C_c$ .

b) Diferenças:

$$(F - q_{i,c}) \quad (70)$$

$$(f - q_{i,c}) \quad (71)$$

O diagrama  $q_{i,c}$  será viável, sem alterações, se nunca deixar de ser:

$$(F - q_{i,c}) > 0 \quad (70')$$

$$(q_{i,c} - f) > 0 \quad (71')$$

De fato (figura n.º 4), se num intervalo genérico:

$$\Delta t = t_c - t_a$$

ocorrer que:

$$(F - \varphi_c) < 0 \quad (72)$$

o diagrama  $\varphi_c$  ficaria alterado, passando para a posição  $\varphi'_c$ , a qual se identifica: — com a linha F no trecho (AB<sub>1</sub>); com a paralela a  $\varphi_c$ , de equação:

$$\varphi'_c - \overline{BB_1} = \varphi_c - \text{máx}(\varphi_c - F) \quad (73)$$

nos tempos ( $t > t_B$ )

O segmento  $\overline{BB_1}$  representa a redução de deflúvio regularizado, no lapso ( $t_B - t_a$ )

Se entretanto, ocorrer num intervalo  $\Delta t$ :

$$(\varphi_c -) < 0 \quad (74)$$

(figura n.º 5), o diagrama  $\varphi_c$  deslocar-se-ia, para a posição  $\varphi'_c$ , a qual coincide:

com a linha f, no trecho (DE); com a reta paralela da equação:

$$\varphi'_c + \overline{EE_1} = \varphi_c + \text{máx}(f - \varphi_c) \quad (75)$$

nos tempos sucessivos a  $t_E$ .

O segmento  $\overline{EE_1}$  é o excesso de deflúvio não utilizado, que extravasa dos vertedores, enquanto o volume:

$$\varphi_c(t_E) - \varphi_c(t_D) \quad (76)$$

é derivado para o aproveitamento previsto.

### III.5.5 — Observação

5.5.1 — Para facilitar a execução dos desenhos, em lugar da função  $f_c$ , pode-se considerar (figura N.º 6) a função:

$$f_c^* = \sum_{x=1}^n (Q_{cx} - \overline{Q}_c) =$$

$$\sum_{x=1}^n x - \overline{Q}_c \cdot x \quad (60')$$

$$(x = 1, 2, \dots, 12n)$$

resultando, então:

$$\varphi_c = 0 \quad (61')$$

Isto é, o diagrama regularizado, identifica-se com o eixo horizontal, por ter sofrido a rotação, no sentido horário do ângulo:

