

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GERAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PARA  
UMA BACIA HIDROGRÁFICA

por

Heber Pimentel Gomes

CAMPINA GRANDE, PARAÍBA

OUTUBRO - 1980



G633g

Gomes, Heber Pimentel.

Geração de dados de precipitação para uma bacia hidrográfica / Heber Pimentel Gomes. - Campina Grande, 1980.

79 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1980.

"Orientação : Prof. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan".  
Referências.

1. Bacia Hidrográfica de Oscar Barros. 2. Precipitação Diário. 3. Dissertação - Engenharia Civil. I. Srinivasan, Vajapeyam Srirangachar. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 556.38(043)

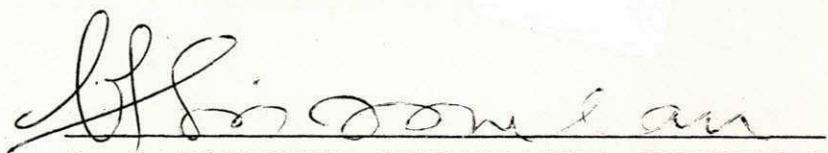
GERAÇÃO DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO PARA  
UMA BACIA HIDROGRÁFICA

HEBER PIMENTEL GOMES  
- Engenheiro Civil -

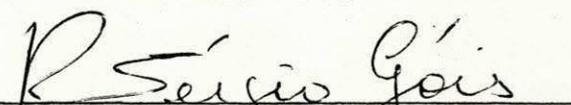
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NE  
CESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

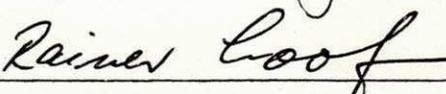
Aprovado por:

COMISSÃO

  
Prof. VAJAPEYAM SRIRANGACHAR SRINIVASAN

- Presidente -

  
Prof. RAIMUNDO SÉRGIO SANTOS GÓIS

  
Prof. RAINER LOOF

CAMPINA GRANDE  
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL  
DEZEMBRO - 1980

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece:

Aos professores Vajapeyam Srirangachar Srinivasan e Carl Wolfgang Stintzing, pela orientação e valiosos ensinamentos, durante a execução desta pesquisa.

À SUDENE, pela cessão dos dados utilizados para a realização do trabalho.

Ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio básico.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica, Eduardo Eneas de Figueiredo e Paulo Roberto Rodrigues Pessoa, responsáveis pela apresentação gráfica.

À Raimundo Sérgio Santos Góis e aos demais colegas da Área de Recursos Hídricos, que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

## R E S U M O

Esta pesquisa visa a obter um modelo de geração sintética de dados de precipitação diária para a Bacia Hidrográfica de Oscar Barros, representativa da região semi-árida do Nordeste Brasileiro, utilizando dados pluviométricos diários, registrados num período de 7 anos (1970-1976).

Para alcançar este objetivo foram adotadas três etapas distintas. A primeira etapa referiu-se à geração da precipitação média sobre a bacia para um período de 24 horas. A segunda etapa tratou da geração das seqüências de dias com chuva e sem chuva, e a terceira se constituiu em distribuir para cada posto pluviométrico, as alturas de precipitação média gerada, tomando como base um modelo de Análise de Variância - Duas Classificações.

Para eliminar o efeito estacional das seqüências de precipitações, os doze meses do ano foram divididos em períodos mensais, nos quais as seqüências poderiam ser consideradas homogêneas. Para cada um dos períodos, as seqüências foram geradas separadamente.

O desempenho do modelo de geração, observado através da comparação entre as seqüências geradas e registradas, indicou que as seqüências das precipitações geradas, conservaram satisfatoriamente as características estatísticas das séries temporais registradas.

## A B S T R A C T

The present study is an attempt to develop a synthetic generation model of daily precipitation for the Oscar Barros watershed, a representative basin of semi-arid area in Northeastern Brazil. The precipitation data, recorded during a period of 7 years (1970-1976), was used in the model.

The development of the model was carried out in three distinct steps. The first step consisted of the generation of mean basin precipitation for 24 hours period on the watershed. The second step dealt with the generation of sequences of days with rain and without rain, and the third with establishing a procedure relating the precipitation of each raingauge and the generated mean basin precipitation for the 24 hours period. The Analysis of Variance model with two way classification was adopted for the final step.

To eliminate the seasonal effects in the precipitation sequences, the twelve months of the year were divided into periods within which the series could be considered homogeneous. For each of these periods the synthetic sequences were generated separately.

The performance of the generation model was evaluated by a comparison between the generated and recorded sequences, which showed that the generated precipitation sequences preserved the statistical characteristics of the recorded time series, satisfactorily.

## S U M Á R I O

	Página
CAPÍTULO I	
INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO II	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
1.0 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS E MO DELOS HIDROLÓGICOS	03
2.0 CARACTERÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS	05
2.1 Homogeneidade Estatística Temporal	05
2.2 Análise de Correlação Serial	06
2.3 Processo de Geração	07
3.0 GERAÇÃO SINTÉTICA DE UMA VARIÁVEL PARA UM ÚNI NICO LOCAL	08
3.1 Presença de Persistência	09
3.1.1 Modelos Média Móvel	09
3.1.2 Modelos Autoregressivos	10
3.2 Ausência de Persistência - Modelos Proba bilísticos	12
3.2.1 Distribuição Retangular	14
3.2.2 Distribuição Normal	14
3.2.3 Distribuição Log-Normal	15
3.2.4 Distribuição GAMA-Dois Parâmetros	16
4.0 GERAÇÃO SINTÉTICA DE UMA VARIÁVEL PARA MAIS DE UM LOCAL	17
4.1 Introdução	17

	Página	
4.2	Análise de Regressão e Correlação	18
4.3	Modelo de Análise de Variância - Duas Clas sificações	19
5.0	ALGUNS MODELOS DE GERAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO	25
5.1	Geração Sintética de Precipitação Esta cional	25
5.2	O Método do "Modelo Urna" de Grace e Eagleson	25
5.3	Geração de Durações de Chuvas Serialmen te Correlacionadas Distribuídas Não-Nor malmente	26
5.4	Seqüências de Chuvas Diárias para um Úni co Local	27
5.5	Modelo Estatístico para Simulação de Pre cipitações Distribuídas Diferentemente Sobre uma Determinada Área	28
CAPÍTULO III		
	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA	30
1.0	DESCRIÇÃO DA BACIA	30
1.1	Localização	30
1.2	Características Físicas	30
1.3	Relevo	31
1.4	Geologia	31
1.5	Cobertura Vegetal	31
1.6	Rede Pluviométrica	31
2.0	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS	32
2.1	Clima	32
2.2	Ventos	32
2.3	Regime Pluviométrico	32
	2.3.1 Alturas Pluviométricas Anuais	33
	2.3.2 Alturas Pluviométricas Mensais	33
2.4	Temperatura	33
2.5	Umidade Relativa do Ar	34

## CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO DO MODELO	38
1.0 INTRODUÇÃO	38
2.0 GERAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA DIÁRIA SOBRE A BACIA	38
2.1 Característica da Série Temporal Registrada	38
2.2 Verificação da Persistência	40
2.3 Distribuição de Probabilidade dos Dados Registrados	41
2.4 Parâmetros do Modelo	43
3.0 GERAÇÃO DE PERÍODOS ALTERNADOS DE DIAS COM CHUVA E SEM CHUVA	45
4.0 DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA GERADA PARA CADA POSTO DA BACIA	48
4.1 Modelo de Análise de Variância	48
4.2 Aplicação do Modelo	49

## CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
1.0 INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS COEFICIENTES DO MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA	61
2.0 DESEMPENHO DO MODELO	64
2.1 Geração das Seqüências de Precipitação	64
2.2 Seqüências dos Dias com Chuva e sem Chuva	64
2.3 Seqüências das Alturas de Chuva para Cada Posto Pluviométrico	65

## CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES	74
BIBLIOGRAFIA	76
APÊNDICE	79

## CAPÍTULO I

### I N T R O D U Ç Ã O

As seqüências cronológicas de dados de precipitação produzem informações de grande uso prático no planejamento e operação de sistemas de recursos hídricos. Essas seqüências são utilizadas, mais precisamente, como dados de entrada para um modelo de simulação chuva-deflúvio, em que o escoamento superficial resultante é essencial nos estudos dentro da área de Recursos Hídricos. Esses estudos podem servir, por exemplo, para a previsão de secas e cheias ou para a construção e operação de reservatórios com fins múltiplos.

Freqüentemente as seqüências registradas de precipitações são curtas, não fornecendo, dessa maneira uma base necessária para a execução de tais trabalhos. Portanto é desejável estender os registros existentes por meio de técnicas utilizadas para gerar seqüências sintéticas de informações hidrológicas. As informações geradas possibilitam melhor base na formulação de alternativas de projetos, para comparação ou otimização, do que os registros históricos existentes. A geração dessas seqüências é feita por meio de modelos matemáticos de caráter estocástico.

Os modelos de geração estocástica, mesmo em relação a própria Hidrologia, possuem um desenvolvimento científico relativamente recente. Embora como idéia os modelos tenham sido imaginados há várias décadas - através dos trabalhos de Hazen (2) em 1914, que utilizou sorteio com baralho para gerar dados de vazão - o primeiro trabalho de repercussão dentro dos moldes que hoje se adotam surgiu somente em 1962 com Thomas e Fiering (2).

Daí para cá, com o aparecimento dos computadores digitais construíram-se novos modelos matemáticos, surgiram modificações e atualmente ainda não se pode considerar que sua estrutura esteja definitivamente estabelecida.

O objetivo deste estudo é obter um modelo estocástico para a geração sintética de dados de precipitação diária sobre uma bacia hidrográfica, representativa do Nordeste Brasileiro, tendo como base os dados pluviométricos já registrados. Para a realização do trabalho, foram escolhidos os dados pluviométricos da bacia de Oscar Barros, situada no Estado de Pernambuco. A escolha recaiu sobre a citada bacia, pela sua representatividade em relação à zona semi-árida do Nordeste, por ela possuir dados registrados de precipitação necessários à execução do trabalho e principalmente, pelo fato da Região Nordeste do Brasil necessitar de um maior número de estudos hidrológicos.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta Revisão Bibliográfica será feita uma descrição dos conceitos básicos de Hidrologia Estocástica, que dizem respeito à análise e geração de séries temporais, como também será feita uma abordagem sobre alguns modelos de geração de precipitação já desenvolvidos.

#### 1.0 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS E MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos Hidrológicos são formulações matemáticas utilizadas para simular um fenômeno natural considerado como processo ou como sistema (2).

Um processo é qualquer fenômeno que sofre variação contínua, particularmente em relação ao tempo. Como praticamente todo fenômeno hidrológico varia em relação ao tempo, eles são *processos hidrológicos*.

Um *sistema hidrológico* foi definido por Dooge (3) como "um conjunto de processos físicos, químicos e/ou biológicos que atuam sobre uma (s) variável (eis) de entrada, para convertê-la (s) em variável (eis) de saída". Entende-se por *variável* qualquer característica do sistema ou do processo que pode ser medida e que assuma diferentes valores no decorrer do tempo.

Os modelos hidrológicos podem ser classificados em *determinísticos* e *estocásticos*. Em um modelo determinístico admite-se que o resultado efetivo seja determinado pelas condições *físicas*

sicas sob as quais o experimento ou procedimento seja executado. Em um modelo estocástico ou probabilístico, no entanto, as condições da experimentação determinam somente o comportamento probabilístico do resultado observável (9). Chow (2) classifica os processos e seus modelos como segue: "Se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo for ignorada e o modelo for considerado para seguir uma lei de certeza mas não alguma lei de probabilidade, o processo e seu modelo serão definidos como *determinístico*. Por outro lado, se a chance de ocorrência das variáveis for levada em consideração e o conceito de probabilidade for introduzido na formulação do modelo, o processo e seu modelo serão denominados *estocástico ou probabilístico*".

Estritamente falando, um processo probabilístico é diferente de um processo estocástico. O processo probabilístico é considerado como independente do tempo, sendo neste caso, ignorada a seqüência de ocorrência das variáveis envolvidas no processo. A chance de ocorrência é considerada para seguir uma determinada distribuição de probabilidade, na qual as variáveis são consideradas puramente aleatórias. O processo estocástico é considerado geralmente como dependente do tempo, sendo observada a seqüência de ocorrência de suas variáveis. As variáveis do processo estocástico podem ser também puramente aleatórias ou não-puramente aleatórias. Matematicamente, um processo estocástico representa uma família das variáveis aleatórias  $X(t)$  que é uma função do tempo (ou outros parâmetros), e cuja variável  $x_t$  é obtida ao longo do tempo  $t$  dentro de uma faixa de tempo "T" (2).

O processo estocástico pode ser *contínuo* ou *discreto*. No processo discreto a amostragem é feita em intervalos uniformes de tempo e os valores da amostra formam uma seqüência:  $x(t_1)$ ,  $x(t_2)$ ,  $x(t_3)$ , ..., onde  $t_1 < t_2 < t_3, \dots$ . Essa seqüência de valores amostrais é conhecida como *série temporal*, como por exemplo, uma seqüência de precipitações médias diárias. No processo contínuo, a amostragem é feita continuamente e a série temporal é separada por intervalos de tempo  $\Delta t$ , onde  $\Delta t$  tende para zero. Um Hidrograma é um exemplo de uma série temporal contínua.

Geralmente é possível classificar as séries temporais em

dois tipos: *estacionária* ou *não-estacionária*. Considere-se que a série temporal seja dividida em vários segmentos e que uma certa distribuição de probabilidade, como também um parâmetro estatístico, sejam usados para caracterizar os dados dentro de cada segmento. Se esta distribuição e o parâmetro estatístico permanecem os mesmos para cada segmento, a série temporal é es tacionária. Do contrário, a série temporal é *não-estacionária*.

## 2.0 CARACTERÍSTICA DAS SÉRIES TEMPORAIS

### 2.1 Homogeneidade Estatística Temporal

Um processo ou série temporal é considerada homogênea em relação ao tempo se os eventos em consideração na série temporal são igualmente prováveis de ocorrer para todo o tempo (2). Assim, somente os processos puramente aleatórios e estacioná rios são homogêneos em relação ao tempo. Em Hidrologia, os da dos estritamente homogêneos com relação ao tempo são praticamente inexistentes, por causa das várias espécies de variações na turais ou artificiais existentes na maioria dos fenômenos hidro lógicos. Essas variações nos fenômenos hidrológicos causam des vios nas séries temporais os quais podem ser classificados em três tipos: *tendência*, *periodicidade* e *persistência*.

#### a) Tendência

A tendência é uma mudança unidirecional que diminui ou aumenta os valores médios de uma variável hidrológica (2). Ela pode ser claramente visível em um gráfico que mostre os va lores totais das precipitações mensais registradas durante um ano. Existem várias técnicas estatísticas utilizadas para deter minar a tendência numa série temporal. Uma delas comumente usa da é o método da *média móvel*.

#### b) Periodicidade

A periodicidade representa, uma variação de forma periódica ou oscilatória, tal como mudança diurna, estacional e secular que existe freqüentemente em fenômenos hidrológicos. Tais variações são, em geral, de comprimento quase constante e podem ser determinadas pelo método estatístico de análise harmônica.

### c) Persistência

A persistência significa que os membros sucessivos de uma série temporal são ligados entre si de alguma maneira dependente, resultando em não-aleatoriedade da seqüência. Devido a causas meteorológicas e climáticas, tem sido observado que tanto os anos chuvosos como os anos secos tendem a ocorrer em grupo. Esta tendência dos eventos ocorrerem em grupo, tendo o efeito de transportar as condições hidrológicas imediatamente anterior para as condições subseqüentes, é a indicação da presença da persistência em fenômenos hidrológicos. Tem sido observado também que a persistência é inversamente relacionada com o intervalo de tempo entre os eventos observados, e que sua intensidade depende do tipo de dados hidrológicos. Desta forma, quando o intervalo de tempo é curto, a persistência torna-se mais acentuada e ela é mais alta em vazão de rio do que em precipitação. A intensidade da persistência pode ser determinada pela análise de correlação serial.

## 2.2 Análise de Correlação Serial

No processo estocástico as variáveis podem ser puramente aleatórias ou não-puramente aleatórias. Se puramente aleatórias, os elementos da série temporal são independentes entre si e constituem uma seqüência aleatória. Se não-puramente aleatória, os elementos da série temporal são dependentes entre si, e são compostos de um componente determinístico e um componente puramente aleatório. O componente determinístico existe quando as observações separadas por "k" unidades de tempo são dependen

tes.

Seja  $x_i$  os valores da série temporal, onde  $i$  varia de 1 até o número total  $N$  da série. Se os valores de  $x_i$  são linearmente dependentes dos valores  $x_{i+k}$ , então a correlação entre  $x_i$  e  $x_{i+k}$  é tomada como uma medida de dependência entre os elementos da série. Esta correlação é referida como *correlação serial de k-ésima ordem*.

Se  $x_i$  e  $x_{i+k}$  são considerados dois conjuntos de dados, então o coeficiente de correlação serial de k-ésima ordem, segundo Clarke (3), é:

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.1)$$

onde

$$\bar{x} = (1/N) \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.2)$$

Para  $k=0$ , segue que  $r_0=1$  e para  $k \geq 1$ ,  $-1 \leq r_k \leq 1$ .

Se a série temporal é estritamente aleatória,  $r_k=0$  para todos os valores de  $k > 0$ . Contudo, para uma amostra de tamanho finito, os valores computados de  $r_k$  podem diferir de zero, devido a erros amostrais.

Uma representação gráfica dos  $r_k$ 's como uma função de  $k$ , onde os valores de  $r_k$  são plotados como ordenada contra seus respectivos valores de  $k$  como abscissa é chamada *correlograma*. A curva obtida pela união dos pontos do correlograma pode ser representada por uma função, chamada *função de autocorrelação*.

### 2.3 Processo de Geração

Quando a seqüência dos eventos de uma série não é puramente aleatória, ela pode ser representada por um processo de geração, que é definido, segundo Dawdy e Matalas (5), como

sendo "uma maneira pela qual as forças causativas agem para produzir uma série temporal". Alguns processos podem ser expressos matematicamente (modelos matemáticos) e, em tais casos, é possível determinar diretamente as várias características estatísticas da série temporal. Sempre uma série temporal não-aleatória é aproximada por um certo processo. A escolha do processo ou do modelo matemático que representa o processo é baseada na conformação da estrutura matemática do modelo em relação às características físicas da série temporal. Os processos que têm sido mais usados em Hidrologia são o *média móvel* e o processo *autoregressivo*.

