

4 – CLIMATOLOGIA

O movimento das diversas massas de ar que se cruzam sobre o Estado da Paraíba resulta principalmente da sua posição geográfica, isto é, próximo ao Equador, no hemisfério sul, limitado do lado oriental pelo Oceano Atlântico e do lado ocidental, embora mais distante, pela imensa floresta tropical, e, do seu relevo. Estes movimentos levam a um clima peculiar: um clima do tipo tropical com estação de chuvas curtas, úmido no Litoral e no Agreste e semi-árido no interior, que dá origem a um regime hidrológico específico. A região litorânea, na qual a bacia do Rio Gramame está inserida, classifica-se do ponto de vista climatológico, tropical úmida.

4.1 - Considerações Gerais

Devido ao seu relevo e a sua distribuição territorial longitudinal, os principais sistemas meteorológicos que atuam sobre o Estado são: os Vórtices Ciclônicos da Alta Troposfera (VCAT), que é um conjunto de nuvens com forma aproximada de um “círculo”, girando no sentido horário no hemisfério sul e dominado por uma região de baixa pressão, que favorece a convecção e consequentemente chuvas. Este sistema atua geralmente nos meses de verão na alta troposfera, e apresenta duração variável (entre dias ou semanas). Da mesma forma, seu deslocamento é bastante variável, o que lhe dá uma configuração transitória. A parte central do VCAT é caracterizada por movimento descendente de ar frio e seco, o que determina ausência de precipitação sobre esta região, enquanto em sua periferia os movimentos ascendentes de ar quente e úmido causam precipitação (figura 4.1). Em geral, a ocorrência de um VCAT sobre o Nordeste do Brasil é induzida pela penetração e intensificação de sistemas frontais provenientes das regiões Sul e Sudeste do Brasil, e é a responsável pelas chuvas da pré-estação da região Nordeste.

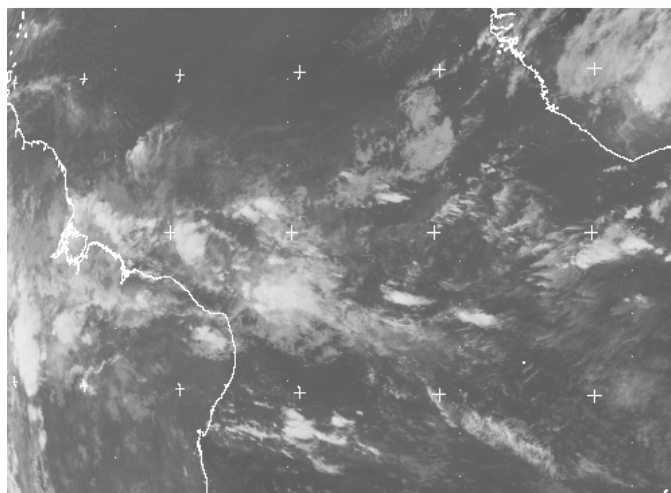


Figura 4.1 - Vórtice Ciclônicos de Ar Superior (VCAT) - Imagem do Satélite METEOSAT - Canal Infravermelho

Ao longo da Linha do Equador, predomina uma região de ventos conhecidos como ventos alísios. Esses ventos de nordeste e sudeste sopram em direção ao Equador. Nesta faixa, os ventos alísios confluem, contribuindo assim para a formação de uma intensa banda de nebulosidade convectiva (geradora de chuvas) denominada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Além da confluência dos alísios e da nebulosidade convectiva associada, também, nesta região, encontra-se o cavado equatorial e a zona de máxima temperatura da superfície do mar. Todos estes sistemas interagem sobre a faixa equatorial dos oceanos.

A posição da ZCIT varia de acordo com o movimento aparente do sol, ou seja, com as estações do ano (variação sazonal). Estas mudanças sazonais da ZCIT, em particular sobre o Atlântico Tropical, coincidem com as variações da precipitação no setor norte do Nordeste do Brasil. Nos meses de março e abril, a ZCIT encontra-se na sua posição mais ao sul, ou seja, próximo à costa do Nordeste. É exatamente nesses meses que o setor norte do Nordeste experimenta o auge de sua estação chuvosa.