$$\alpha = \text{arctag} \frac{AT}{OT} \quad (77)$$

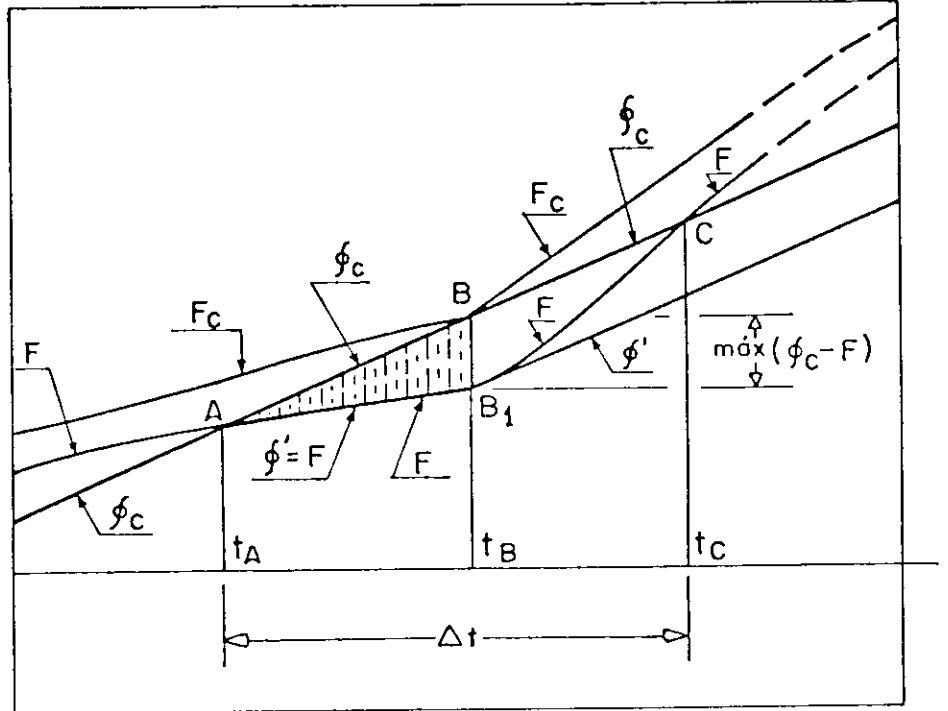


Figura 4

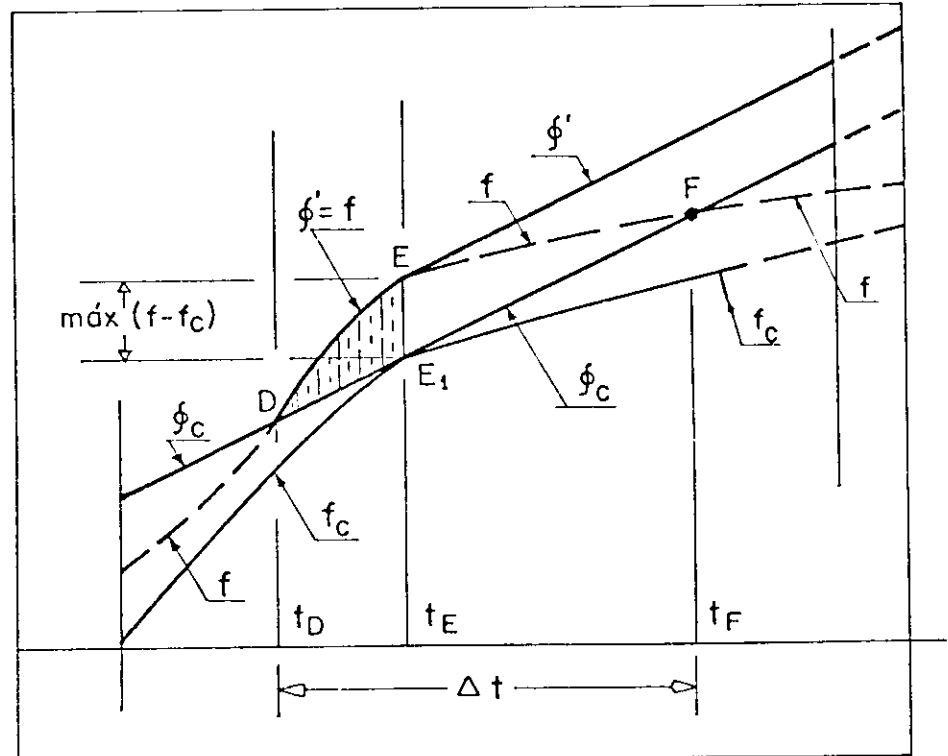


Figura 5

O eixo das ordenadas, portanto, para se tornar vertical, deverá sofrer a rotação no sentido antihorário do mesmo ângulo (77).

5.5.2 — Por outra parte, resulta que (60) e (61):

$$(f_c^* - \varphi_c^*) = f_c^* = \sum_{x=1}^n Q_{cx} - Q_c \cdot x = (f_c - \varphi_c) \quad (78)$$

Portanto a equação (65) continua válida, se pormos (figura n.º 4), em lugar de  $F_c$  e  $\varphi_c$ :

$$F_c^* = f_c^* + C_c \quad (79)$$

$$\varphi_c^* = \text{máx} f_c^* = \text{const} \quad (80)$$

5.5.3 — Analogamente, continuam válidos os cálculos de verificação substanciados pelas fórmulas (69),