Quando os elementos da série temporal são independentes entre si, isto é, a seqüência é aleatória, o processo que representa esta série é um processo puramente aleatório. No caso de processos puramente aleatórios, os modelos matemáticos que se ajustam a esses processos são os modelos baseados nas distribuições de probabilidade, ou seja, são modelos probabilísticos.

Uma maneira de distinguir uma seqüência puramente aleatória de uma seqüência não aleatória é através dos coeficientes de correlação serial e do correlograma. Se os valores dos coeficientes  $r_k$  são valores dispersos em torno de zero, então a seqüência dos eventos da série temporal é puramente aleatória. Se os valores de  $r_k$  são significativamente diferentes de zero, então há evidência de persistência entre os valores da série, e o correlograma fornecerá uma base teórica para a distinção entre o melhor processo de geração ou modelo matemático que se ajusta a essa série temporal.

### 3.0 GERAÇÃO SINTÉTICA DE UMA VARIÁVEL PARA UM ÚNICO LOCAL

Geração seqüencial de informações hidrológicas é um processo que utiliza modelos matemáticos para gerar seqüencialmente registros sintéticos hidrológicos. Os dados sintéticos são gerados tomando como base as características estatísticas da seqüência de dados já registrados.

Quando as seqüências sintéticas são de precipitações em

um determinado local ou de vazões de um rio em uma seção particular, a geração de tais seqüências é denominada *geração em um único-local*.

Hã duas classes distintas de modelos matemáticos de geração sintética de seqüências hidrológicas. A primeira é constituída dos modelos utilizados quando há persistência entre os dados registrados, e a segunda quando não há persistência entre os dados registrados.

### 3.1 Presença de Persistência

Existem vários modelos matemáticos utilizados para a geração de seqüências sintéticas de dados hidrológicos quando há persistência entre os valores já registrados. Dentre eles, os mais empregados são o *média móvel* e o *autoregressivo*.

#### 3.1.1 Modelo Média Móvel

O processo média móvel e seu modelo podem ser expressos como:

$$x_t - \mu = \epsilon_t + b_1 \epsilon_{t-1} + b_2 \epsilon_{t-2} + \dots + b_m \epsilon_{t-m} \quad (2.3)$$

A equação 2.3 representa o desvio da variável  $x_t$  de sua média populacional  $\mu$  como uma média ponderada (peso  $b_j$ ) da variável aleatória  $\epsilon_t$ , distribuída normalmente e independentemente, onde  $m$  é a ordem da média móvel.

Os pesos  $b_0, b_1, \dots, b_m$  devem ser todos positivos e somar a unidade, ou seja:

$$\sum_{j=0}^m b_j = 1 \quad (2.4)$$

Para se determinar a ordem do modelo média móvel, requerida para descrever a persistência da série temporal, devem ser estimados  $m+2$  parâmetros ( $b_1, b_2, \dots, b_m; \mu$  e  $\sigma_\epsilon^2$ , on

de  $\sigma_\varepsilon^2$  é a variância de  $\varepsilon_t$ ). Jenkins e Watts (3) descreveram métodos para estimar os parâmetros e determinar a ordem do modelo.

Para a utilização do modelo média móvel deve ser analisada a sua função de autocorrelação " $\rho_k$ ".

Para os dados registrados separados por  $k$  unidades de tempo, Quimpo (13) define a função de autocorrelação como sendo:

$$\rho_k = 1 - \frac{k}{m} \quad \text{para } k \leq m \quad (2.5)$$

$$\rho_k = 0 \quad \text{para } k > m \quad (2.6)$$

Ou seja, uma linha reta com declividade  $-1/m$  e intersecção com o eixo da abscissa em 1, onde  $k=0$ .

Se a função de autocorrelação da série temporal registrada possui uma forma similar a das equações (2.5) e (2.6), então o modelo empregado para gerar dados sintéticos desta série será o média móvel.

### 3.1.2 Modelo Autoregressivo

O modelo autoregressivo, também conhecido como modelo de MARKOV - em homenagem ao matemático russo A. A. MARKOV (1856 - 1922), que descobriu o processo autoregressivo -, é dado pela seguinte expressão:

$$x_t - \mu = a_1(x_{t-1} - \mu) + a_2(x_{t-2} - \mu) + \dots + a_k(x_{t-k} - \mu) + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

onde  $k$  é a ordem do modelo autoregressivo. A variável aleatória  $\varepsilon_t$  é considerada usualmente para ser normalmente e independentemente distribuída com média zero e variância  $\sigma_\varepsilon^2$ . Para se determinar a ordem  $k$  requerida para descrever a persistência adequadamente, é necessário estimar  $k+2$  parâmetros:  $a_1, a_2, \dots, a_k, \mu$  e a variância  $\sigma_\varepsilon^2$  do resíduo  $\varepsilon_t$ . Métodos eficientes para estimar esses parâmetros são descritos por Kendall e Stuart, Jenkins

e Watts (3).

Dentre os modelos autoregressivos de ordem  $k$ , os mais empregados em Hidrologia são os de primeira e de segunda ordem:

a) Autoregressivo de Primeira Ordem

$$x_t - \mu = a_1(x_{t-1} - \mu) + \epsilon_t \quad (2.8)$$

onde os valores de  $a_1$ ,  $\mu$  e  $\sigma_\epsilon^2$  são estimados pelas equações:

$$\hat{a}_1 = r_1 \quad (2.9)$$

$$\hat{\bar{x}} = (1/N) \sum_{t=1}^N x_t \quad (2.10)$$

e

$$\hat{S}^2 = \frac{(\frac{N-1}{N})(1 - r_1^2)}{(N-3)} \sum_{t=1}^N (x_t - \hat{\bar{x}})^2 \quad (2.11)$$

Para esse modelo, a função de autocorrelação é dada por:

$$\rho_k = r_1^k \quad (2.12)$$

ou seja, se  $r_1$  é positivo, o correlograma decresce monotonicamente de  $r_0=1$  até  $r_\infty=0$ . Se  $r_1$  é negativo, o correlograma oscilará com período unitário em torno da abscissa com uma amplitude decrescente, mas que não desaparece até  $k=\infty$ .

b) Autoregressivo de Segunda Ordem

$$x_t - \mu = a_1(x_{t-1} - \mu) + a_2(x_{t-2} - \mu) + \epsilon_t \quad (2.13)$$

onde os valores de  $a_1$ ,  $a_2$  e  $\sigma_\epsilon^2$  são estimados pelas equações:

$$\hat{a}_1 = \frac{(1 - r_2)}{(1 - r_1^2)} \quad (2.14)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{(r_2 - r_1^2)}{(1 - r_1^2)} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}^2 = & \frac{(N - 2)}{(N - 5)} \left\{ \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x})^2 - \hat{a}_1 \sum_{t=1}^{N-1} (x_t - \bar{x})(x_{t+1} - \bar{x}) - \right. \\ & \left. - \hat{a}_2 \sum_{t=1}^{N-2} (x_t - \bar{x})(x_{t+2} - \bar{x}) \right\} \quad (2.16) \end{aligned}$$

De acordo com Sieker (13), a função de autocorrelação para o modelo de segunda ordem é:

$$\rho_k = a_2^{k/2} \frac{\text{sen}(kv + \psi)}{\text{sen} \psi} \quad (2.17)$$

onde

$$v = \arccos \left( -a_1 / 2\sqrt{a_2} \right) \quad (2.18)$$

e

$$\text{tg} \psi = \frac{1 - a_2}{1 + a_2} \text{tg} v \quad (2.19)$$

### 3.2 Ausência de Persistência - Modelos Probabilísticos

Quando os testes de correlação serial não mostram evidência de persistência entre os dados hidrológicos registrados, a série temporal é considerada puramente aleatória. Neste caso, deve-se primeiramente decidir que distribuição de probabilidade se ajusta aos dados hidrológicos e posteriormente, amostrar valores dessa distribuição para gerar uma seqüência aleatória sin

tética.

A escolha da distribuição que melhor se ajusta é subjetiva. Somente a experiência do hidrólogo e a verificação dos dados decidem o uso de certas distribuições. Contudo, há várias interpretações teóricas ou razões para a preferência de uma distribuição a outra. A maioria das distribuições de probabilidade recomendadas para se ajustar a dados hidrológicos são assintóticas (2). Entre elas, as mais empregadas são a *log-normal* e a distribuição *gama* (também conhecida como *pearson tipo - III*).

W. Teuber (15) utilizou a distribuição log-normal para caracterizar as precipitações mensais nas bacias dos rios Acaraí, Ce e Paraíba, Pb. Hiemstra e Cresse (8) utilizaram um modelo de distribuição log-normal para estender os 27 anos de registro diário em State College, Pennsylvania. G. H. Hargreaves (7) usou a distribuição GAMA para os cálculos das probabilidades de ocorrência de precipitações mensais em 724 estações pluviométricas do Nordeste Brasileiro. H. D. Ayers (1) achou também a distribuição GAMA adequada para caracterizar o comportamento estatístico das chuvas mensais no Sertão Paraibano.

Um outro critério para a seleção é o fato de certas distribuições, tais como a retangular, a normal, log-normal e a distribuição GAMA, serem utilizadas para técnicas de geração, enquanto as outras são muito difíceis de trabalhar em geração (9). Quando duas ou mais distribuições são igualmente prováveis de se ajustar, um método analítico de aderência, tal como o *qui-quadrado*, ou o *método gráfico* por meio de histogramas, pode decidir qual a melhor distribuição.

Quando a distribuição tiver sido decidida, uma sequência sintética de N eventos hidrológicos será obtida amostrando N valores dessa distribuição. O método usado para amostrar valores de uma distribuição consiste, primeiramente, em amostrar valores de uma distribuição retangular (i.e., uma distribuição de valores contínuos sobre o intervalo (0,1), tal que a probabilidade de uma variável aleatória, situar-se num intervalo  $dy$ , é o próprio  $dy$ ) e então transformar as variáveis distribuídas retangularmente em outras, que possuam a distribuição requerida.

### 3.1.2 Distribuição Retangular

A distribuição retangular sobre o intervalo (0,1) possui a seguinte função de distribuição:

$$0 \quad \text{para} \quad x < 0 \quad (2.20)$$

$$f(x) = x \quad \text{para} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (2.21)$$

$$1 \quad \text{para} \quad x > 1 \quad (2.22)$$

Existem vários métodos para gerar valores de uma distribuição retangular. Um deles é dado por Lehmer (3), que usou a fórmula de recorrência dada a seguir:

$$u_i = (a u_{i-1} + c) \text{ (módulo } m) \quad (2.23)$$

onde  $u_i$  é o resto quando  $(a u_{i-1} + c)$  é dividido por  $m$ . O número  $m$  é um inteiro (usualmente uma potência alta de 2 ou 10) e  $a$ ,  $c$  e  $u_i$  são inteiros entre zero e  $m-1$ . Os números  $u_i/m$ , então, formam uma seqüência tendo uma distribuição retangular.

Um outro método é o dado pela fórmula:

$$u_i = \text{parte fracionária de } (\pi + u_{i-1})^5 \quad (2.24)$$

onde os valores de  $u_i$  são gerados seqüencialmente, começando de um valor arbitrário  $u_0$ .

### 3.2.2 Distribuição Normal

A função da distribuição normal com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  é expressa pela fórmula:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(-1/2)(x-\mu)^2/\sigma^2} \quad (2.25)$$

A função da distribuição normal padrão, de  $m\bar{e}$

dia zero e variância unitária é:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{(-1/2)x^2} \quad (2.26)$$

Há também vários métodos para gerar valores de uma variável distribuída normalmente. Entre eles, o método de Box e Müller (3) requer, a geração de valores  $u_i$  e  $v_i$  com distribuição retangular sobre o intervalo (0,1). Assim:

$$x_i = (-2 \log_e u_i)^{1/2} \cos(2\pi v_i) \quad (2.27)$$

onde  $x_i$  é normalmente distribuído com média zero e variância unitária.

Para se obter valores normalmente distribuídos com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ , utiliza-se a seguinte fórmula:

$$X_i = \mu + \sigma x_i \quad (2.28)$$

### 3.2.3 Distribuição Log-Normal

A função da distribuição log-normal é:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{(-1/2)(z-\mu_z)/\sigma_z^2} \quad (2.29)$$

onde

$$z = \ln x \quad (2.30)$$

Para se gerar valores de uma distribuição log-normal, o procedimento é o seguinte:

a) Geram-se valores  $x_i$  de uma distribuição normal-padrão  $N(0,1)$ ; e

b) Transformam-se esses valores para  $X_i = \exp(\mu + \sigma x_i)$ , onde  $X_i$  possui uma distribuição log-normal com parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$ .

### 3.2.4 Distribuição GAMA-Dois Parâmetros

A função da distribuição GAMA com dois parâmetros possui a seguinte forma:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (2.31)$$

onde  $\Gamma(\alpha)$  é a função GAMA completa, dada na forma:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (2.32)$$

A fórmula de recorrência para a geração de variáveis, possuindo uma distribuição GAMA com dois parâmetros é:

$$y_i = \alpha\beta \left(1 - \frac{1}{9\alpha} + \frac{x_i}{3\sqrt{\alpha}}\right)^3 \quad (2.33)$$

onde  $x_i$  é distribuído normalmente ( $N(0,1)$ ) e  $\alpha$  e  $\beta$  são os parâmetros da distribuição GAMA que podem ser estimados pelo método da máxima verossimilhança dado por Yevjevich (17), a partir da série amostral, ou seja:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + (4/3)(\ln \bar{y} - (1/N) \sum_{i=1}^N \ln y_i)}}{4 (\ln \bar{y} - (1/N) \sum_{i=1}^N \ln y_i)} - \Delta \hat{\alpha} \quad (2.34)$$

e

$$\hat{\beta} = (1/\hat{\alpha}) (1/N) \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.35)$$

onde  $y_i$  são os valores dos eventos registrados e  $\bar{y}$  é a média aritmética dos valores de  $y_i$ .  $\Delta \hat{\alpha}$  é uma correção necessária para

$\hat{\alpha}$  e seu valor pode ser obtido através de gráficos ou tabelas disponíveis nos textos que tratam sobre o assunto (Ex.: Yevjevch (17) p. 179).

#### 4.0 GERAÇÃO SINTÉTICA DE UMA VARIÁVEL PARA MAIS DE UM LOCAL

##### 4.1 Introdução

Quando as seqüências sintéticas são de precipitações em mais de um local ou de vazões de um rio em várias seções, a geração de tais seqüências é denominada *geração em multi-locais*. Às vezes é necessário gerar seqüências simultâneas de várias variáveis hidrológicas, como por exemplo, precipitação, descarga de um rio e nível de água subterrânea. Em tais casos, os modelos são conhecidos como *modelos de geração multivariáveis* (3).

Alguns modelos já foram construídos para gerar seqüências sintéticas de uma variável em mais de um local ou para gerar seqüências simultâneas de mais de uma variável hidrológica, quando há persistência entre os eventos de cada seqüência separadamente. Dentre eles, os modelos de Thomas-Fiering (3), Mataltas (5), o "Fractional Gaussian noise" (3) e o Média Móvel de Primeira Ordem para Multivariáveis (3), são os mais abordados na bibliografia. Ao contrário dos modelos de uma variável para um único local, os modelos multi-locais ou multivariáveis devem preservar também a correlação cruzada entre cada par de seqüências. Inevitavelmente, as fórmulas e os cálculos utilizados nos modelos acima citados são bem mais extensos do que no caso dos modelos de uma variável para um único local. Na prática esses modelos são raramente empregados, em virtude do grande número de parâmetros que devem ser estimados (3). Para citar um exemplo, o modelo de Thomas-Fiering (3), construído para gerar dados de vazão mensal para duas seções em um curso d'água, possui 132 parâmetros a serem estimados. O modelo multivariável de Mataltas (5), construído em 1967 e desenvolvido por Yong (3) em 1968 para gerar dados de vazão em mais de uma seção num curso d'água, depende de algumas restrições a serem obedecidas, ou se

ja, cada uma das "n" seqüências  $Y_t^{(n)}$  devem ser estacionárias na média, na variância e na estrutura correlacional.

Uma alternativa para a geração de seqüência de uma variável hidrológica para mais de um local é a utilização de métodos estatísticos, tais como a *análise de regressão e correlação* ou os *modelos de análise de variância*. Tais modelos possuem vantagem em relação aos anteriormente citados devido ao fato da geração para mais de um local poder ser feita gerando, primeiramente, uma seqüência para um único local e posteriormente distribuindo essa seqüência gerada para os outros locais, através das equações fixas do modelo. Além do mais, os cálculos utilizados para o desenvolvimento dos modelos de regressão e correlação, ou os modelos de análise de variância são menos extensos do que os cálculos utilizados nos modelos multi-locais.

#### 4.2 Análise de Regressão e Correlação (17)

A análise de regressão e correlação está incluída entre as mais antigas técnicas estatísticas usadas em hidrologia. O principal objetivo dessa análise é a transferência de informações entre uma mesma variável medida em diversos pontos, ou entre duas variáveis dentre várias observadas simultaneamente. Isso inclui o preenchimento de falhas dos dados de uma série hidrológica e o prognóstico de uma variável a partir de várias outras variáveis observadas.

A *regressão* representa uma equação matemática que expressa uma variável aleatória como sendo correlativamente relacionada a uma ou a mais variáveis aleatórias. A *correlação* representa o grau de associações das variáveis envolvidas na equação de regressão. A escolha da equação de regressão depende dos dados das variáveis inter-relacionadas. Se duas séries, X e Y, com valores medidos simultaneamente  $(x_i, y_i)$  e plotados em um sistema de coordenadas retangulares, mostrar uma concentração de pontos nas proximidades de uma reta, a correlação é linear e a regressão é caracterizada pela equação de uma reta. Se, no entanto, todos os pontos parecem estar próximos de alguma curva,

a correlação é denominada não-linear e uma equação não-linear é apropriada para a regressão entre as variáveis das séries X e Y. O ajustamento da equação de regressão a uma função matemática pré-selecionada, pode ser obtido por vários métodos. No entanto, um método analítico mais freqüentemente utilizado é o *método dos mínimos quadrados*. Quando apenas duas variáveis são relacionadas, o processo é denominado *regressão e correlação simples*. No caso de mais de duas variáveis relacionadas, a análise é denominada *regressão e correlação múltipla*.