No que se refere à qualidade da estação chuvosa, a posição da ZCIT (Figura 4.2) e sua permanência por mais tempo, no sentido de favorecer às chuvas sobre o norte do Nordeste, está diretamente relacionada com a variabilidade dos sistemas de altas pressões subtropicais do Atlântico Norte e do Atlântico Sul. A escassez e o excesso de chuvas, no Nordeste, estão relacionados com esta variabilidade.

Em anos chuvosos, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (AAN), também conhecido como Anticiclone dos Açores, está mais intenso do que o normal, assim como os ventos alísios de nordeste, fazendo com que a ZCIT seja “empurrada” para posições mais ao sul. Em anos de seca, o inverso ocorre, ou seja, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (AAS) e os ventos de sudeste estão mais intensos, de modo que a ZCIT é deslocada para posições mais ao norte em relação a sua posição normal.

A ZCIT possui uma oscilação diária ou semanal no que se refere a sua posição meridional. Essa variação acarreta, durante a estação chuvosa, períodos de estiagem de curta duração, os quais são denominados de VERANICOS. Observações diárias do posicionamento da ZCIT, através de imagens de satélites, permitem monitorar estas oscilações.

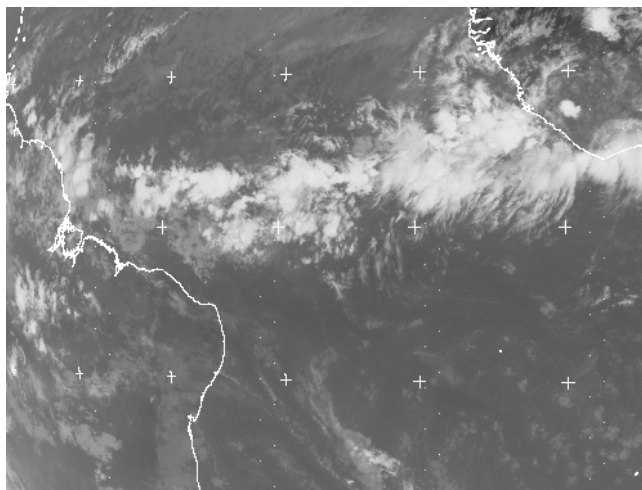


Figura 4.2 - A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) - Imagem do Satélite METEOSAT - Canal Infravermelho

O terceiro e último sistema meteorológico importante que atua sobre o Estado da Paraíba é conhecido por Aglomerados Convectivos (ACs) associados a distúrbios ondulatórios de leste ou “Ondas de Leste”, que mantêm a estação chuvosa do setor leste do Nordeste (Figura 4.3).

Os ACs, na região do Atlântico Tropical Sul, são gerados a partir de perturbações conhecidas como “Ondas de Leste” durante o inverno do Hemisfério Sul (período coincidente com a estação chuvosa do setor leste do Nordeste). Estas ondas deslocam-se no sentido leste-

oeste desde a costa da África Oaté a costa leste do Brasil, com uma velocidade de aproximadamente 10° de longitude (1.100 Km) por dia e comprimento estimado em até 4.000 Km.