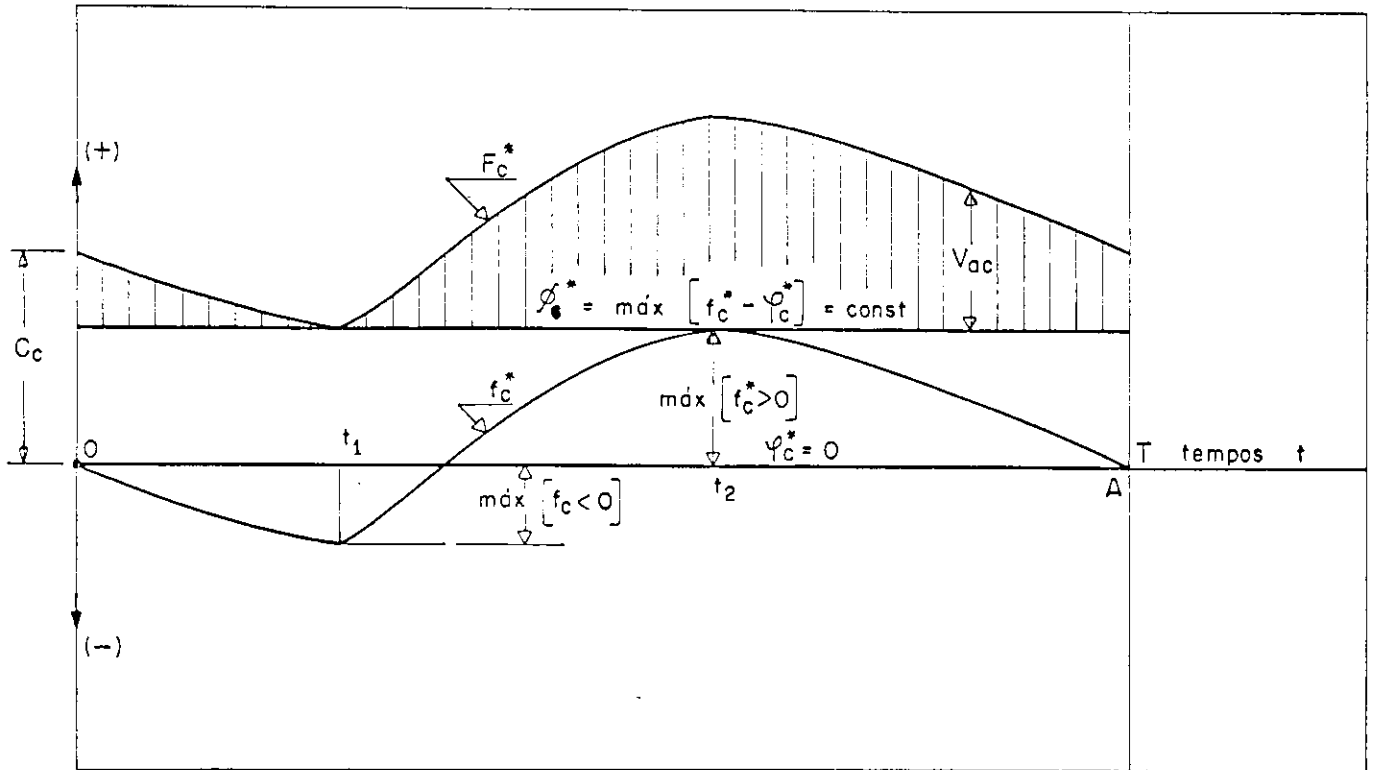


Figura 6

(70) e (71); as funções (60), (74) e (75) substituem as funções  $f$ ,  $F$ , e  $q$ , enquanto as funções  $f$  e  $F$  serão substituídas, respectivamente por:

$$f^* = \sum_{x=1}^x Q_x - \bar{Q}_x \quad (81)$$

$$F^* = f^* + C_c \quad (82)$$

As indicadas substituições não alteram, contudo, os resultados numéricos.