O desenvolvimento da análise de regressão e correlação pode ser resumido nas seguintes etapas:

- a) Seleção de uma função do tipo linear ou não-linear que melhor correlacione as variáveis da regressão simples ou múltipla;
- b) Estimativa dos parâmetros estatísticos das variáveis;
- c) Verificação da significância da correlação;
- d) Estimativa dos parâmetros da equação de regressão, e
- e) Estabelecimento dos limites de confiança quando associado a uma certa probabilidade ou risco.

#### 4.3 Modelo de Análise de Variância - Duas Classificações

O modelo de análise de variância é um método de análise estatística que tem por objetivo a análise múltipla de uma única variável aleatória. Ele pode ser aplicado para uma variável hidrológica, tal como precipitação, temperatura, ou nível de água subterrânea para analisar o seu comportamento perante os vários fatores que atuam simultaneamente. Quando se analisa o efeito de apenas um fator, o modelo de análise de variância é chamado *análise de variância - uma classificação*. Quando se trata de mais de um fator, o modelo é chamado *análise de variância*

multipla classificação.

Os modelos de análise de variância distinguem-se também, além do número de fatores, pelas caracterizações de cada um dos seus componentes, que podem ser *sistemáticos* ou *ocasionais*. O modelo é do tipo sistemático quando as amostras que compõem o modelo são escolhidas de uma maneira fixa, e é ocasional quando as amostras são escolhidas aleatoriamente.

São hipóteses implícitas básicas à aplicação do modelo que as amostras tenham a mesma variância  $\sigma^2$ , que não haja persistência entre os valores de cada amostra e que a variável em questão seja normalmente distribuída em todas as amostras. Como o método é forte, um afastamento das hipóteses básicas ainda pode levar a resultados válidos, com razoável aproximação (10).

A dupla análise de variância pode ser esquematizada em forma de matriz, como mostra o quadro 2.1.

QUADRO 2.1

Coluna	1	2	3	.....	i	.....	p	Média da Linha	
Linha	1	$Z_{11}$	$Z_{21}$	$Z_{31}$	.....	$Z_{i1}$	.....	$Z_{p1}$	Z.1
2	$Z_{12}$	$Z_{22}$	$Z_{32}$	.....	$Z_{i2}$	.....	$Z_{p2}$	Z.2	
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮	
j	$Z_{1j}$	$Z_{2j}$	$Z_{3j}$	.....	$Z_{ij}$	.....	$Z_{pj}$	Z.j	
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮		⋮	⋮	
q	$Z_{1q}$	$Z_{2q}$	$Z_{3q}$	.....	$Z_{iq}$	.....	$Z_{pq}$	Z.q	
Média da Coluna	$Z_{1.}$	$Z_{2.}$	$Z_{3.}$	.....	$Z_{i.}$		$Z_{p.}$	Z..	

onde as q linhas e as p colunas funcionam como os vários níveis

dos dois fatores que resultam na ocorrência da variável  $Z$ .  $Z_{.j}$  e  $Z_{i.}$  são respectivamente as médias dos valores de cada linha  $j$  e de cada coluna  $i$ . O valor  $Z_{..}$  representa a média total de todos os elementos.

Se cada campo  $Z_{ij}$  possuir mais de um elemento, a análise de variância passa a se chamar *análise de variância - duas classificações com repetição* e nesse caso, cada amostra  $Z_{ij}$  deve conter o mesmo número de elementos. A composição geométrica dos valores da variável  $Z$  é mostrada na figura 1.

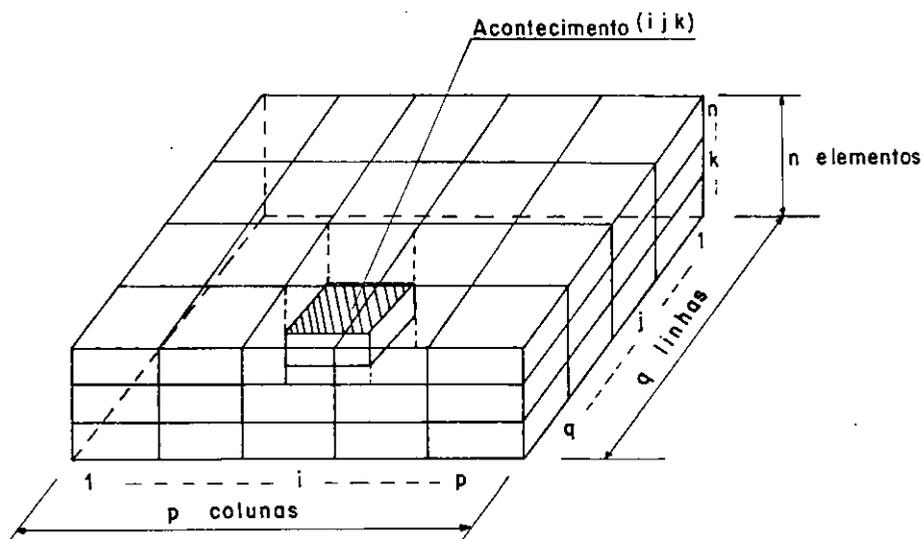


Fig. 1 - Composição geométrica dos valores do modelo de Análise de Variância (Ref. 12 - pág. 215)

Desta forma o campo  $Z_{ij}$  contém os elementos:  $Z_{ij1}, Z_{ij2}, \dots, Z_{ijn}$  com sua média  $Z_{ij.}$ .

O modelo de análise de variância com duas classificações com repetição é dado pela fórmula:

$$Z_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (2.36)$$

na qual

- $\mu$  = média populacional  
 $\alpha_i$  = efeito da coluna  $i$  sobre o acontecimento  $Z_{ijk}$   
 $\beta_j$  = efeito da linha  $j$  sobre o acontecimento  $Z_{ijk}$   
 $(\alpha\beta)_{ij}$  = efeito trocado entre a coluna  $i$  e a linha  $j$   
 $\epsilon_{ijk}$  = resíduo ou o elemento aleatório distribuído normalmente com média zero e variância  $\sigma^2$ .

Os componentes  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$  podem deixar de existir no modelo, desde que seus efeitos não sejam significantes no acontecimento  $Z_{ijk}$ . Para avaliar isso, usa-se um teste de significância (Teste F) aplicado à análise de variância, que pode ser resumido da seguinte maneira:

Seja

$$SQC = nq \sum_{i=1}^p (Z_{i.} - Z_{..})^2 \quad (2.37)$$

$$SQL = np \sum_{j=1}^q (Z_{.j} - Z_{..})^2 \quad (2.38)$$

$$SQI = n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (Z_{ij.} - Z_{i.} - Z_{.j} + Z_{..})^2 \quad (2.39)$$

e

$$SQR = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (Z_{ijk} - Z_{ij.})^2 \quad (2.40)$$

onde  $p$  é igual ao número de colunas e  $q$  é igual ao número de linhas. SQC, SQL, SQI e SQR representam, respectivamente, a soma de quadrados entre colunas, entre linhas, entre a interação de linhas e colunas e a soma de quadrados residual. O quadro apresentado a seguir mostra como se obtêm os valores de F correspondentes às variações entre colunas ( $F_C$ ), entre linhas ( $F_L$ ) e entre a interação de linhas e colunas ( $F_I$ ).

QUADRO 2.2

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio (S)	Teste F	
				Modelo Sistemático	Modelo Ocasional
Entre Colunas	SQC	(p-1)	$S_C^2 = \frac{SQC}{(p-1)}$	$F_C = \frac{S_C^2}{S_R^2}$	$F_C = \frac{S_C^2}{S_I^2}$
Entre Linhas	SQL	(q-1)	$S_L^2 = \frac{SQL}{(q-1)}$	$F_L = \frac{S_L^2}{S_R^2}$	$F_L = \frac{S_L^2}{S_I^2}$
Interação entre Linhas e Colunas	SQI	(p-1)(q-1)	$S_I^2 = \frac{SQI}{(p-1)(q-1)}$	$F_I = \frac{S_I^2}{S_R^2}$	$F_I = \frac{S_I^2}{S_R^2}$
Residual	SQR	p.q(n-1)	$S_R^2 = \frac{SQR}{p.q(n-1)}$		

No caso do modelo tipo sistemático, se o valor calculado  $F_C$  excede o valor de  $F$  tabelado com  $(p-1)$  e  $pq(n-1)$  graus de liberdade para um nível de risco escolhido, a hipótese de que o componente  $\alpha_i$  é insignificante é rejeitada. Neste caso,  $\alpha_i$  não pode deixar de existir no modelo. Da mesma maneira, o teste é aplicado para os componentes  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$ , como também para o modelo do tipo ocasional.

No modelo sistemático os componentes  $\mu$ ,  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$  são fixos e são estimados da seguinte maneira:

$$\hat{\mu} = Z_{..} \quad (2.41)$$

$$\hat{\alpha}_i = (Z_{i.} - Z_{..}) \quad (2.42)$$

$$\hat{\beta}_j = (Z_{.j} - Z_{..}) \quad (2.43)$$

$$(\alpha\beta)_{ij} = (Z_{ij.} - Z_{i.} - Z_{.j} + Z_{..}) \quad (2.44)$$

A variância  $\sigma_\epsilon^2$  do componente aleatório  $\epsilon_{ijk}$  é estimada pelo quadrado médio  $S_R^2$ , ou seja:

$$\hat{\sigma}_\epsilon^2 = \frac{1}{pq(n-1)} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^n (Z_{ijk} - Z_{ij.}) \quad (2.45)$$

O modelo ocasional possui apenas o componente  $\mu$  fixo, que é estimado também pela equação (2.41). As variâncias dos componentes aleatórios são estimados, segundo Sieker (13), pelas equações:

$$\hat{\sigma}^2 \alpha_i = (S_C^2 - S_I^2)/nq \quad (2.46)$$

$$\hat{\sigma}^2 \beta_j = (S_L^2 - S_I^2)/np \quad (2.47)$$

$$\sigma^2 (\alpha\beta)_{ij} = (S_I^2 - S_C^2)/n \quad (2.48)$$

$$e \quad \sigma_{\epsilon}^2 = S_R^2 \quad (2.49)$$

## 5.0 ALGUNS MODELOS DE GERAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO

### 5.1 Geração Sintética de Precipitação Estacional (8)

Um modelo analítico para gerar dados de precipitação estacional foi desenvolvido por Hiemstra e Creese (8) em State College, Pennsylvania. Esse modelo foi construído baseado nas propriedades estatísticas das precipitações registradas durante 27 anos. As médias e as variâncias de importantes características das precipitações foram razoavelmente bem preservadas nos dados sintetizados. As características analisadas foram: quantidade da precipitação, duração da precipitação, comprimento do período seco entre os eventos das precipitações, e parâmetros descrevendo a forma temporal das intensidades das precipitações. O modelo utilizou a distribuição log-normal e a bivariável log-normal para conservar as características das precipitações já citadas. A distribuição bivariável log-normal facilitou a preservação da interdependência entre as variáveis no processo de geração tipo MONTE CARLO. O ciclo estacional das precipitações foi definido subdividindo-se os 365 dias do ano em um período de 60 dias e cinco períodos de 61 dias, começando no dia primeiro de janeiro de cada ano. A forma da distribuição das intensidades das precipitações foi descrita por uma função BETA incompleta. As precipitações foram arbitrariamente separadas quando um período sem chuva excedeu 30 minutos.

### 5.2 O Método do "Modelo Urna" de Grace e Eagleson (3)

Grace e Eagleson (3) desenvolveram em 1966 um modelo para simular um incremento de chuva de 10 minutos. Eles acharam que tanto o intervalo de tempo entre as chuvas, quanto a duração das chuvas, constituem seqüências aleatórias que poderão ser representadas por uma distribuição de probabilidade. Uma seqüên

cia de períodos alternados de dias secos e chuvosos foi então gerada, amostrando-se valores de uma distribuição já ajustada. Grace e Eagleson também acharam que a intensidade da chuva era correlacionada com a sua duração, de modo que, tendo gerado a duração da chuva, a sua intensidade seria gerada através de um modelo de regressão.

Baseando-se nas análises já citadas, considere-se que  $N$  centésimos de uma polegada de chuva devam ser distribuídos entre " $b$ " intervalos de tempo sucessivos de 10 minutos. Um "modelo urna" hipotético foi então usado para distribuir  $N$  bolas pretas entre " $b$ " caixas, e para distribuir " $n_0$ " bolas verdes a fim de introduzir a estrutura correlacional entre as chuvas, correspondentes a intervalos sucessivos de tempo. A primeira bola preta é colocada em uma das " $b$ " caixas, selecionada através de pseudo números aleatórios. Supondo-se que a caixa selecionada seja a caixa " $j$ ". Então, na caixa " $j$ " são colocadas " $m_0$ " das " $n_0$ " bolas verdes; nas caixas " $j-1$ " e " $j+1$ " são colocadas " $m_1$ " das " $n_0 - m_0$ " bolas verdes remanescentes; nas caixas " $j-2$ " e " $j+2$ " são colocadas " $n_0 - m_0 - 2m_1$ " bolas verdes remanescentes, e assim por diante. A segunda bola preta, representando o segundo centésimo de uma polegada de chuva, é colocada de tal modo que, a probabilidade dela cair em uma dada caixa seja proporcional ao número de bolas verdes que a caixa contém. Se ela é colocada numa caixa " $k$ ", então à caixa " $k$ " são adicionadas " $m_0$ " bolas verdes; às caixas " $k-1$ " e " $k+1$ " são adicionadas " $n_0 - m_0$ " bolas verdes, e assim por diante. Os valores de  $n_0$ ,  $m_0$ ,  $m_1$ , ... foram encontrados por intermédio de um método de tentativas.

Grace e Eagleson chegaram à conclusão que esse procedimento arbitrário reproduziu todas as características estatísticas das chuvas de intervalos sucessivos de 10 minutos.

### 5.3 Geração de Duração de Chuvas Serialmente Correlacionadas Distribuídas Não-Normalmente (11)

O trabalho de Raudkivi e Lawgun (11) se constituiu em gerar, para um único local, durações de precipitações com inter

valos de 10 minutos. Os dados utilizados para o desenvolvimento do modelo foram obtidos através de 5 anos de registros de chuvas de 10 minutos, em Auckland, Nova Zelândia.

Para eliminar o efeito estacional, os dados registrados durante cada ano foram separados em classes mensais. Os dados registrados nos mesmos meses, em diferentes anos, foram agrupados em seus respectivos meses e considerados como séries temporais mensais. Essa disposição em classes considerou que as séries temporais eram estatisticamente homogêneas (série estacionária).

O modelo resultante consta de um processo autoregressivo para descrever a persistência entre os eventos, e de uma distribuição de probabilidade para preservar o componente aleatório de cada evento, na seqüência gerada. Para alguns meses (janeiro, junho, julho, agosto e outubro), a ordem "k" da dependência do modelo autoregressivo foi igual a 1, e para os demais meses a ordem foi igual a 2. Alguns testes foram feitos, baseados nos trabalhos de Kendall e Stuart (18), e indicaram que não há vantagens em se tomar valores de "k" maiores do que 2. Para a reprodução da não-normalidade das seqüências, o teste de Kolmogorov-Smirnov indicou que com o uso da distribuição Pearson tipo III (GAMA), com dois parâmetros, o modelo gera seqüências sintéticas que possuem distribuições de freqüências idênticas às distribuições das populações históricas.

Os resultados da correlação serial, dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e coeficiente de assimetria), e da distribuição de probabilidade dos dados históricos, foram bem reproduzidos.

#### 5.4 Seqüências de Chuvas Diárias para um Único Local (4)

Cole e Sherriffe (4) desenvolveram um modelo para gerar dados sintéticos de chuvas diárias para 7 sub-bacias do rio Dee, totalizando uma área de 1060 Km<sup>2</sup>. O modelo é resumido em dois estágios:

a) Geração de seqüências de períodos alternados de dias secos e chuvosos, obtidas através da amostragem de valores de uma distribuição empírica, e

b) Geração das alturas de chuvas diárias, por meio de um modelo de MARKOV de primeira ordem.

O modelo foi deduzido e testado com os dados de Alwen Waterworks, North Wales, correspondentes ao intervalo de anos de 1925 a 1965.

Foi demonstrado que nos sucessivos períodos, chuvoso e seco, chuvoso e chuvoso, ou seco e seco, não havia correlação significativa entre os meses janeiro e fevereiro, e junho e julho. Os períodos secos e chuvosos, para cada mês do ano, foram tabelados em freqüências acumuladas, e nenhuma distribuição ideal se ajustou a essas freqüências. Os períodos secos e chuvosos foram diretamente obtidos através da amostragem de valores de uma distribuição retangular.

Para a análise do modelo markoviano de primeira ordem, foram comparados os histogramas das quantidades de chuvas diárias, geradas para cada período mensal do ano, com os histogramas referentes aos dados de chuvas registrados. O histograma dos totais de chuvas mensais apresentou uma assimetria menos suave do que o histograma correspondente aos totais mensais registrados.

#### 5.5 Modelo Estatístico para Simulação de Precipitações Distribuídas Diferentemente Sobre uma Determinada Área (12)

O trabalho de Sieker (12) se refere a um modelo para simular uma chuva diária, sobre uma bacia hidrográfica, cuja maior intensidade deva ocorrer em um local específico da bacia. Para isso, ele utilizou um modelo de análise de variância com três fatores, com características ocasionais para cada um deles. Dois dos três fatores correspondem à composição por área geográfica

fica da variável aleatória precipitação, formando uma matriz das estações de medição das chuvas. O terceiro fator corresponde aos diversos eventos das precipitações, registradas em cada posto pluviométrico da bacia.