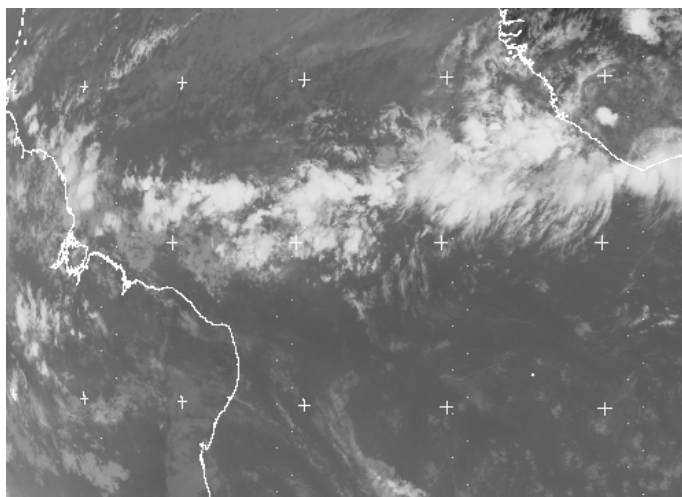


Figura 4.3- “Ondas de Leste” - Imagem do Satélite METEOSAT - Canal Infravermelho

A situação do Estado próximo ao Equador, com alta radiação solar e alto número de horas de insolação, determina um clima quente com temperatura média anual de 26°C e poucas variações intra-anual. A distribuição espacial das temperaturas mostra uma dependência acentuada com o relevo.

Na figura 4.4, apresenta-se o mapa do Estado da Paraíba com a classificação climática de Koeppen (adaptada para a região por Varejão e Silva, 1987). A cada região desenhada neste é afetada uma classificação com o seguinte significado:

- A primeira letra em maiúscula indica o tipo de clima segundo cinco grandes classes estabelecidas a nível mundial. No Estado, encontra-se a letra A que indica um clima tropical chuvoso e a letra B que indica um clima seco (xerófito e desértico).
- Asi indica áreas com clima tropical úmido, apresentando verão seco, sendo a variação de temperatura média mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível.
- Aw'i , indica um clima tropical úmido, com estação seca no outono e variação de temperatura mensal do ar ao longo do ano praticamente desprezível.

- Aw_i , indica um clima idêntico ao anterior com estação seca no inverno.
- Aw_{ig} , indica um clima idêntico ao anterior diferenciando-se por apresentar o mês com maior temperatura média do ar, antes do solstício de verão.
- BSw'h' , indica um clima seco de tipo estepe com estação seca no outono e temperatura média mensal superior a 18°C.
- BSw_h' , indica um clima idêntico ao anterior mas com a estação seca no inverno.
- Bsw_h'g , caracteriza um clima idêntico ao anterior diferenciando-se pela ocorrência do mês mais quente antes do solstício de verão.
- Bww'h' , indica um clima seco de tipo desértico, com estação seca no outono e temperatura média mensal superior a 18°C.
- Bww_h' , indica um clima idêntico ao anterior mas com estação seca no inverno.

No mapa da figura 4.4, observa-se que a região litorânea, na qual se encontra a bacia do Rio Gramame, está inserida na zona classificada como Aw_i, o que indica um clima tropical chuvoso com estação seca no outono. Pequena parte da área ocidental da bacia encontra-se classificada segundo este mapa em BSw'h'.

O planalto da Borborema, praticamente localizado entre os meridianos 35° 40' e 37° separa a região litorânea baixa, menos de 200 m de altitude, drenada em direção ao leste, da região ocidental, com altitude média de 400 m, drenada para o Norte. O perfil topográfico no sentido Leste-Oeste situado no paralelo 7° Sul, representado na figura 4.5, mostra bem a verdadeira barreira que constitui a vertente oriental do Planalto da Borborema, sendo a mesma um obstáculo aos ventos dominantes (SUDENE, 1982). As massas de ar quente e úmido vindo do atlântico sofrem um movimento ascensional ao atingir os contrafortes do planalto da Borborema, gerando na região do Brejo chuvas de tipo orográficas. As massas de ar que percorrem o planalto da Borborema são consequentemente bem mais secas e com pouco potencial gerador de chuvas, pois se "descarregaram" de grande parte de sua umidade. As regiões atingidas por essas massas mais secas, são ditas situadas a sotavento do planalto da Borborema, ou ainda, na sombra orográfica do mesmo.