III.5.6 — É interessante evidenciar alguns elementos numéricos comparativos, obtidos no trabalho [III], aplicando o primeiro e o segundo modelo.

a) O quadro n. 1, resume valores característicos, das diferenças de volumes armazenados e dispensa de ulteriores comentários.

b) Aplicando o modelo n. 1, temos um extravasamento total:

$$\text{máx } (f - q_c) = 38,41 \text{ m}^3/\text{s} = 99,559 \text{ Hm}^3$$

no trimestre fevereiro-abril, de 1977 e, a partir do mês de maio, resulta:

$$q_c' = q_c + 38,41$$

Em seguida, o reservatório fica vazio no bimestre maio-junho 1982, tendo-se o déficit:

$$\text{máx } (F - q_c') = -8,47 \text{ m}^3/\text{s} = 21,954 \text{ Hm}^3$$

e a linha  $q_c'$  a partir do mês de julho, desloca-se para a posição:

$$q_c'' = q_c' - 8,47$$

Uma vez que:

$$f_c \text{ (156)} = 3.715,48 \text{ m}^3/\text{s} =$$

$$9.630,524 \text{ Hm}^3$$

$$[156 \text{ meses} = T]$$

será possível utilizar:

$$(9630,524 - 21,954) = 9608,57 \text{ Hm}^3$$

que representam 98,4% do volume real disponível em T (9764,893 hm<sup>3</sup>).

c) Aplicando o modelo modificado, temos o reservatório vazio no bimestre maio-junho 1982, com um déficit:

$$\text{máx } (F - q_c) = 9,25 \text{ m}^3/\text{s} = 23,976 \text{ Hm}^3$$

e a linha  $q_c$  passa, a partir de julho, para a posição:

$$q_c'' = q_c' - 9,25$$

Sendo:

$$f_c \text{ (156)} = 3789,24 \text{ m}^3/\text{s} = 9821,71 \text{ Hm}^3$$

poderemos aproveitar 9797,7 hm<sup>3</sup>, que correspondem praticamente ao volume real, disponível em T, o qual dará total cobertura ao regime regularizado  $q_c$  projetado, usando as fórmulas de correlação.

d) A capacidade útil ( $C_c = 714 \text{ Hm}^3$ ), que regula as vazões calculadas pelo modelo atualizado, supera, em 14%, o valor obtido, aplicando o primeiro modelo.

e) Em definitiva, os algoritmos reunidos no quadro n. 1 permitem concluir pela validade das modificações propostas no presente estudo, no que diz respeito à distribuição das vazões  $Q_c$ ; a operação do reservatório — cuja capacidade útil  $C_c$  depende essencialmente da referida distribuição — prova uma bem maior aproximação da previsão estatística ao processo natural hidrometeorológico.

Menos perceptível resultou a vantagem do Modelo modificado, tomando como elemento de confronto, os volumes globais:

$$f(T); f_c(T)$$

utilizáveis no inteiro ciclo. É lícito, contudo supor que essa margem deva aumentar, quando se considerem bacias hidrográficas em que, devido às características geológicas e climáticas, o regime dos deflúvios apresenta irregularidades mais relevantes, na sucessão natural das estações do ano.

#### IV — Conclusões:

IV.1 — O destaque mais significativo do método atualizado consiste na separação entre períodos chuvosos — em que existe uma real dependência entre chuvas e deflúvios — e períodos secos (chuvas insignificantes),

Quadro 1

VALORES								(f <sub>c</sub> - f)
MÉTODOS	NEGATIVOS			POSITIVOS			MÉDIA GLOBAL	
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIO		
	em (in) m <sup>3</sup> /s							
PRIMEIRO	- 97,52	- 1,85	- 51,87	74,39	0,35	27,73	- 26,35	
MODIFICADO	- 46,29	- 0,91	- 23,65	48,88	0,76	23,80	- 2,06	
	em (in) % C <sub>c</sub>							
PRIMEIRO	- 40,48	- 0,77	- 21,53	30,88	0,15	11,51	- 10,94	
MODIFICADO	- 16,80	- 0,33	- 8,59	17,74	0,28	8,64	- 0,75	
	(1º método)			C <sub>c</sub> = 240,9 m <sup>3</sup> /s = 624hm <sup>3</sup>				
	(Método Modificado)			C <sub>c</sub> = 275,5 m <sup>3</sup> /s = 714hm <sup>3</sup>				

nos quais o runoff é alimentado pelas correntes subterrâneas.