O modelo foi aplicado para a região Seeve situada na parte inferior do rio Elbe, na Alemanha Ocidental. A região em estudo possui 16 estações pluviométricas contendo 8 anos de dados registrados de chuvas diárias. O modelo foi requerido para simular uma chuva diária, com período de retorno de 10 anos, e cuja maior intensidade deveria ocorrer na estação "8", localizada na área central da bacia. O modelo foi utilizado repetidas vezes, para períodos mensais do ano, estatisticamente diferentes. Os resultados observados corresponderam satisfatoriamente aos objetivos propostos pelo modelo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Instituto de Física Para Assinantes do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355  
58.100 - *Campina Grande - Paraíba*

## CAPÍTULO III

### CARACTERIZAÇÃO DA BACIA

Neste capítulo é apresentado uma síntese das características físico-climáticas da bacia de Oscar Barros, descritas detalhadamente no relatório efetuado pela SUDENE (13), em 1977, sobre a bacia do Riacho do Navio.

#### 1.0 DESCRIÇÃO DA BACIA

##### 1.1 Localização

A bacia de Oscar Barros faz parte de um conjunto de 6 sub-bacias que compõem a Bacia Representativa do Riacho do Navio. Ela está situada à Sudeste da bacia do Rio Pajeú, no sertão pernambucano, entre as paralelas  $08^{\circ}04'$  e  $08^{\circ}12'$  de latitude Sul e entre as meridianas  $37^{\circ}48'$  e  $37^{\circ}53'$  de longitude Oeste.

##### 1.2 Características Físicas

As principais características físicas da bacia são:

Área de drenagem	=	45,20 Km <sup>2</sup>
Perímetro	=	29,50 Km
Índice de compacidade	=	1,23
Comprimento do retângulo equivalente	=	10,60 Km
Largura do retângulo equivalente	=	4,26 Km

Índice de declividade	=	0,15
Índice de declividade global	=	16,79 m/Km
Desnível específico	=	125,00 m

### 1.3 Relevo

O relevo encontrado no domínio do riacho do Navio, onde está situada a Bacia de Oscar Barros, não encerra grandes altitudes, pois se trata de uma região de planalto, onde as principais elevações são pertencentes aos divisores d'água. A altitude média da bacia é de 600 m, sendo portanto a cota normal da região.

### 1.4 Geologia

A bacia apresenta pouca variedade litológica, sendo composta na sua maioria por granito intrusivo, micaxistos, paragneisses e migmatitos. O sub-solo é cristalino, destacando-se o gnaisse, os migmatitos e o granito.

Sob o ponto de vista taxonômico, a bacia apresenta uma associação de solos litólicos eutróficos, regosol eutrófico com fragipan, planosols e afloramentos. Os solos litólicos predominam com relação aos outros, tornando a bacia quase que impermeável.

### 1.5 Cobertura Vegetal

Em decorrência do clima, a vegetação predominante é a caatinga, densa e com alto grau de xerofilia. Há uma pequena quantidade de espécies arbóreas e arbustiva, que juntamente com a cultura de subsistência do milho e feijão, completam o quadro da vegetação existente.

### 1.6 Rede Pluviométrica

Existem instalados no interior da bacia e regiões circun-

cunvizinhas 19 postos pluviométricos (Fig. 2). O equipamento é do tipo "Ville de Paris", com uma área de captação de 400 cm<sup>2</sup> e capacidade para 200 mm de chuva.

A tabela 3.1 relaciona os postos pluviométricos da sub-bacia de Oscar Barros com os detalhes de localização sobre cada posto.

## 2.0 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

### 2.1 Clima

Devido a peculiaridade das massas de ar que circulam na região Nordeste do Brasil, e em particular na bacia de Oscar Barros, o ciclo pluviométrico mostra-se curto e irregular, resultando em um clima semi-árido. Segundo a classificação de KÖPPEN, o clima da região é do tipo "BSH", que caracteriza um clima seco.

### 2.2 Ventos

Apesar de não se ter na bacia estações indicadoras da direção dos ventos, observações "in loco" efetuadas por técnicos da SUDENE (13), indicam ventos com direção Sudeste e Este com dominância sobre os outros setores. De uma maneira geral são ventos fracos, com maiores velocidades médias no período seco do que no de chuva.

### 2.3 Regime Pluviométrico

O regime pluviométrico, sob latitude equatorial, apresenta-se como aqueles encontrados nas regiões tropicais, do tipo semi-árido. Assim sendo, encontrar-se-á na bacia de Oscar Barros duas estações bem marcantes: verão-seco, e inverno com chuva. A estação invernososa possui uma duração aproximada de 5 meses, janeiro a maio, onde ocorrem 75% das precipitações anuais, tendo os meses de março e abril como máximos.

### 2.3.1 Alturas Pluviométricas Anuais

Com a finalidade de analisar a série temporal das precipitações anuais registradas na região da bacia de Oscar Barros, escolheu-se a estação de Betânia (latitude  $08^{\circ}17'$ , longitude  $38^{\circ}02'$ , altitude 431 m), localizada bem próxima a bacia, que apresenta a vantagem de possuir uma série de registro, anuais e mensais, mais longa. Os 42 anos de observações (1934-1977) permitem definir as seguintes características estatísticas para as chuvas:

Média	= 514,9 mm
Mediana	= 482,0 mm
Máxima	= 977,5 mm
Mínima	= 217,5 mm
Desvio padrão	= 185,0 mm
Coefficiente de variação	= 0,36

### 2.3.2 Alturas Pluviométricas Mensais

Uma análise das precipitações mensais registradas na bacia de Oscar Barros poderá ser feita observando os valores da tabela 3.2. Esta tabela mostra os valores das precipitações médias mensais, e dos desvios padrões, registrados sobre a bacia de Oscar Barros, comparados com os valores médios e os desvios padrões das precipitações mensais, registradas para a estação de Betânia.

## 2.4 Temperatura

Em virtude da bacia possuir uma área pequena, com relevo moderado, as temperaturas registradas em várias estações climatológicas instaladas na bacia são quase iguais. As variações durante o ano são pequenas, com um máximo em novembro ( $35^{\circ}\text{C}$  às 14 horas) e um mínimo em agosto ( $14^{\circ}\text{C}$  às 4 horas). Os valores médios diários situam-se em torno de  $25^{\circ}\text{C}$ .

## 2.5 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa média mensal não varia muito durante o ano, atingindo um máximo no mês de abril (73% às 9 horas) e um mínimo em novembro (50% às 9 horas).

Como a umidade relativa do ar é um dos fatores determinantes do regime pluviométrico tem-se, como consequência disso, que o mês de abril está situado entre os meses mais chuvosos, enquanto o mês de novembro está entre os mais secos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (83) 321-7222-R 355  
58.100 - Campina Grande - Paraíba

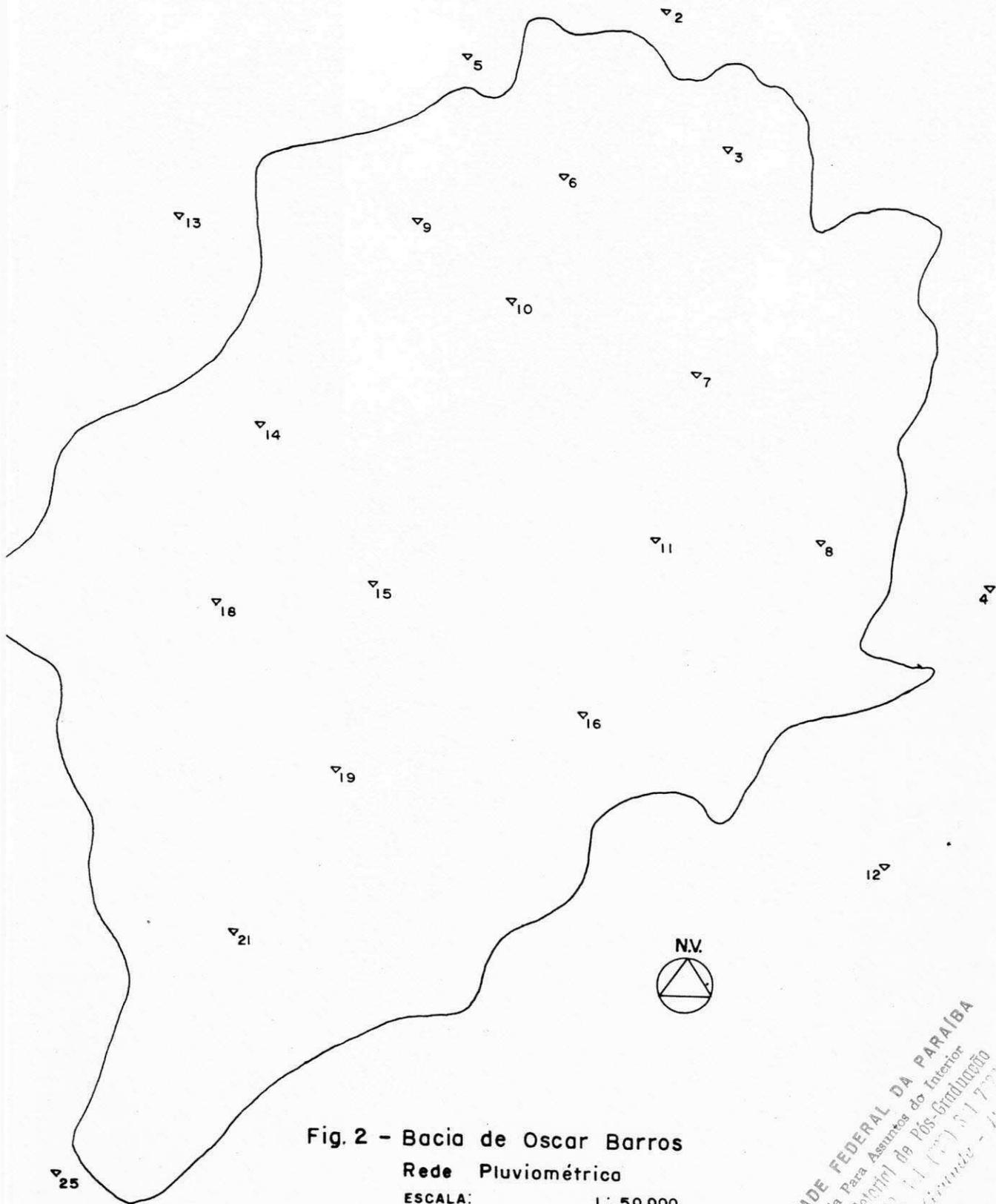


Fig. 2 - Bacia de Oscar Barros  
Rede Pluviométrica  
ESCALA: 1 : 50.000

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
Rec-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Superior de Pós-Graduação  
Rua Aprimada, Tel. 331-1111 (7) 5117-1111  
68.700 - Camp. Pq. Góes de Azevedo - Paraíba

TABELA 3.1

## DESCRIÇÃO DOS POSTOS

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE (m)
P <sub>2</sub>	Serra do Joel	4°4'21"	37°49'05"	700
P <sub>3</sub>	Olho D'água	8°5'00"	37°49'02"	750
P <sub>4</sub>	Cupeti	8°7'14"	37°47'06"	650
P <sub>5</sub>	Malhada Verme lha	8°4'34"	37°50'15"	600
P <sub>6</sub>	Lage do Gato	8°5'06"	37°49'49"	650
P <sub>7</sub>	Serra dos Ca gados	8°6'03"	37°49'12"	650
P <sub>8</sub>	Carua Segundo	8°6'50"	37°48'27"	650
P <sub>9</sub>	Vila Amélia	8°5'20"	37°50'29"	600
P <sub>10</sub>	Piabas Primei ro	8°5'42"	37°50'4"	600
P <sub>11</sub>	Carua Primei ro	8°6'50"	37°49'24"	560
P <sub>12</sub>	Malhada Gran de	8°8'22"	37°48'19"	600
P <sub>13</sub>	Boqueirão	8°5'18"	37°51'34"	580
P <sub>14</sub>	Piabas Segun do	8°6'16"	37°51'12"	630
P <sub>15</sub>	Salobro Segun do	8°7'03"	37°50'23"	550
P <sub>16</sub>	Cajueiro	8°7'23"	37°49'44"	550
P <sub>18</sub>	Macambira	8°7'6"	37°51'24"	580
P <sub>19</sub>	Salobro Pri meiro	8°7'54"	37°50'52"	530
P <sub>21</sub>	Conceição Pri meiro	8°8'40"	37°51'20"	520
P <sub>25</sub>	Conceição Se gundo	8°9'49"	37°52'09"	500

TABELA 3.2

MÉDIA ( $\bar{P}$ ) E DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ ) DAS PRECIPITAÇÕES MENSIS REGISTRADAS NA BACIA DE OSCAR BARROS E NO POSTO DE BETÂNIA

Mêses	Oscar Barros (1971-1977)		Betânia (1971-1977)		Betânia (1934-1977)	
	$\bar{P}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$\bar{P}$ (mm)	$\sigma$ (mm)	$\bar{P}$ (mm)	$\sigma$ (mm)
Janeiro	81,7	47,1	117,7	86,6	65,2	45,1
Fevereiro	96,7	87,5	95,1	92,4	77,1	55,0
Março	130,6	55,0	146,9	88,2	130,3	89,4
Abril	138,1	47,0	109,7	26,8	76,6	69,0
Maio	70,3	48,9	47,7	41,0	43,1	41,6
Junho	55,0	26,5	34,7	33,0	24,2	19,7
Julho	46,5	49,5	18,7	26,8	15,0	16,8
Agosto	9,2	14,5	7,9	13,8	6,7	7,2
Setembro	18,7	18,4	6,6	8,7	4,7	7,2
Outubro	23,8	26,9	11,7	15,6	10,7	13,0
Novembro	20,6	28,3	19,6	27,0	24,1	45,8
Dezembro	32,1	35,6	32,7	30,0	39,9	51,0

## CAPÍTULO IV

### DESENVOLVIMENTO DO MODELO

#### 1.0 INTRODUÇÃO

A metodologia aqui seguida para a geração de dados de pre cipitação diária para os vários postos de uma bacia hidrográfi ca pode ser sintetizada em três estágios. O primeiro estágio se refere à geração da altura de precipitação média sobre a bacia. O segundo gera seqüências de períodos de dias com chuva e sem chuva e o terceiro se constitui na distribuição da altura da precipitação média gerada para cada posto pluviométrico dentro da bacia.

Os dados amostrais utilizados para a formulação do mode lo foram as alturas pluviométricas diárias, registradas nos pos tos pluviométricos da bacia de Oscar Barros (15), num período de 7 anos (1970-1976).

#### 2.0 GERAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA DIÁRIA SOBRE A BACIA

##### 2.1 Característica da Série Temporal Registrada

Devido as condições climatológicas que atuam na re gião da bacia de Oscar Barros, é evidente que a série temporal dos dados de precipitação diária apresente uma característica estacional, que é marcada por um período chuvoso, inverno, e um período seco, verão. Essa mudança no regime pluviométrico torna a série temporal anual não-estacionária. Desse modo, o processo

que descreve essa série seria um processo estocástico não-estacionário. Desde que um processo não-estacionário é muito complicado analiticamente, é conveniente e desejável trabalhar apenas com os processos estacionários. Uma forma comum é dividir a série temporal em segmentos, cuja seqüência de eventos dentro de cada segmento seja homogênea e estacionária. O número de partes em que a série temporal deve ser dividida depende da natureza dos dados. A situação ideal é dividir a série temporal em um menor número possível de partes, sem comprometer a precisão do modelo a desenvolver. Sendo assim, o modelo de geração seria desenvolvido para cada segmento separadamente.

A primeira tentativa foi dividir o ciclo estacional da precipitação anual em 12 meses e analisar separadamente o comportamento estatístico das precipitações diárias registradas para as 12 séries temporais, considerando os 7 anos de dados registrados.

O comportamento das 12 séries temporais de precipitações foi analisado pelos seguintes parâmetros estatísticos: média, desvio padrão, moda, número de dias com chuva e também as variações de cada um desses parâmetros de ano para ano. Foi observado que os meses mais chuvosos (março e abril) possuem características estatísticas semelhantes, podendo ser agrupados em uma única série, o mesmo acontecendo com os períodos maio-julho, agosto-outubro e novembro-dezembro. Os meses de janeiro e fevereiro apresentaram um comportamento diferente dos demais. Desse modo, foram considerados 6 períodos homogêneos para o desenvolvimento do modelo, preservando assim a seqüência cronológica das precipitações diárias ao longo do ano. Os 6 períodos analisados separadamente foram:

- 1º período: JANEIRO
- 2º Período: FEVEREIRO
- 3º Período: MARÇO-ABRIL
- 4º Período: MAIO-JULHO
- 5º Período: AGOSTO-OUTUBRO
- 6º Período: NOVEMBRO-DEZEMBRO

Com a divisão do ciclo estacional do ano em diferentes períodos, a periodicidade da seqüência ficou eliminada do modelo. Como a seqüência dos totais de chuvas anuais para a região de Oscar Barros não mostrou nenhuma tendência durante o período de registro, se conclui então que as seqüências das precipitações diárias, para cada período, podem ser também consideradas não-tendenciosas.

## 2.2 Verificação da Persistência

A verificação da persistência foi feita através da análise dos coeficientes de correlação serial. Para a série temporal MARÇO-ABRIL, constituída das precipitações médias diárias registradas sobre a bacia no respectivo período, durante os 7 anos de registro, os coeficientes de auto-correlação  $r_k$  calculados foram:

$$\begin{aligned}r_1 &= 0,03 \\r_2 &= -0,11 \\r_3 &= -0,10 \\r_4 &= -0,10 \\r_5 &= 0,10 \\r_6 &= -0,45 \\r_7 &= 0,11\end{aligned}$$

A figura 3 mostra o correlograma correspondente aos coeficientes calculados anteriormente.

Como pode ser observado, os coeficientes  $r_k$  são valores dispersos em torno de zero, o que implica em dizer, que a série temporal não apresenta persistência entre seus eventos, ou seja, os elementos da série temporal são independentes entre si. Nesse caso, a seqüência das precipitações médias diárias, para o período MARÇO-ABRIL, é considerada puramente aleatória.

A mesma análise de verificação da persistência foi feita para os outros 5 períodos e ficou também evidenciada a ausência de dependência entre os elementos de cada série temporal,

analisadas separadamente.