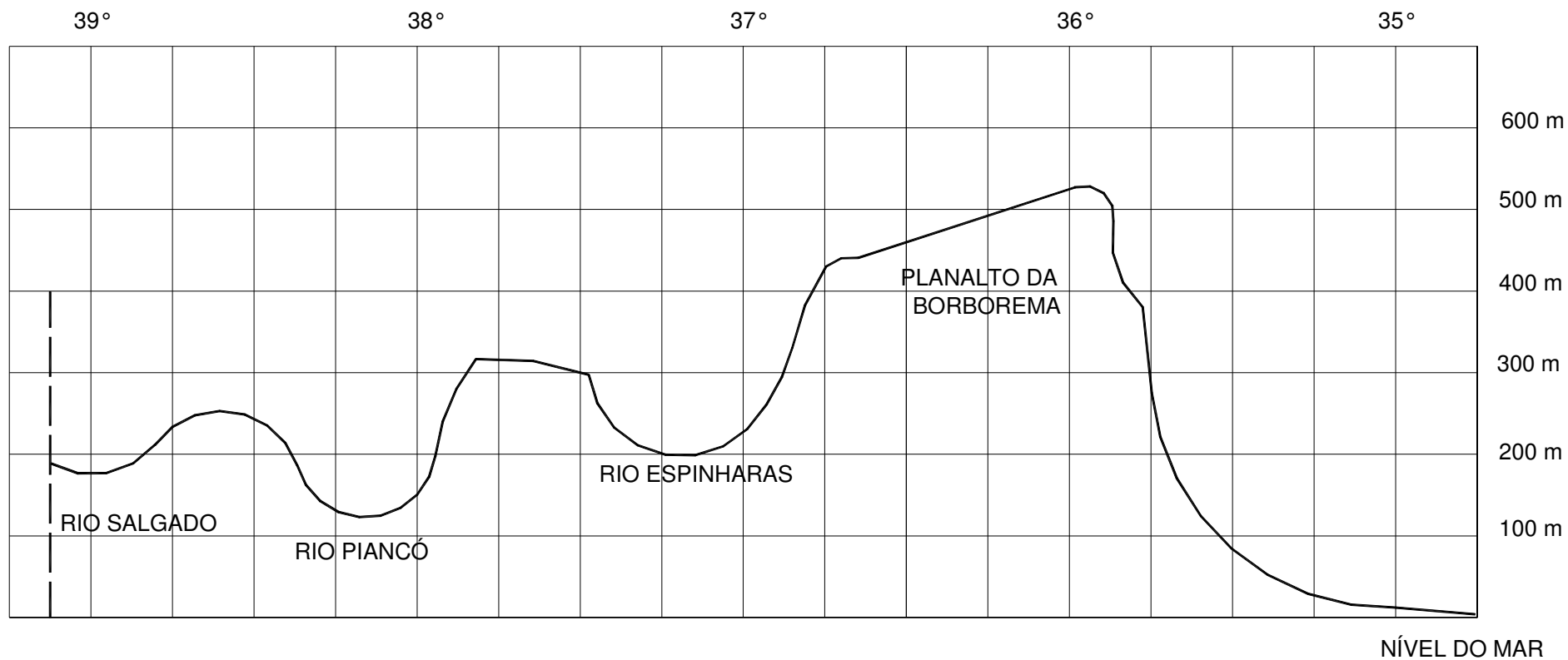


Figura 4.5 – Perfil Topográfico Leste - Oeste

As variáveis que caracterizam o clima de uma região são a pressão, a precipitação, a temperatura do ar, a insolação, a nebulosidade, a evaporação, a velocidade e direção do vento e a umidade relativa. Essas variáveis são medidas em estações climatológicas.

No Estado da Paraíba os primeiros dados coletados foram de precipitações, pela Inspetoria Nacional de Obras Contra as Secas (IOCS) e posteriormente foram instaladas estações climatológicas. Com a criação da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), foram também modernizadas e equipadas as estações climatológicas de São Gonçalo/Sousa, Monteiro, Patos, João Pessoa, Campina Grande e Areia, que já existiam, porém operando com instrumentos ultrapassados. Nos anos setenta, as estações climatológicas foram transferidas para o controle do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que controla até hoje, apenas as estações de São Gonçalo/Sousa, Monteiro, João Pessoa e Campina Grande (Figura 4.6)



Figura 4.6 - Localização das Estações climáticas no Estado da Paraíba

4.2 - Variáveis climáticas na região da bacia hidrográfica do Rio Gramame

A estação climatológica de João Pessoa se encontra na região próxima à bacia hidrográfica do Rio Gramame. As suas coordenadas geográficas assim como sua altitude e

outras informações são dadas na tabela 4.1. Na tabela 4.1 aparece também informações a respeito da estação meteorológica do aeroporto Castro Pinto no município de Santa Rita, a qual é administrada pela Infraero.