IV.2 - Quando os dados de observações diretas disponíveis forem suficientes, será sempre preferível classificar os subciclos chuvosos (ver subitem III.1) nas duas séries: de alta pluviosidade (ch) e de escassa pluviosidade (e.ch).

Se, entretanto, o ciclo T de n anos for de breve duração, será mister, pelo menos em primeira aproximação, reunir todos os subciclos, numa única série, agrupando-os, exclusivamente, em função da duração.

IV.3 - Nenhuma limitação deve ser feita, no que diz respeito aos períodos secos, em virtude da estrutura da fórmula (55).

Cabe, somente, ressaltar a relevância do que foi afirmado no subparágrafo 3.5 do item III, em que é feita especial referência a bacias situadas em regiões semi-áridas.

O cálculo do decrescimento das vazões, em função do esgotamento dos lençóis freáticos, elimina uma incoerência que infirma o primeiro modelo [I], também reconhecendo que a sua aplicação exclui os resultados absur-

dos (ver preâmbulo), que não podem ser evitados, aplicando o método tradicional das regressões múltiplas, lineares e não lineares.

IV.4 - O teste de precisão do modelo, proposto no subitem III.5, além de constituir um elemento básico de credibilidade, para o estudo do aproveitamento dos recursos hídricos, tem o indiscutível requisito de relacionar valores acumulados progressivos de afluxos e deflúvios. Eventuais discrepâncias — não justificadas — entre as chuvas e deflúvios que possam ocorrer em certos meses, tornam-se muito menos relevantes, quando a correlação entre os dois referidos elementos primários se funda sobre as funções (37) e (38), a saber, H (d.) e V (d.).

Cumpro o grato dever de manifestar o meu agradecimento ao Dr. Eng. Antonio de Pádua Paschoal Cordeiro, Diretor da 12.ª Diretoria Regional do DNOS, que patrocinou a preparação e a publicação do presente trabalho. Também desejo mencionar: o Eng. Celso Loredó Vieira da Fonseca, Assistente Geral do Diretor, que facilitou o aproveitamento do pessoal e dos meios disponíveis no Departamento; o Sr. Manoel Yeisum Koshikene, e as Senhoritas Valéria Finatti Tommasi

e Lillian Tereza Sansigolo Haasper, pelos serviços de desenho e, respectivamente, de datilografia.

#### BIBLIOGRAFIA

- (I) - A. Bandini — Nova metodologia para geração e extensão de séries hidrológicas básicas. (New Methodology about basic hydrological series generation and extension). Centro Publicações do DNOS - 12.ª Diretoria Regional - Santos - 1982.
- (II) - N. L. Nucci — Aplicação em bacias de clima semi-árido - (No mesmo volume (I)).
- (III) - V. G. Gonçalves & P. R. de Mello - Aplicação do Modelo Bandini, para extensão de séries hidrológicas básicas à bacia do rio Apiaí-Guaçu. (Bandini's model Appliance for basic hydrological series to Apiaí-Guaçu river basin). Publica a continuação neste volume (Next published in this volume) - DNOS - Santos - 1984.
- (IV) - A. Bandini — Hidrologia. Serviço de Publicação de EESC da USP - São Carlos - 1967.
- (V) - A. Bandini — Regulación de los caudales de cursos de água y las potencias aprovechables, por intermédio de embalses, en derivación o cadena — La Ingenieria. Ns. 908-909-910-911 — Buenos Aires — 1951.