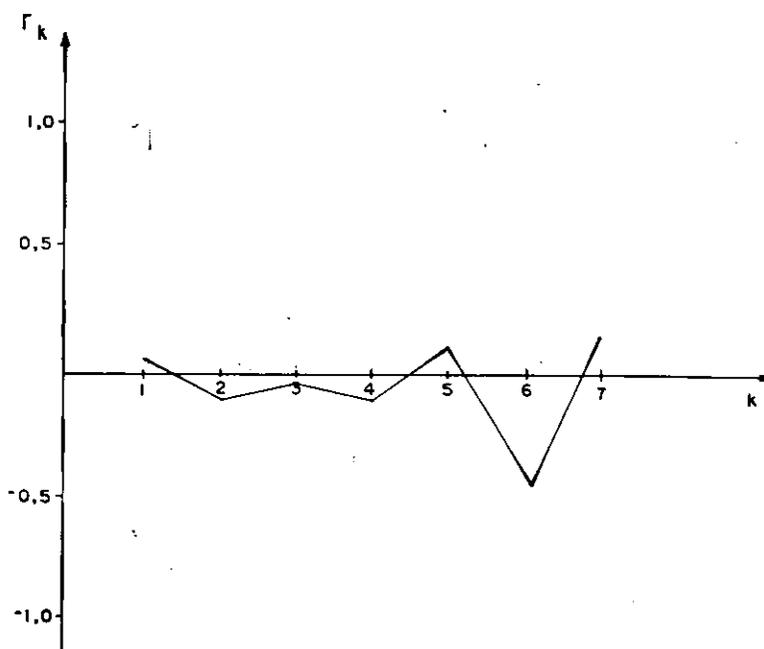


Fig. 3 - Correlograma das alturas pluviométricas diárias correspondente ao período MARÇO-ABRIL

### 2.3 Distribuição de Probabilidade dos Dados Registrados

Já que as seqüências das precipitações não apresentaram persistência entre seus elementos, conclui-se que um modelo probabilístico seria mais indicado. Então, uma distribuição de probabilidade deve ser ajustada a cada uma dessas seqüências, sendo o processo de geração obtido a partir da amostragem de valores dessa distribuição.

A figura 4 mostra a distribuição de freqüência das precipitações médias diárias registradas sobre a bacia, referente ao período MARÇO-ABRIL. Como pode ser observado, a distribuição de freqüência mostrada é assimétrica, o que elimina a possibilidade dos dados serem ajustados por uma distribuição normal. Com base na forma da distribuição de freqüência da figura 4 e em outros trabalhos existentes na bibliografia, a distribuição GAMA com dois parâmetros foi considerada como a melhor distribuição que se ajustou à série temporal, correspondente ao perío

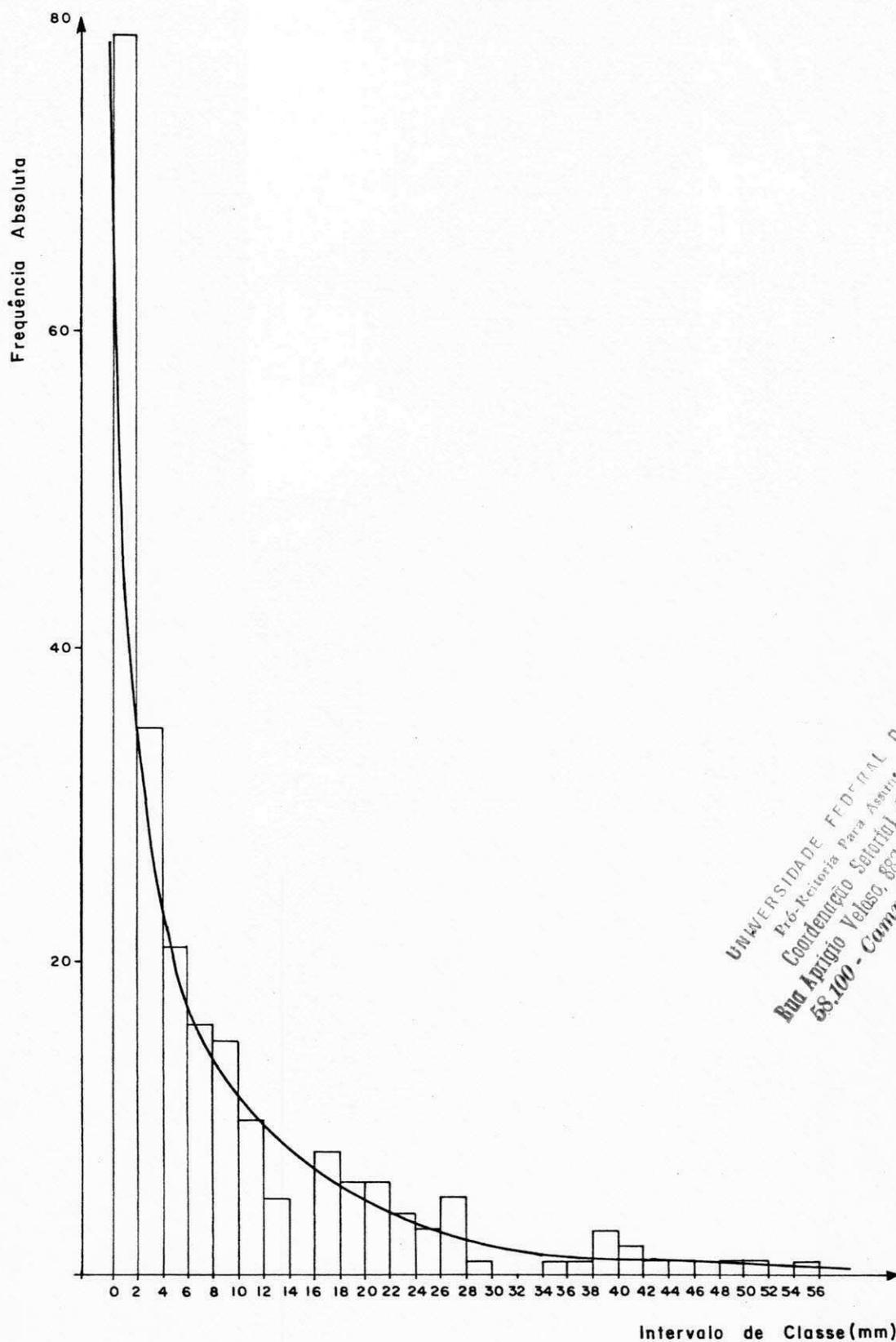


Fig. 4 — Distribuição de frequência das precipitações médias diárias sobre a bacia para o período Março-Abril.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355  
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

do MARÇO-ABRIL.

A mesma análise feita para os outros períodos, indi  
cou a distribuição GAMA de probabilidade com dois parâmetros co  
mo a mais adequada.

#### 2.4 Parâmetros do Modelo

A distribuição de probabilidade GAMA-Dois Parâmetros,  
possui a função:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (4.1)$$

sendo

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4.2)$$

onde

$\alpha$  = parâmetro de escala que foi estimado pela equação:

$$\hat{\alpha} = \frac{1 + \sqrt{1 + (4/3) (\ln \bar{y} - (1/N) \sum_{i=1}^N \ln y_i)}}{4 (\ln \bar{y} - (1/N) \sum_{i=1}^N \ln y_i)} - \Delta \hat{\alpha} \quad (4.3)$$

e

$\beta$  = parâmetro de forma que foi estimado pela equação:

$$\hat{\beta} = (1/\hat{\alpha}) (1/N) \sum_{i=1}^N y_i \quad (4.4)$$

em que

$y_i$  = valores dos eventos já registrados

$\bar{y}$  = média aritmética dos valores de  $y_i$   
 $\Delta\hat{\alpha}$  = correção necessária para  $\hat{\alpha}$ , obtida através da ta  
bela 8.2 do livro de Yevjevch (17).

Os valores calculados de  $\hat{\alpha}$  e  $\hat{\beta}$  são apresentados na ta  
bela 4.1.

Tabela 4.1  
 Valores dos coeficientes  $\hat{\alpha}$  e  $\hat{\beta}$  da distribuição GAMA

Período Coef.	JAN	FEV	MAR-ABR	MAI-JUL	AGO-OUT	NOV-DEZ
$\hat{\alpha}$	0,99	0,98	1,00	0,96	2,70	1,82
$\hat{\beta}$	13,30	12,60	13,74	8,13	2,10	3,85

Para a geração das seqüências das precipitações mé  
dias diárias sobre a bacia, seguiu-se as seguintes etapas:

a) Geração de duas seqüências distribuídas retangularmen  
te. Essas seqüências foram geradas com base na fórmula de recor  
rência 2.24;

b) Geração de uma seqüência de números pseudo-aleatórios  
 normalmente distribuídos ( $x_i$ ), com média zero e variância unitá  
ria. Para a geração dessa seqüência utilizou-se a fórmula de re  
corrência 2.27; e

c) Geração das alturas das precipitações médias diárias  
 sobre a bacia, obedecendo à distribuição GAMA de dois parâme  
tos. A geração dessa seqüência depende dos valores já obtidos  
 nas etapas anteriores e a fórmula de recorrência utilizada foi:

$$y_i = \alpha\beta(1 - (1/9\alpha) + (x_i/3\sqrt{\alpha}))^3 \quad (4.5)$$

Os números negativos gerados nessa etapa foram alterados para o  
 valor zero. Para a geração dessa seqüência, além dos dois parâ  
me

metros  $\alpha$  e  $\beta$ , devem ser conhecidos inicialmente:

- $n$  = número de valores da amostra registrada
- $N$  = número de valores da amostra a gerar
- $u_0$  = valor inicial arbitrário da primeira seqüência de números aleatórios, distribuída retangularmente
- $v_0$  = valor inicial arbitrário da segunda seqüência de números aleatórios, distribuída retangularmente

### 3.0 GERAÇÃO DE PERÍODOS ALTERNADOS DE DIAS COM CHUVA E SEM CHUVA

A geração de períodos alternados de dias com chuva e sem chuva é baseada em um modelo aleatório, em que a ocorrência de um dia chuvoso, ou sem chuva, está condicionada às probabilidades de ocorrer um dia de chuva, quando o dia anterior foi, ou não, chuvoso. Denomina-se:

- $p_0$  = probabilidade de ocorrer um dia chuvoso, quando o dia anterior foi seco, e
- $p_1$  = probabilidade de ocorrer um dia chuvoso, quando o dia anterior foi chuvoso.

As probabilidades  $p_0$  e  $p_1$  são calculadas, com base na seqüência dos dias secos e chuvosos já registrada. Ou seja:

$$p_0 = 1/\ell_0 \quad (4.6)$$

e

$$p_1 = 1 - (1/\ell_1) \quad (4.7)$$

onde

- $\ell_0$  = comprimento médio dos intervalos de dias secos da amostra registrada, e

$\ell_1$  = comprimento médio dos intervalos de dias chuvosos da amostra registrada.

O valor de  $\ell_1$  é obtido somando-se o número de dias chuvosos consecutivos e dividindo-se esse valor pelo número de intervalos chuvosos correspondentes. Da mesma maneira é obtido o valor de  $\ell_0$ .

O modelo de geração dos dias chuvosos e secos foi aplicado separadamente para os 6 períodos do ano, já descritos anteriormente.

A figura 5 mostra o fluxograma das etapas do modelo.

Para a geração da seqüência de dias com chuva e sem chuva, além dos valores calculados de  $p_0$  e  $p_1$ , devem ser arbitrados valores para os seguintes parâmetros:

$u_0$  = valor inicial da seqüência de números aleatórios entre zero e um

$y_0$  = dia anterior ao primeiro dia da seqüência a gerar (seco ou chuvoso), e

$N$  = número de dias da seqüência a gerar

A tabela 4.2 dá os resultados de  $\ell_0$ ,  $\ell_1$ ,  $p_0$  e  $p_1$  para os 6 períodos.

Tabela 4.2

Valores de  $\ell_0$ ,  $\ell_1$ ,  $p_0$  e  $p_1$

	JAN	FEV	MAR-ABR	MAI-JUL	AGO-OUT	NOV-DEZ
$\ell_0$	6,44	7,57	3,10	5,13	15,59	13,28
$\ell_1$	1,59	1,81	2,10	1,63	1,24	1,38
$p_0$	0,16	0,13	0,32	0,19	0,06	0,08
$p_1$	0,37	0,45	0,52	0,39	0,19	0,28

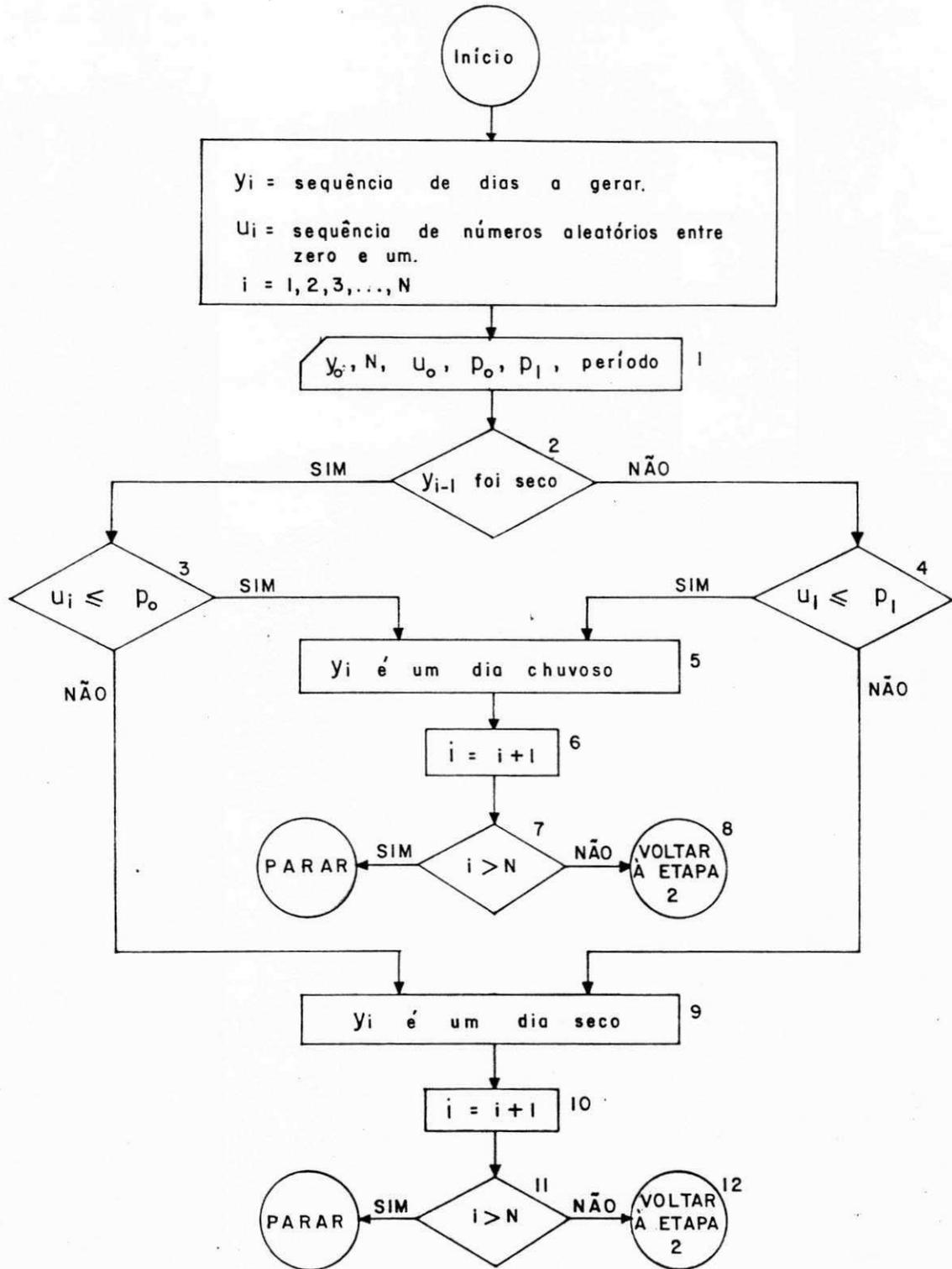


Fig.5 - Fluxograma das etapas do modelo de geração de dias com chuva e sem chuva.

#### 4.0 DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA GERADA PARA CADA POSTO DA BACIA

##### 4.1 Modelo de Análise de Variância

Com a finalidade de distribuir a precipitação média gerada para cada estação pluviométrica situada na bacia, foi aplicado um modelo de análise de variância com duas classificações. A aplicação desse tipo de modelo necessitou da disposição das amostras em linhas e colunas. Em vista disso, no mapa da bacia hidrográfica foi feito um traçado em forma de matriz, cuja disposição das  $p$  colunas e das  $q$  linhas está em concordância com a posição geográfica dos postos pluviométricos da bacia. Por razões técnicas de cálculo é aconselhável (porém não obrigatório) que em cada um dos quadros  $p \times q$  da matriz esteja localizada uma estação de medição. Em consequência disso, sob o ponto de vista geográfico, poderá ser usado um traçado não equidistante das linhas e colunas.

As  $p$  colunas e  $q$  linhas da matriz compõem as duas classificações da análise de variância e as precipitações registradas em cada posto constituem as amostras do modelo. Uma vez que, há mais de um evento em cada amostra, o modelo é de dupla análise com repetição. Desde que o objetivo é determinar as precipitações pontuais em cada posto, como estabelecido na bacia, o modelo é do tipo sistemático. Dessa maneira, a fórmula de recorrência empregada para a geração da precipitação diária em cada posto pluviométrico é:

$$P_{ijk} = \mu_k + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (4.8)$$

sendo

$P_{ijk}$  =  $k$ ésima precipitação gerada para o posto situado na coluna  $i$  e linha  $j$

$\mu_k$  =  $k$ ésima precipitação média gerada sobre a bacia

- $\alpha_i$  = efeito nas precipitações dos postos situados na coluna  $i$   
 $\beta_j$  = efeito nas precipitações dos postos situados na linha  $j$   
 $(\alpha\beta)_{ij}$  = efeito trocado entre colunas e linhas nas precipitações dos postos situados na coluna  $i$  e linha  $j$   
 $\epsilon_{ijk}$  = resíduo, ou o elemento aleatório, distribuído normalmente com média zero e variância  $\sigma_\epsilon^2$

#### 4.2 Aplicação do Modelo

A figura 6 mostra o traçado das linhas e colunas para a bacia de Oscar Barros. A matriz é composta de 4 colunas e 4 linhas, sendo que, para que haja apenas uma estação em cada quadro  $p \times q$  do traçado, os postos  $P_5$ ,  $P_2$  e  $P_{25}$  foram excluídos do modelo.