Tabela 4.1 - Estação climatológica de João Pessoa (Paraíba)

| Código | Estação | Latitude (Sul) | Longitude (W.Grw) | HP (*) (m) | HZ (*) (m) | Período de observação |
|---------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| 82798 | João Pessoa | 07°06' | 34°52' | 7,43 | 6,73 | 1961-1990 |
| | Aeroporto Castro Pinto | 07°09' | 34°57' | | | 1978-1999 |

(*) HP indica a altitude da estação e HZ a altitude da cuba do Barômetro acima do nível do mar.

Dados climatológicos são úteis quando comparados a valores padrões ou normais (Normais climatológicas). Daí a necessidade do estabelecimento de períodos estandarizados. As normais são obtidas através do cálculo das médias, obedecendo critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Neste trabalho apresenta-se médias mensais e anuais referentes a nove parâmetros meteorológicos. As medições são feitas diariamente nos horários de 12:00, 18:00 e 00:00 TMG (Tempo Médio de Greenwich), que para a Paraíba correspondem a 09:00, 15:00 e 21:00, horas respectivamente.

As médias mensais e anuais de pressão atmosférica, temperatura do ar, nebulosidade e umidade relativa, são obtidas a partir das médias mensais e anuais dos valores diários. Da mesma forma calculam-se os totais mensais e anuais de precipitação, evaporação e insolação.

Para avaliação dos valores médios diários de temperatura e umidade relativa, utiliza-se, segundo recomendações da OMM as seguintes fórmulas respectivamente:

$$T = (T_{12} + 2T_{00} + T_{\max} + T_{\min})/5$$

$$U = (U_{12} + U_{18} + 2U_{00})/4$$

Onde os índices 12; 18; 00 indicam as horas G.M.T. das observações

Na tabela 4.2, encontram-se as médias mensais e anuais das variáveis climáticas medidas na estação de João Pessoa no período de 1961 a 1990 (tabela 4.2a) assim como as médias mensais e anuais da estação meteorológica do aeroporto Castro Pinto no período de 1978 a 1999.

Tabela 4.2a - Dados climatológicos médios medidos na estação climatológica da cidade de João Pessoa.

| | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. | Anual |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Pressão Atmosférica (hPa) | 1009,2 | 1008,7 | 1008,8 | 1008,5 | 1009,2 | 1011,5 | 1012,5 | 1012,5 | 1011,0 | 1008,9 | 1010,0 | 1009,3 | 1010,0 |
| Evaporação do Tanque classe A (mm) | 158,9 | 139,5 | 118,0 | 89,2 | 86,8 | 94,8 | 95,2 | 68,7 | 152,3 | 149,0 | 91,0 | 70,1 | 1313,5 |
| Velocidade do vento (m/s) | 3,6 | 3,6 | 3,1 | 3,0 | 2,9 | 3,1 | 3,5 | 3,7 | 4,0 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 3,4 |
| Nebulosidade (0 – 10) | 5,6 | 5,8 | 6,1 | 6,0 | 6,2 | 6,1 | 6,0 | 5,2 | 5,7 | 5,1 | 5,4 | 5,3 | 5,7 |
| Insolação Total (Horas e décimos) | 244,2 | 219,1 | 208,9 | 181,5 | 193,9 | 180,7 | 148,5 | 211,7 | 235,1 | 266,2 | 272,7 | 228,9 | 2591,4 |
| Temperatura média do ar (°C) | 25,8 | 25,2 | 28,2 | 25,5 | 27,0 | 26,2 | 23,7 | 25,4 | 27,5 | 27,7 | 27,0 | 24,1 | 26,1 |
| Temperatura mínima do ar (°C) | 22,8 | 22,6 | 21,2 | 22,9 | 22,2 | 21,8 | 20,3 | 21,7 | 18,9 | 23,3 | 23,2 | 23,0 | 21,9 |
| Temperatura máxima do ar (°C) | 31,8 | 30,5 | 30,0 | 29,8 | 29,6 | 28,3 | 26,8 | 27,8 | 28,3 | 29,3 | 29,7 | 30,0 | 29,3 |
| Precipitação média (mm) | 78 | 96 | 206 | 263 | 282 | 302 | 225 | 136 | 65 | 23 | 28 | 37 | 1740 |