O quadro 4.1 mostra a matriz esquematizada do modelo, onde:

- $Z_{ij}$  = média amostral das chuvas registradas no posto da coluna  $i$  e linha  $j$   
 $Z_{.j}$  = média aritmética dos valores de  $Z_{ij}$  da linha  $j$   
 $Z_{i.}$  = média aritmética dos valores de  $Z_{ij}$  da coluna  $i$   
 $Z_{..}$  = média aritmética dos valores de  $Z_{.j}$  e  $Z_{i.}$

Em concordância com os dois estágios do modelo de geração anteriormente descritos, essa análise foi feita para os 6 períodos do ano, considerados separadamente.

Para um determinado período do ano, a média amostral  $Z_{ij}$  foi obtida da seguinte maneira:

- a) Foram calculadas as médias aritméticas das precipitações diárias para cada ano, registradas no posto  $P_{ij}$ . Dessa ma

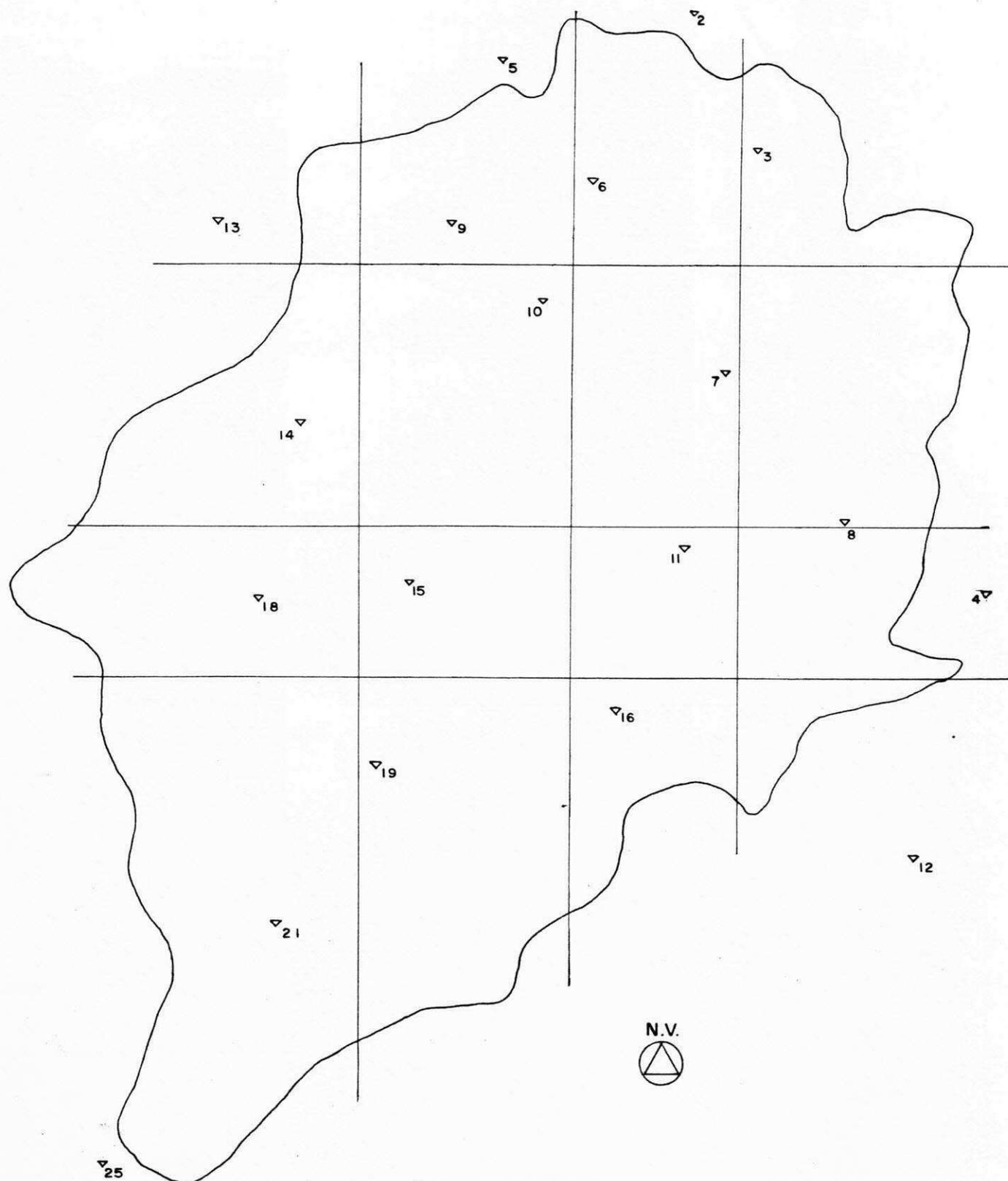


Fig. 6 - Linhas e colunas da dupla  
Análise de Variância.

neira, as amostras correspondentes a cada posto, ficaram reduzidas a 7 valores. Essa modificação se fez necessária, para que cada amostra ficasse possuindo o mesmo número de elementos sin cromaticamente medidos - condição essa exigida para a aplicação do modelo de análise de variância;

b) Calculou-se novamente a média aritmética dos 7 valores de cada amostra, obtendo-se então os valores de  $Z_{ij}$ .

Os coeficientes do modelo  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$  foram estimados pelas equações 2.42, 2.43 e 2.44. Ou seja:

$$\hat{\alpha}_i = Z_{i.} - Z_{..} \quad (4.9)$$

$$\hat{\beta}_j = Z_{.j} - Z_{..} \quad (4.10)$$

e

$$(\hat{\alpha\beta})_{ij} = (Z_{ij.} - Z_{i.} - Z_{.j} + Z_{..}) \quad (4.11)$$

A variância  $\sigma_\epsilon^2$  do componente aleatório  $\epsilon_{ijk}$  foi estimado pela equação:

$$\hat{\sigma}_\epsilon^2 = \frac{1}{p \cdot q(n-1)} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^n (Z_{ijk} - Z_{..}) \quad (4.12)$$

na qual,  $p = q = 4$  e  $n = 7$ .

O componente do modelo  $\mu_k$ , corresponde à seqüência da precipitação média gerada sobre a bacia.

Nos quadros 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 são apresentados os resultados das matrizes do modelo, correspondentes a cada período. A tabela 4.8 dá os valores dos coeficientes  $\alpha_i$ ,  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$ . Os desvios padrões do componente aleatório do modelo são mostrados a seguir.

PERÍODO	$\sigma_{\epsilon}$ (mm)
JAN	4,0
FEV	4,1
MAR-ABR	2,0
MAI-JUL	2,3
AGO-OUT	3,5
NOV-DEZ	3,9

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA**  
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior  
Coordenação Setorial de Pós-Graduação  
Rua A. Pinheiro 1-133 832 - Tel (083) 321-7222-R 355  
58.104 - Campina Grande - Paraíba

QUADRO 4.1

## ESQUEMA DA MATRIZ DO MODELO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	Posto 13 $Z_{11.}$	Posto 9 $Z_{12.}$	Posto 6 $Z_{13.}$	Posto 3 $Z_{14.}$	$Z_{.1}$
2	Posto 14 $Z_{21.}$	Posto 10 $Z_{22.}$	Posto 7 $Z_{23.}$	Posto 8 $Z_{24.}$	$Z_{.2}$
3	Posto 18 $Z_{31.}$	Posto 15 $Z_{32.}$	Posto 11 $Z_{33.}$	Posto 4 $Z_{34.}$	$Z_{.3}$
4	Posto 21 $Z_{41.}$	Posto 19 $Z_{42.}$	Posto 16 $Z_{43.}$	Posto 12 $Z_{44.}$	$Z_{.4}$
Média da Coluna	$Z_{1.}$	$Z_{2.}$	$Z_{3.}$	$Z_{4.}$	$Z_{..}$

QUADRO 4.2

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: JANEIRO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	12,6	12,5	9,7	15,1	12,5
2	13,3	12,6	15,4	13,1	13,6
3	12,1	11,6	12,2	17,0	13,2
4	14,9	10,6	12,5	15,7	13,4
Média da Coluna	13,2	11,8	12,5	15,2	13,2

QUADRO 4.3

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: FEVEREIRO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	13,0	12,6	10,1	13,7	12,4
2	11,5	12,7	10,9	11,7	11,7
3	12,5	10,8	12,3	16,1	12,9
4	12,7	12,5	11,4	15,2	13,0
Média da Coluna	12,4	12,2	11,2	14,2	12,5

QUADRO 4.4

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: MARÇO-ABRIL

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	18,1	16,0	11,9	17,1	15,8
2	13,6	14,6	17,9	17,7	16,0
3	12,3	10,5	16,1	18,9	14,5
4	13,8	11,6	13,1	18,2	14,2
Média da Coluna	14,5	13,2	14,8	18,0	15,1

QUADRO 4.5

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: MAIO-JULHO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	8,9	9,3	7,0	9,3	8,6
2	5,8	8,4	9,1	9,9	8,3
3	6,4	6,2	9,6	10,9	8,3
4	5,9	5,9	7,1	7,8	6,7
Média da Coluna	6,8	7,5	8,2	9,5	8,0

QUADRO 4.6

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: AGOSTO-OUTUBRO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	6,6	6,1	4,5	7,0	6,1
2	5,5	6,1	5,1	5,6	5,6
3	4,8	5,1	5,8	6,1	5,5
4	6,7	5,1	4,4	5,8	5,5
Média da Coluna	5,9	5,6	5,0	6,1	5,7

QUADRO 4.7

VALORES DA MATRIZ DO MODELO DE ANÁLISE  
DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS

Período: NOVEMBRO-DEZEMBRO

Coluna Linha	1	2	3	4	Média da Linha
1	8,7	8,3	6,4	7,9	7,8
2	8,7	8,4	8,2	7,0	8,1
3	7,9	6,2	6,7	8,3	7,3
4	7,8	7,7	7,4	9,7	8,2
Média da Coluna	8,3	7,7	7,2	8,2	7,9

TABELA 4.8

COEFICIENTES DO MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS, PARA CADA PERÍODO

	JAN	FEV	MAR-ABR	MAI-JUL	AGO-OUT	NOV-DEZ
$\alpha_1$	0,0	-0,1	-0,6	-1,2	0,2	0,4
$\alpha_2$	-1,4	-0,3	-1,9	-0,5	-0,1	-0,2
$\alpha_3$	-0,7	-1,3	-0,3	0,2	-0,7	-0,7
$\alpha_4$	2,0	1,7	2,8	1,5	0,4	0,3
$\beta_1$	-0,7	-0,1	0,7	0,6	0,4	-0,1
$\beta_2$	0,4	-0,8	0,9	0,3	-0,1	0,2
$\beta_3$	0,0	0,4	-0,7	0,3	-0,2	-0,6
$\beta_4$	0,2	0,5	-0,9	-1,3	-0,2	0,3
$(\alpha\beta)_{11}$	0,1	0,7	2,9	1,5	0,3	0,5
$(\alpha\beta)_{12}$	1,4	0,5	2,1	1,2	0,1	0,7
$(\alpha\beta)_{13}$	-2,1	-1,0	-3,6	-1,8	-0,9	-0,7
$(\alpha\beta)_{14}$	0,6	-0,4	-1,6	-0,8	0,5	-0,2
$(\alpha\beta)_{21}$	-0,3	-0,1	-1,8	-1,3	-0,3	0,2
$(\alpha\beta)_{22}$	0,4	1,3	0,5	0,6	0,6	0,5
$(\alpha\beta)_{23}$	2,5	0,5	2,2	0,6	0,2	0,8
$(\alpha\beta)_{24}$	-2,5	-1,7	-1,2	0,1	-0,4	-1,4
$(\alpha\beta)_{31}$	-1,1	-0,3	-1,6	-0,7	-0,9	0,2
$(\alpha\beta)_{32}$	-0,2	-1,8	-2,1	-1,6	-0,3	-0,9
$(\alpha\beta)_{33}$	-0,3	0,7	1,9	1,1	1,0	0,1
$(\alpha\beta)_{34}$	1,8	1,5	1,5	1,1	0,2	0,7
$(\alpha\beta)_{41}$	1,5	-0,2	0,2	0,4	1,0	-0,8
$(\alpha\beta)_{42}$	-1,4	-0,2	-0,7	-0,3	-0,3	-0,3
$(\alpha\beta)_{43}$	-0,2	-0,3	-0,8	0,2	-0,4	-0,1
$(\alpha\beta)_{44}$	0,3	0,5	1,1	-0,4	-0,3	1,2

## CAPÍTULO V

### ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será feita uma interpretação física dos coeficientes do modelo de Análise de Variância aplicado ao problema proposto e uma avaliação dos resultados do modelo de geração, comparando as seqüências geradas e registradas.

#### 1.0 INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS COEFICIENTES DO MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Com base no teste F de significância aplicado ao modelo de Análise de Variância (Vide Capítulo II), os valores de  $F_C$ ,  $F_L$  e  $F_I$  foram calculados, para cada período, como mostra a tabela 5.1. Os números de graus de liberdade utilizados para os cálculos de  $F_C$ ,  $F_L$  e  $F_I$  (Vide quadro 2.2) foram:

	Graus de Liberdade		
$F_C$ :	3	e	96
$F_L$ :	3	e	96
$F_I$ :	9	e	96

Para um nível de significância de 5% \*, os valores críticos

(\*) Foi utilizado esse valor por ser o mais adequado à natureza dos dados hidrológicos.

cos de F correspondentes aos graus de liberdade anteriormente citados são:

$$F_{3,96} = 2,7 \quad \text{e} \quad F_{9,96} = 2,0$$

TABELA 5.1

VALORES DE  $F_C$ ,  $F_L$  e  $F_I$  DO TESTE F, APLICADO AO MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

Período F	JAN	FEV	MAR-ABR	MAI-JUL	AGO-OUT	NOV-DEZ
$F_C$	3,2	4,8	6,9	7,1	0,5	1,1
$F_L$	0,3	0,9	3,2	3,9	0,2	0,7
$F_I$	1,2	0,4	2,6	2,3	0,3	0,9

Comparando-se os valores da tabela 5.1 com os valores críticos de F, pode-se concluir o seguinte: Os dois primeiros períodos, JANEIRO e FEVEREIRO, apresentam valores de  $F_L$  e  $F_I$  menores que os seus correspondentes valores críticos de F. Isso demonstra que o efeito entre as linhas, como também o efeito trocado entre as linhas e colunas são insignificantes em relação ao evento  $P_{ijk}$ . Nesse caso, não há justificativa para a permanência dos coeficientes  $\beta_j$  e  $(\alpha\beta)_{ij}$  na equação 4.8 do modelo de Análise de Variância. Em contrapartida, o valor de  $F_C$  é maior do que o seu correspondente F crítico, demonstrando um efeito significativo entre as p colunas do modelo.

As linhas e colunas do modelo foram traçadas paralelamente às direções LESTE-OESTE e NORTE-SUL, respectivamente, como está mostrado na figura 6. Um efeito significativo apenas entre as colunas do modelo, ou seja, diferenças expressivas entre as médias de cada coluna ( $Z_{i.}$ ) e a média total de todos os eventos ( $Z_{..}$ ), revelam que as chuvas já registradas nessa bacia possuem

uma direção predominante perpendicular à direção do traçado das colunas, isto é, na direção LESTE-OESTE. Esse fato já foi atestado por observações meteorológicas realizadas na região da bacia (14).

Com relação aos períodos MARÇO-ABRIL e MAIO-JULHO, todos os valores de  $F_C$ ,  $F_L$  e  $F_I$  são maiores que seus correspondentes  $F$  críticos, sendo portanto significativo todos os coeficientes fixos do modelo. No entanto, os valores de  $F_C$  (6,9 e 7,1), relativos a esses dois períodos, são significativamente maiores que os valores de  $F_L$  e  $F_I$ , o que atesta, da mesma maneira que nos períodos JANEIRO e FEVEREIRO, uma direção predominante no sentido LESTE-OESTE.

Para os períodos AGOSTO-OUTUBRO e NOVEMBRO-DEZEMBRO, os valores de  $F_C$ ,  $F_L$  e  $F_I$  são bem menores que os seus correspondentes valores críticos, não havendo dessa forma significância para os coeficientes fixos do modelo. Estes resultados demonstram que nos meses mais secos - de agosto a dezembro -, a distribuição da precipitação entre vários postos da bacia é aleatória. Então, o modelo de geração das alturas pluviométricas diárias para cada posto  $P_{ij}$  da bacia, passa a ser:

$$\begin{array}{l} \text{Períodos:} \\ \text{JAN e FEV} \end{array} \quad P_{ijk} = \mu_k + \alpha_i + \epsilon_{ijk} \quad (5.1)$$

$$\begin{array}{l} \text{Períodos:} \\ \text{MAR-ABR e MAIO-JUL} \end{array} \quad P_{ijk} = \mu_k + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (5.2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Períodos:} \\ \text{AGO-OUT e NOV - DEZ} \end{array} \quad P_{ijk} = \mu_k + \epsilon_{ijk} \quad (5.3)$$

onde os coeficientes já calculados (Vide Capítulo IV), correspondentes às equações acima, são dados na tabela 5.2. Os desvios padrões  $\sigma_\epsilon$ , do componente aleatório do modelo, passam a ser:

PERÍODO	$\sigma_{\epsilon}$ (mm)
JAN	4,4
FEV	4,6
MAR-ABR	2,0
MAI-JUL	2,3
AGO-OUT	4,3
NOV-DEZ	4,4

## 2.0 DESEMPENHO DO MODELO

### 2.1 Geração das Seqüências de Precipitação

De posse dos coeficientes dos modelos foram construí dos dois programas em linguagem FORTRAN para gerar as seqüências sintéticas desejadas. Os programas nº 1 e nº 2 (Vide Apêndice) geram, respectivamente, as seqüências de dias secos e chuvosos e as seqüências das alturas pluviométricas para cada posto da bacia. Os programas foram processados por um computador digital IBM 370/145, pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

### 2.2 Seqüências dos Dias com Chuva e sem Chuva

Através do programa nº 1, os 7 anos de registro de dias secos e chuvosos, disponíveis para a bacia de Oscar Barros, foram estendidos para mais 7 anos de registro simulado. As seqüências foram geradas separadamente para cada um dos 6 perío dos do ano.

Como um teste do desempenho do modelo, foram calcula das algumas estatísticas das seqüências registradas e geradas, para comparação e análise. As estatísticas analisadas foram: mê dia ( $l_0$ ) e desvio padrão ( $\sigma_0$ ) dos comprimentos dos períodos se cos; média ( $l_1$ ) e desvio padrão ( $\sigma_1$ ) dos comprimentos dos perío chuvosos; e número de dias com chuva (NDCC). Os resultados de

$\ell_0$ ,  $\ell_1$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  e NDCC são apresentados na tabela 5.3.

Com exceção dos períodos MARÇO-ABRIL e MAIO - JULHO, todos os demais períodos apresentam valores de  $\ell_0$ ,  $\ell_1$ ,  $\sigma_0$  e  $\sigma_1$ , correspondentes às seqüências registradas, sistematicamente maiores do que os valores correspondentes às seqüências geradas. Essas diferenças, que variam de 4% a 21%, são causadas por erro de amostragem, já que nos períodos compreendidos entre os meses de agosto a fevereiro as chuvas ocorrem com menor freqüência. Contudo, para os meses de maior freqüência das chuvas - de março a julho -, o erro de amostragem é menor, tornando menores as diferenças das estatísticas das seqüências geradas e registradas. As diferenças variam de 1% a 7% para  $\ell_0$  e  $\ell_1$  e de 10% a 15% para  $\sigma_0$  e  $\sigma_1$ . Um outro fator que pode ser observado, é que em todos os períodos, o número de dias com chuva (NDCC) das seqüências geradas é maior que o número de dias com chuva das seqüências registradas. Em se tratando do que já foi exposto e considerando que o modelo se baseia num método aleatório, desenvolvido a partir de uma seqüência relativamente curta de dados registrados, os resultados comparados são bastante razoáveis.

### 2.3 Seqüências das Alturas de Chuva para Cada Posto Pluviométrico

O modelo probabilístico utilizando a distribuição GA-MA-Dois Parâmetros gera a precipitação média da bacia e o modelo de Análise de Variância permite a geração das seqüências das alturas pluviométricas, para cada posto da bacia, a partir da precipitação média. Esses dois modelos foram utilizados para gerar seqüências de precipitações para 16 postos pluviométricos e para cada um dos seis períodos do ano. Em vista disso, foram obtidos  $16 \times 6 = 96$  modelos com parâmetros diferentes, e nesse caso, seria muito dispendioso testar o modelo para cada uma das 96 equações obtidas. Portanto, para testar o desempenho desse modelo, foram escolhidos aleatoriamente alguns postos, onde, para alguns períodos, foram feitas as gerações por intermédio do programa nº 2. As comparações entre as seqüências simuladas e

históricas foram feitas por meio de histogramas, dos parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e coeficiente de assimetria), e através de um gráfico da altura de precipitação versus tempo. Na tabela 5.4 são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos calculados para os 7 anos de precipitações geradas e registradas, correspondentes aos postos  $P_9$ ,  $P_{10}$  e  $P_{15}$ , para o período MARÇO-ABRIL. As diferenças entre os valores gerados e registrados são bem pequenas, variando de 3,2% a 4,1% para as médias, de 5,4% a 12,7% para os desvios padrões, e de 2,0% a 7,0% para os coeficientes de assimetria. As figuras 7, 8 e 9 mostram os histogramas correspondentes às seqüências geradas e registradas, para os mesmos postos e mesmo período. Finalmente na figura 10 é apresentado um gráfico, altura de precipitação x tempo para 7 anos de registros simulados e históricos, correspondente ao posto  $P_{15}$  e ao período MARÇO-ABRIL.

Baseado nos valores da tabela 5.4 e nos gráficos das figuras de 7 a 10, pode-se assegurar um bom desempenho do modelo para o período MARÇO-ABRIL. A mesma análise foi feita também para outros postos e outros períodos, onde foram também obtidos resultados satisfatórios.

TABELA 5.2

- COEFICIENTES DO MODELO DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA, EM MILÍMETROS, PARA CADA PERÍODO

	JAN	FEV	MAR-ABR	MAI-JUL	AGO-OUT	NOV-DEZ
$\alpha_1$	0,0	-0,1	-0,6	-1,2		
$\alpha_2$	-1,4	-0,3	-1,9	-0,5		
$\alpha_3$	-0,7	-1,3	-0,3	0,2		
$\alpha_4$	2,0	1,7	2,8	1,5		
$\beta_1$			0,7	0,6		
$\beta_2$			0,9	0,3		
$\beta_3$			-0,7	0,3		
$\beta_4$			-0,9	-1,3		
$(\alpha\beta)_{11}$			2,9	1,5		
$(\alpha\beta)_{12}$			2,1	1,2		
$(\alpha\beta)_{13}$			-3,6	-1,8		
$(\alpha\beta)_{14}$			-1,6	-0,8		
$(\alpha\beta)_{21}$			-1,8	-1,3		
$(\alpha\beta)_{22}$			0,5	0,6		
$(\alpha\beta)_{23}$			2,2	0,6		
$(\alpha\beta)_{24}$			-1,2	0,1		
$(\alpha\beta)_{31}$			-1,6	-0,7		
$(\alpha\beta)_{32}$			-2,1	-1,6		
$(\alpha\beta)_{33}$			1,9	1,1		
$(\alpha\beta)_{34}$			1,5	1,1		
$(\alpha\beta)_{41}$			0,2	0,4		
$(\alpha\beta)_{42}$			-0,7	-0,3		
$(\alpha\beta)_{43}$			-0,8	0,2		
$(\alpha\beta)_{44}$			1,1	-0,4		

- TABELA 5.3

COMPARAÇÃO DAS SEQUÊNCIAS GERADAS E  
REGISTRADAS DE DIAS SECOS E CHUVO  
SOS

Característica Estatística	JAN		FEV		MAR-ABR		MAI-JUL		AGO-OUT		NOV-DEZ	
	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.
Comprimento médio dos períodos secos $\ell_0$ (dias)	5,28	6,44	6,12	7,57	3,13	3,10	5,07	5,13	12,27	15,59	10,61	13,28
Comprimento médio dos períodos chuvosos $\ell_1$ (dias)	1,35	1,59	1,50	1,81	1,95	2,10	1,65	1,63	1,08	1,24	1,25	1,38
Desvio padrão dos comprimentos dos períodos secos $\sigma_0$ (dias)	4,48	5,67	4,96	6,20	2,49	2,94	4,99	5,73	14,05	16,53	12,93	14,33
Desvio padrão dos comprimentos dos períodos chuvosos $\sigma_1$ (dias)	0,67	0,75	0,67	0,70	1,33	1,48	1,07	0,95	0,53	0,66	0,66	0,79
Número de dias com chuva (NDCC)	50	43	42	38	163	152	157	151	51	46	45	40

TABELA 5.4

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS QUANTIDADES DE  
PRECIPITAÇÃO GERADAS E REGISTRADAS PARA O  
PERÍODO MARÇO-ABRIL (VALORES EM MILÍMETROS)

POSTOS	Média		Desvio Padrão		Coef. Assimetria	
	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.	Ger.	Reg.
P <sub>9</sub>	15,6	15,1	15,6	16,5	2,36	2,41
P <sub>10</sub>	14,0	14,6	14,1	12,9	1,85	1,72
P <sub>15</sub>	10,9	10,5	14,9	13,0	2,66	2,48

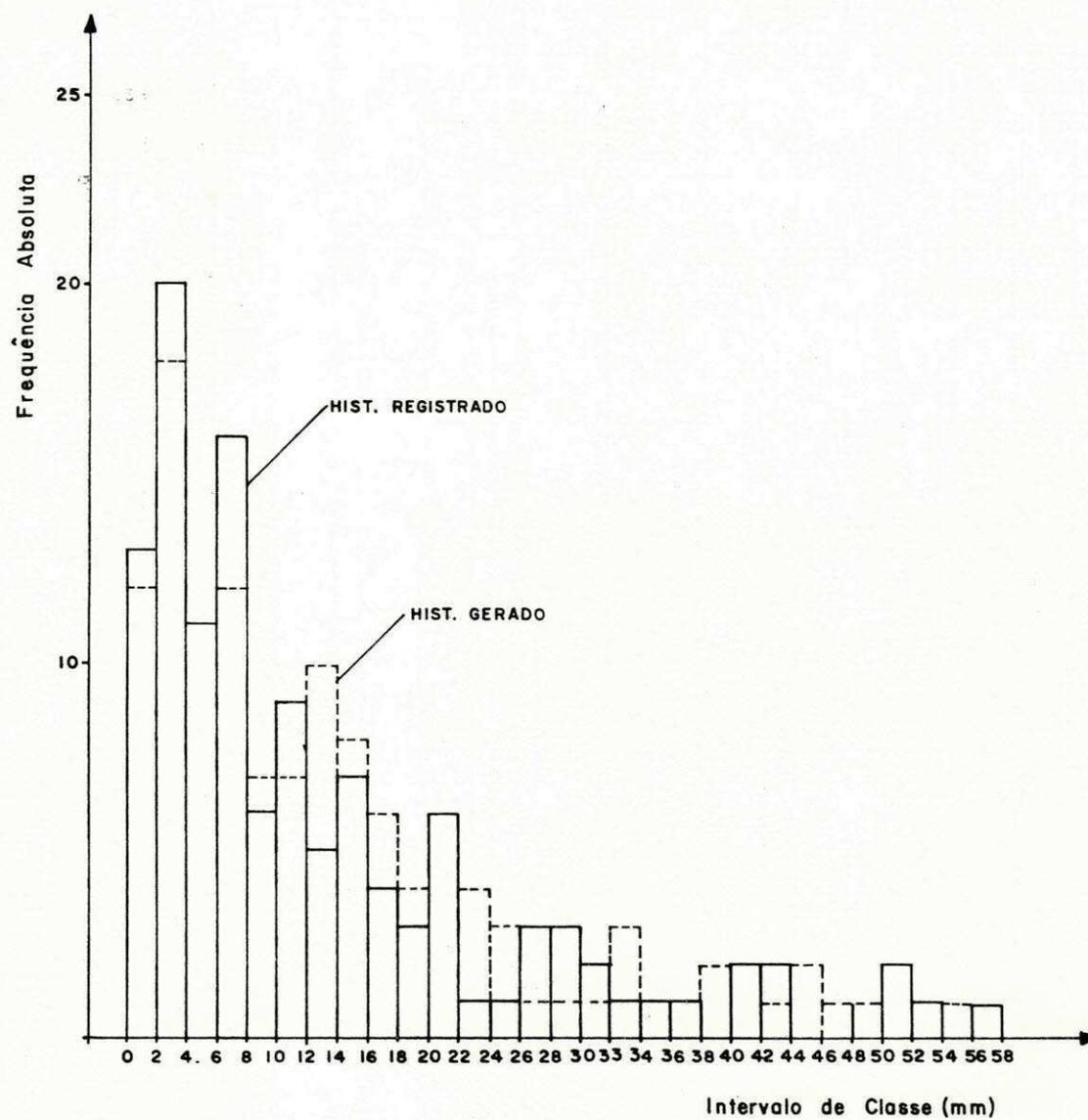


Fig. 7 – Histogramas registrado e gerado para o período Março-Abril e posto P<sub>9</sub>.

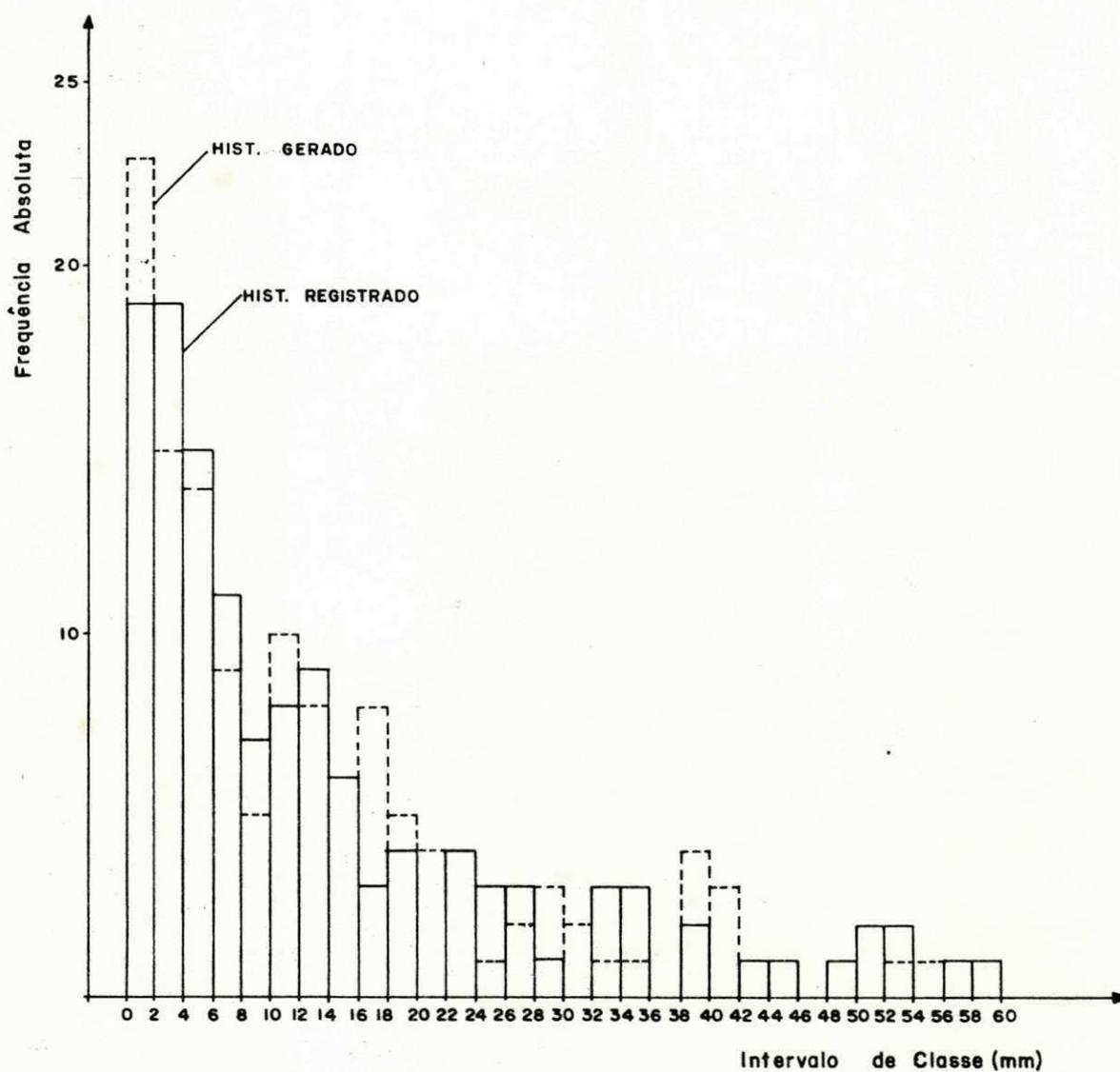


Fig. 8 – Histogramas registrado e gerado para o período Março - Abril e posto P<sub>10</sub>.

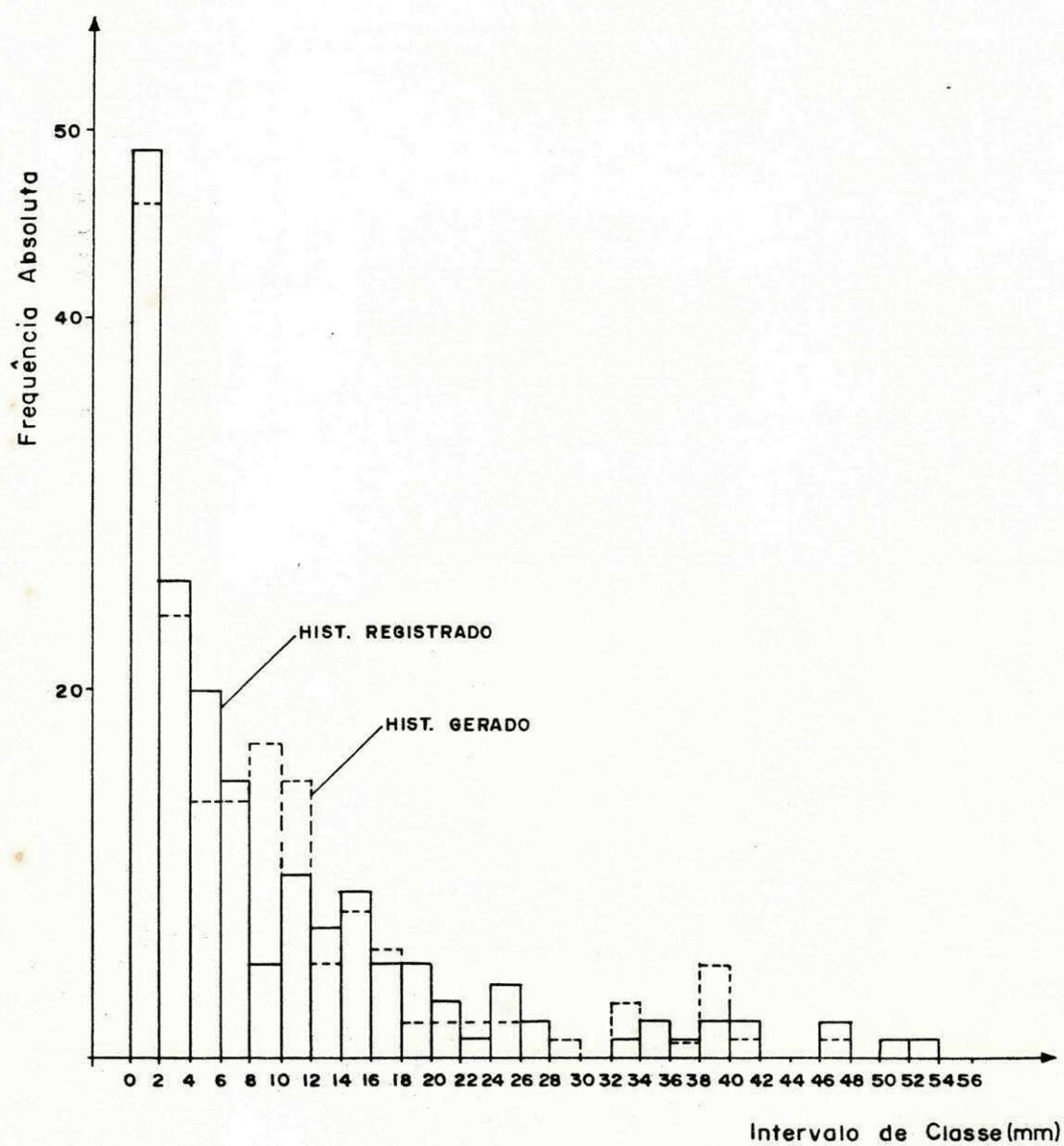


Fig. 9 - Histogramas registrado e gerado para o período Março-Abril e posto P15.