Tabela 4.2b - Dados climatológicos médios medidos na estação meteorológica do aeroporto Castro Pinto em Santa Rita.

| Meses | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Anual |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Temperatura média do ar (°C) | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,2 | 24,4 | 23,5 | 23,0 | 23,0 | 23,4 | 24,4 | 24,5 | 25,5 | 25,8 |
| Temperatura. Máxima do ar (°C) | 29,4 | 29,4 | 29,4 | 29,0 | 28,3 | 27,6 | 27,0 | 27,1 | 27,9 | 28,5 | 28,9 | 29,0 | 28,5 |
| Temperatura do ar mínima (°C) | 21,6 | 21,7 | 21,9 | 21,6 | 20,9 | 19,9 | 19,4 | 19,2 | 19,5 | 20,3 | 20,7 | 21,2 | 20,7 |
| Umidade relativa (%) | 73 | 74 | 75 | 78 | 80 | 81 | 80 | 78 | 75 | 73 | 73 | 72 | 76 |
| Velocidade. do vento (m/s) | 3,3 | 3,3 | 3,0 | 2,9 | 3,0 | 3,4 | 3,5 | 3,8 | 3,7 | 3,5 | 3,7 | 3,4 | 3,4 |
| Precipitação (mm) | 91,5 | 105,9 | 163,9 | 184,7 | 205,7 | 209,9 | 232,3 | 162,6 | 87,9 | 36,5 | 53,3 | 79,0 | 1613,2 |

A pressão atmosférica, seguindo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM), é expressa em hectoPascal (hPa). Um hectoPascal equivale a um milibar.

A nebulosidade se expressa através de um número entre 0 e 10. A nebulosidade é a fração do céu encoberto por nuvens. O céu é dividido em dez partes e o observador anota quantas partes apresentam nuvens. Trata-se de uma medida sensorial e por consequência sujeita à distorções.

A insolação é o número de horas durante o dia, nas quais os raios solares atingem diretamente a superfície da terra. Esta variável meteorológica é bastante correlata à nebulosidade. O número de horas de insolação é um bom indicador da nebulosidade quando comparado ao número teórico de horas de insolação que corresponde ao número de horas entre a aparição do sol e o por do sol. Tal número depende da latitude e do dia. Na tabela 4.3, são apresentados os valores teóricos calculados para o dia 15 de cada mês na cidade de João Pessoa.

Tabela 4.3 - Numero teórico de horas de insolação por dia para a cidade de João Pessoa (PB) (Horas e minutos).

| Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai . | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 12:22 | 12:13 | 12:03 | 11:50 | 11:41 | 11:35 | 11:37 | 11:45 | 11:57 | 12:08 | 12:19 | 12:25 |

Na estação climatológica de João Pessoa, dominam os ventos de sudeste ao longo de todo o ano. As maiores percentagens de horas sem vento foram observadas nessa estação, embora com uma variação significativa, no horário das 21 horas. A frequência relativa mensal da direção e velocidade do vento, para a cidade de João Pessoa está representada em cartogramas no Atlas anexo. As informações relativas a estas frequências foram extraídas do Atlas Climatológico do Estado da Paraíba (Varejão e Silva, 1987).

4.3 – A evapotranspiração potencial

A evaporação é medida regularmente na estação climatológica de João Pessoa. Os seus valores médios mensais são indicados na tabela 4.2. Multiplicando esses valores pelo chamado coeficiente do tanque, obtém-se uma estimativa da evapotranspiração potencial.