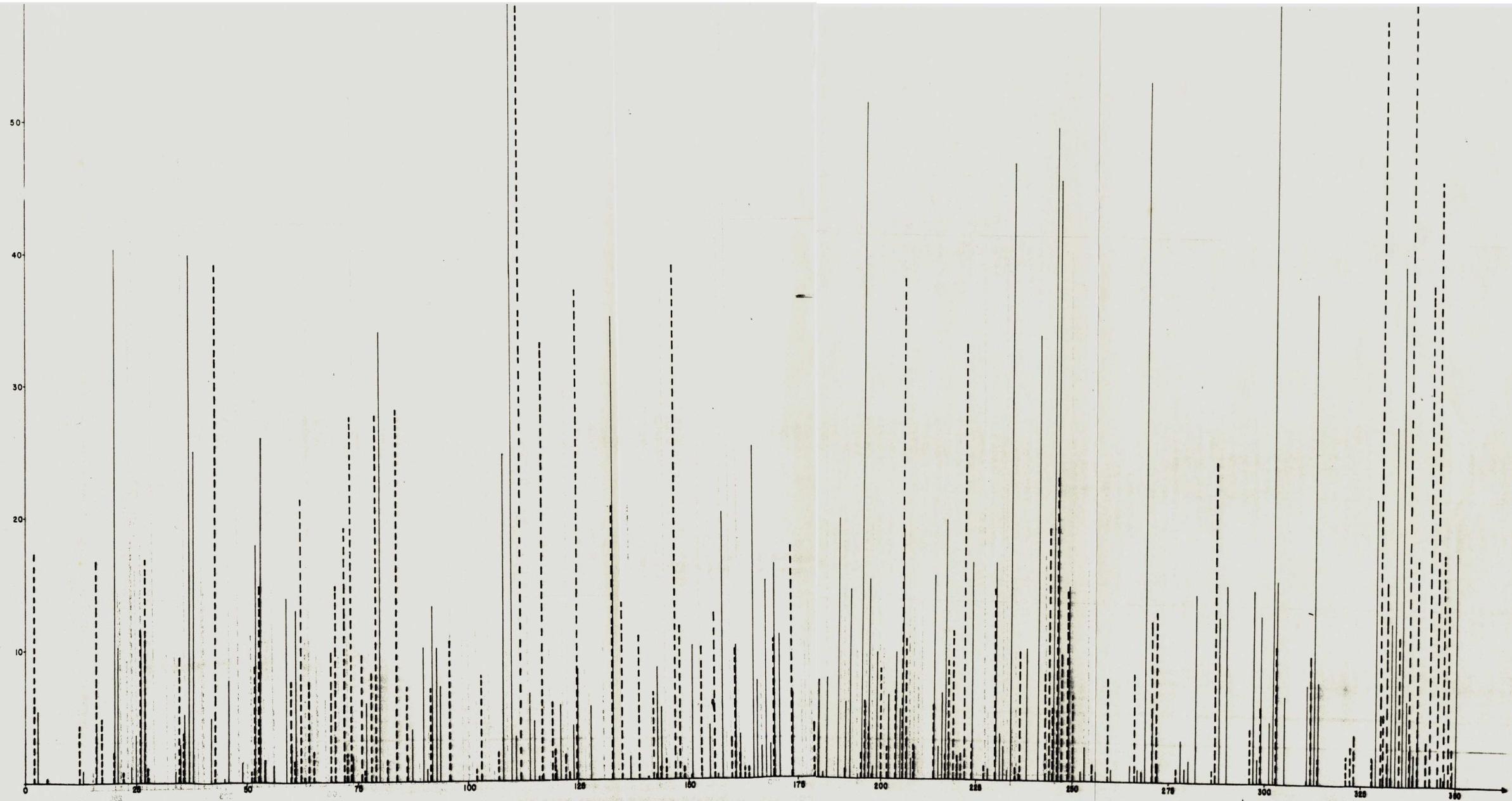


Fig.10 - Gráfico altura de precipitação x tempo para o posto P<sub>10</sub> e período Março - Abril.

----- - SÉRIE GERADA  
 ————— - SÉRIE REGISTRADA

Tempo (dias)

## CAPÍTULO VI

### C O N C L U S Õ E S

Com base no modelo desenvolvido para a geração sintética de dados de precipitação e na análise dos resultados, conclui-se:

1) As séries temporais dos dados de precipitação são melhores descritas por um modelo probabilístico, pois os dados de chuvas diárias registrados na bacia de Oscar Barros não apresentam auto-correlação entre seus eventos;

2) O modelo de Análise de Variância expressa adequadamente a variabilidade espacial das chuvas registradas na bacia. Embora nos meses mais secos, de agosto a dezembro, a distribuição pareça aleatória, para o período chuvoso, entre os meses de janeiro a julho, as chuvas possuem uma direção predominantemente perpendicular ao eixo longitudinal da bacia, ou seja, no sentido LESTE-OESTE;

3) As seqüências geradas de períodos alternados de dias com chuva e sem chuva apresentam resultados excelentes para os dois períodos de maior freqüência de chuvas (MARÇO-ABRIL e MAIO-JULHO). Para os outros períodos o número de dias com chuva gerado foi, em todos os casos, ligeiramente maior do que o número observado. Este fato deve ser atribuído à limitação do processo de geração de números aleatórios e à pequena amostragem dos valores registrado para esses períodos.

4) O modelo de geração das alturas de precipitação diária para cada posto pluviométrico da bacia, apresentou um bom desempenho. Isso foi evidenciado pela comparação dos histogramas e dos parâmetros estatísticos das seqüências simuladas e históricas.

## B I B L I O G R A F I A

01. AYERS, Hugh D. Alguns Aspectos das precipitações mensais no Sertão Paraibano. Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 1977.
02. CHOW, Ven Te in CHOW. Frequency Analysis & Sequential generation of hydrologic information. Handbook of Applied hydrology. A compendium of water-resources technology. New York, Mc Graw-Hill Book, 1964.
03. CLARKE, R. T. Mathematical models in hydrology. Irrigation and drainage paper 19. Food and agriculture organization of the United Nation. Rome, 1973.
04. COLE, J. A. & SHERRIFF, J. D. F. Some single - and multi-site models of rainfall within discrete time increments, Journal of Hydrology 17, 1972.
05. DAWDY, D. R. & MATALAS, N. C. in CHOW. Analysis of Variance, covariance and time series. Handbook of applied hydrology. A compendium of water-resources technology. New York, Mc Graw-Hill Book, 1964.
06. FLEMING, G. Computer Simulation techniques in hydrology. New York, Elsevier, 1975.
07. HARGREAVES, G. H. Monthly precipitation probabilities for northeast Brazil. Utah State University, September, 1973.

08. HIEMSTRA, L. A. V. & CREESE, R. C. Synthetic generation of seasonal precipitation. Journal of hydrology, july 1970.
09. LINSLEY, R. K. Jr., KOHLER, M. A., PAULHUS, J. L. H. Hydrology for engineers, second edition. A Compendium of water-resources and environmental engineering. Mc Graw Hill, 1975.
10. NETO, P. L. de O. C. Estatística. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
11. RAUDKIVI, A. J. & LAWGUN, N. Generation of serially correlated nonnormally distributed rainfall duration. Water Resources Research, abril 1972.
12. SIEKER, F. Modell zur Berechnung statistisch gesicherter, örtlich ungleichmässig verteilter Niederschläge. Mitteilungen des SFB 79, Heft 4, Technische Universität Hannover, Eigenverlag, 1974.
13. SIEKER, F. Statistische Grundlagen der Gerinnehydrologie. Mitteilungen des SFB 79, Heft 4, Technische Universität Hannover, Eigenverlag, 1974.
14. SUDENE. Bacia Representativa do Riacho do Navio (Relatório Final). Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Hidrometeorologia. Recife, 1979.
15. SUDENE. Dados pluviométricos da bacia do Riacho do Navio, período 1970-1976. Publicação do Departamento de Recursos Naturais, divisão de Hidrometeorologia. Recife, 1979.
16. TEUBER, W. Pluviometria mensal no Nordeste Brasileiro. Sudene, Departamento de Recursos Naturais, Divisão de Hidrologia. Recife, 1973

17. YEVJEVICH, V. Probability and Statistic in Hidrology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.A, 1972.
  
18. YEVJEVICH, V. Stochastic Processes in Hidrology. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.A, 1972.

A P Ê N D I C E

```

1JDD          PROG1,TIME=15,PAGES=50
C PROGRAMA PAZ GERAR DIAS COM CHUVA E SEM CHUVA
C PERIODO MAIO/JULHO
C NO NUMEROS DE DIAS A GERAR
C P1 PROPABILIDADE DE OCORREK DIA UMIDO SE O DIA ANTERIOR FOR SECO
C P2 PROPABILIDADE DE OCORREK DIA UMIDO SE O DIA ANTERIOR FOR UMIDO
C IDANT DIA ANTERIOR
C INDC NUMERO DE DIAS SEM CHUVA
C INDC NUMERO DE DIAS COM CHUVA
C L0=COMPRIMENTO MEDIO DE DIAS SEM CHUVA
C L1=COMPRIMENTO MEDIO DE DIAS COM CHUVA
1  REAL*8 Z,I
2  DIMENSION TABEL(1281),DIAS(1281)
3  INDC=0
4  INDC=0
C DADOS DE ENTRADA
5  READ(5,5)ND, IDANT,P0,P1
6  5 FORMAT(15,11,2F5.2)
C GERACAO DE VETOR DE VALORES ALFATORIOS ENTRE ZERO E UM
7  U=0.795246
8  DO 10 K=1,ND
9  7=(3.141592654+U)**5
10  J=7
11  F=7-I
12  TABEL(K)=F
13  U=F
14  10 CONTINUE
C IMPLEMENTACAO DO ALGORITMO
15  IAX=IDANT
16  DO 25 J=1,ND
17  IF(IAX.EQ.0)GO TO 25
18  IF(TABEL(I).LE.P1)GO TO 20
19  15 DIAS(J)=0
20  INDC=INDC+1
21  GO TO 20
22  20 DIAS(J)=1
23  INDC=INDC+1
24  GO TO 20
25  25 IF(TABEL(I).GT.P2)GO TO 15
26  GO TO 20
27  30 IAX=DIAS(J)
28  35 CONTINUE
C IMPRESSAO DA SEQUENCIA GERADA E DE INDC E INDC
29  WRITE(6,40)
30  40 FORMAT('1',//,5X,'GERACAO DE DIAS COM CHUVA E SEM CHUVA',//)
31  WRITE(6,45)
32  45 FORMAT(15X,'DIA',15X,'OBSERVACAOES',//)
33  DO 66 I=1,ND
34  IF(DIAS(I).EQ.0)GO TO 60
35  WRITE(6,55)
36  55 FORMAT(13X,I3,15X,'WET')
37  GO TO 66
38  60 WRITE(6,65)
39  65 FORMAT(13X,I3,15X,'DRY')
40  66 CONTINUE
41  WRITE(6,67)INDC, INDC
42  67 FORMAT(////,5X,'INDC=',15,10X,'INDC=',15,///)
C CALCULO DE L0 E L1
43  K=1
44  ISET=0

```

```

45      IDPY=0
46      IF(101/S(K).EQ.1)GO TO 71
47      ICHAVE=1
48      GO TO 72
49      71 ICHAVE=1
50      72 IF(101AS(K).EQ.0.AND.ICHAVE.EQ.0)GO TO 75
51      IF(101AS(K).EQ.1.AND.ICHAVE.EQ.1)GO TO 80
52      K=K+1
53      IF(K.GT.ND)GO TO 85
54      GO TO 72
55      75 ICHAVE=1
56      K=K+1
57      IDPY=IDPY+1
58      IF(K.GT.ND)GO TO 85
59      GO TO 72
60      80 ICHAVE=0
61      K=K+1
62      IWET=IWET+1
63      IF(K.GT.ND)GO TO 85
64      GO TO 72
65      85 AISC=INDSC
66      AIDRY=IDPY
67      ALO=AISC/AIDRY
68      AICC=INDFC
69      AIWET=IWET
70      ALI=AICC/AIWET
71      C SAIDA DOS VALORES DE L0 E L1
72      WRITE(6,90)ALO,ALI
73      90 FORMAT(5X,'L0=',F5.2,10X,'L1=',F5.2,////)
74      STOP
75      END

```

\$ENTRY

```

*JDD          0000,TIME=1
C PROGRAMA PARA GERAR VALORES DE PRECIPITACAO
C PERIODO MARCA=LAB011
C DATA=04
C NUMMERO DE VALORES A GERAR
C ALFA=PARAMETRO DE FORMA DA DISTRIBUICAO GAMA
C BETA=PARAMETRO DE ESCALA DA DISTRIBUICAO GAMA
C U=PROVAVEL DE INICIAL DA PRIMEIRA SEQUENCIA ALFATORIA - TABEL1
C V=PROVAVEL DE INICIAL DA SEGUNDA SEQUENCIA ALFATORIA - TABEL2
C S0 = DESVIO PADRAO DOS VALORES GERADOS DE PRECIPITACAO
C ES = COEF. DE ASSIMETRIA
C VARIAN = VARIANCIA
C A = COEFIC. ENTRE AS LINHAS
C B = COEFIC. ENTRE COLUNAS
C C = COEFIC. TOCADO ENTRE LINHAS E COLUNAS
1  REAL*8 Z,F
2  DIMENSION TABEL1(200),TABEL2(200),TABDNI(200),TGAMA(200),TARDNI(200)
3  *,TRESVI(200),TRESF(200)
4  C DADOS DE ENTRADA
5  READ(11,1)N,ALFA,BETA,A,B,C,SIGMA
6  C FORMAT(15,6F5.2)
7  C GERACAO DA PRIMEIRA TABELA DE NUMEROS ALFATORIOS
8  VZ=0.42422
9  DO 10 K=1,N
10  Z=(2.141592654+VZ)*RND
11  TABEL1(K)=Z
12  10 CONTINUE
13  C GERACAO DA SEGUNDA TABELA DE NUMEROS ALFATORIOS
14  VZ=0.56422
15  DO 15 K=1,N
16  Z=(2.141592654+VZ)*RND
17  TABEL2(K)=Z
18  15 CONTINUE
19  C GERACAO DA TABELA DE VALORES DE UMA DIST. NORMAL PADRAO - TARDNI
20  DO 20 K=1,N
21  TARDNI(K)=((1-D*ALOS(TABEL1(K)))*0.5)*COS(2.*3.14159*TABEL2(K))
22  20 CONTINUE
23  C GERACAO DA TABELA DE VALORES DE UMA DIST. GAMA - TGAMA
24  DO 25 K=1,N
25  TGAMA(K)=ALFA*(1-TABEL1(K))/(1+(1/ALFA)*((1-TABEL1(K))/(2*SQRT(ALFA))))**2
26  IF(TGAMA(K).LT.0)GO TO 25
27  TGAMA(K)=0
28  25 CONTINUE
29  C GERACAO DE TARDNI
30  DO 30 K=1,N
31  TARDNI(K)=((1-D*ALOS(TABEL2(K)))*0.5)*COS(2.*3.14159*TABEL1(K))
32  30 CONTINUE
33  C GERACAO DOS DESVIO = TRESVI
34  DO 34 K=1,N
35  TRESVI(K)=SIGMA*(TARDNI(K))
36  34 CONTINUE
37  C GERACAO DA SEQUENCIA DOS VALORES DE PRECIPITACAO TRESF(K)
38  DO 40 K=1,N
39  TRESF(K)=TGAMA(K)+A+B+C+TRESVI(K)
40

```

```

27      X=TRREC(K),DT,0100 TO 42
38      TRREC(K)=0
39      42 CONTINUE
C IMPRESSAO DA TABELA DOS VALORES GERADOS DE PRECIPITACAO
40      WRITE(1,43)
41      43 FORMAT(1X,20X,'VALORES GERADOS DE PRECIPITACAO',//)
42      WRITE(1,44)(TRREC(K),K=1,N)
43      44 FORMAT(1X,10F7.1,/)
C CALCULO DA MEDIA, VARIANCIA, COEF. DE ASSIMETRIA DE TBREC
44      S=0
45      Y=0
46      S2=0
47      DO 45 K=1,N
48      Y=Y+TRREC(K)
49      45 CONTINUE
50      XMEDIA=Y/N
51      DO 46 K=1,N
52      S=S+(TRREC(K)-XMEDIA)**2)
53      46 CONTINUE
54      VARIAN=S/(N-1)
55      SDEV=SQRT(VARIAN)
56      VARI=0
57      VARI2=0
58      DO 49 K=1,N
59      VARI=VARI+(TRREC(K)**3)
60      VARI2=VARI2+(TRREC(K)**2)
61      49 CONTINUE
62      NUM=3*(VARI/N)-((3*XMEDIA*VARI2)/N)+(2*(XMEDIA**3))
63      DENOM=(VARI2/N-(XMEDIA**2))**1.5
64      CS=NUM/DENOM
C 7123 CALCULO DA MEDIA, DESVIO PADRAO, COEF. DE ASSIMETRIA E VARIANCIA
65      WRITE(1,50)XMEDIA,SDEV,CS,VARIAN
66      50 FORMAT(1X,1X,5X,'MEDIA=',F7.2,5X,'DESVIO PADRAO=',F7.2,5X,'COEF. DE A'
        'SSIMETRIA',F5.2,5X,'VARIANCIA=',F7.2,////)
67      STOP
68      END

```

STRTV