Existem também dados de evaporação do tanque classe “A” na estação de tratamento de Marés. Esses dados são listados na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Evaporação do Tanque classe “A” medida na estação de tratamento de Marés

| Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai . | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 149,6 | 134,8 | 149,7 | 129,6 | 117,1 | 107,6 | 116,2 | 123,1 | 136,5 | 157,3 | 154,7 | 149,3 |

Entretanto esses dados são insuficientes para caracterizar a evapotranspiração potencial sobre toda a região da bacia hidrográfica, Hargreaves tem estimado esses valores para inúmeros municípios do Nordeste a partir de uma formula que ele estabeleceu para esta região e que é descrita a seguir.

A equação de Hargreaves para o semi-árido nordestino se escreve:

$$ETP = MF \times (32 + 1,8T) \times CH$$

onde :

- ETP é a Evapotranspiração Potencial calculada em mm/mês;
- MF é o fator de Evapotranspiração Potencial que depende da latitude e do mês e fornecido em tabela;
- T é a temperatura média do mês expressa em °C;
- CH é um coeficiente função da umidade relativa, U, dado pela expressão:

$$CH = 0,158 \times (100 - U)^{0,5}$$

A fórmula de Hargreaves, como se nota das expressões anteriores, utiliza valores médios mensais de temperatura e umidade relativa. No cálculo efetuado pelo próprio autor, estes valores foram estimados em quase todos os municípios onde se dispõe de dados de

precipitação a partir de equações empíricas estabelecidas com o conjunto de dados das estações climáticas do Nordeste.

Na tabela 4.5, reproduz-se os valores estimados por esse autor e publicados em SUDENE (1984). Observa-se que estes valores praticamente variam muito pouco na região o que permite inferir que a evapotranspiração potencial na bacia do rio Gramame é bem representada pelas informações obtidas em torno de João Pessoa.

Tabela 4.5 – Evapotranspiração Potencial Média Diária segundo G. H. Hargreaves (mm)

| Município | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Alhandra | 5,0 | 4,9 | 4,6 | 4,0 | 3,3 | 2,9 | 2,9 | 3,3 | 4,0 | 4,6 | 4,9 | 4,9 |
| João Pessoa | 4,9 | 4,8 | 4,5 | 3,9 | 3,1 | 2,8 | 2,9 | 3,4 | 4,1 | 4,7 | 4,9 | 4,9 |
| Sapé | 5,1 | 5,0 | 4,7 | 4,0 | 3,4 | 2,9 | 2,9 | 3,4 | 4,1 | 4,6 | 5,0 | 5,1 |
| També | 5,1 | 4,9 | 4,4 | 3,9 | 3,2 | 2,9 | 3,1 | 3,5 | 4,2 | 4,8 | 5,0 | 5,0 |

4.4 – Precipitação

4.4.1 - Postos pluviométricos

Na bacia hidrográfica do Rio Gramame e na sua proximidade 18 postos pluviométricos foram administrados pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba), os quais encontram-se desativados atualmente. Esses postos assim como o período de observação e outras informações estão listados na tabela 4.6 a seguir.

Tabela 4.6 - Postos da CAGEPA na bacia do Rio Gramame

| Código | Lat. | Long. | Alt. | Período de observação | Nome do Posto |
|---------|--------|---------|------|-----------------------|----------------------|
| 1735134 | 7° 22' | 35° 03' | 99 | 1971 – 1985 | Faz. Bulhões |
| 1734031 | 7° 07' | 34° 53' | 44 | 1971 – 1989 | R-2 Centro |
| 1735136 | 7° 16' | 35° 03' | 101 | 1971 – 1989 | Imbiribeira |
| 1734024 | 7° 09' | 34° 54' | 38 | 1971 – 1984 | Marés |
| 1734025 | 7° 15' | 35° 01' | 71 | 1971 – 1989 | Faz. Mamuaba |
| 1735128 | 7° 13' | 35° 02' | 85 | 1971 – 1985 | Água Mineral |
| 1735135 | 7° 19' | 35° 02' | 110 | 1971 – 1989 | Riacho do Salto |
| 1735133 | 7° 23' | 35° 07' | 139 | 1971 – 1989 | Faz. Santa Emília |
| 1735131 | 7° 18' | 35° 09' | 127 | 1971 – 1985 | Fazendinha |
| 1734030 | 7° 06' | 34° 50' | 24 | 1971 – 1989 | R-9 Tambaú |
| 1735132 | 7° 17' | 35° 06' | 136 | 1971 – 1989 | Faz. Mamoaba de Cima |
| 1735129 | 7° 13' | 35° 06' | 89 | 1971 – 1989 | Faz. Princesa |
| 1734027 | 7° 20' | 34° 59' | 76 | 1971 – 1984 | Várzea Cercada |
| 1734028 | 7° 17' | 34° 57' | 72 | 1972 – 1985 | Faz. Santo Antônio |
| 1734032 | 7° 08' | 34° 53' | 61 | 1971 – 1989 | R-5 Cruz das Armas |
| 1734026 | 7° 11' | 34° 58' | 89 | 1971 – 1989 | Faz. Mumbaba |
| 1734029 | 7° 10' | 34° 54' | 55 | 1971 – 1989 | Faz. Veneza |
| 1735127 | 7° 20' | 35° 05' | 125 | 1971 – 1989 | Jangada |

Ao redor da bacia hidrográfica do Rio Gramame, a SUDENE até 1994, e posteriormente, o LMRS - PB (Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba) monitoram os postos listados na tabela 4.7 a seguir. Nesta tabela, aparece também um conceito de qualidade atribuído num estudo extensivo sobre qualidade de dados climatológicos efetuado pela SCIENTEC (1999).

Tabela 4.7 - Postos pluviométricos administrados pela Sudene

| Código | lat. | Long. | alt. | Período de observação | Nome do Posto | Conceito |
|---------------|-------------|--------------|-------------|------------------------------|----------------------|-----------------|
| 3849878 | 7° 25' | 35° 07' | 190 | 1910 – 1990 | També | E |
| 3849254 | 7° 06' | 35° 14' | 125 | 1924 – 1993 | Sapé | E |
| 3940819 | 7° 26' | 34° 55' | 49 | 1936 – 1994 | Alhandra | E |

4.4.2 - Análise de consistência dos dados pluviométricos

Requer-se dos dados de precipitação em um posto pluviométrico, uma série anual, mensal ou diária, que seja ininterrupta durante o período de observação. Porém, pode ocorrer a existência de períodos sem informações ou com falhas ou erros nas informações, devido a problemas com os aparelhos de registro e/ou com o operador do posto. Assim, os dados de precipitação devem ser submetidos a uma análise prévia antes de serem utilizados para qualquer estudo hidrológico ou climatológico, a fim de detectar os erros, corrigi-los e se possível preencher as falhas.

Após o preenchimento das falhas e a correção dos erros, há necessidade de analisar a consistência do conjunto dos dados dentro de uma visão regional. De fato, a substituição de um aparelho por outro ou modificação do local de implantação do mesmo, ou ainda, interferências na sua vizinhança, podem provocar modificações sistemáticas do valor observado quando comparado com aquele que teria se tais mudanças não tivessem ocorrido. Diz-se que deve se analisar a homogeneidade regional dos dados. Ambas as operações, isto é corrigir/preencher e analisar a consistência dos dados são feitas neste trabalho pelo método do vetor regional desenvolvido por Hiez (1977, 1978). O vetor regional é definido como uma série cronológica, sintética de índices pluviométricos anuais (ou mensais), oriundos da extração por um método de máxima verossimilhança da informação mais provável contida nos dados de um conjunto de estações de observação agrupadas regionalmente. Os dados pluviométricos são agrupados sob a forma de uma matriz P_{nm} com n linhas e m colunas, sendo n o número de anos (ou meses) de observação e m , o número de estações pluviométricas. Procura-se aproximar a matriz P pelo produto de dois vetores, L de dimensão n (o vetor regional) e C de dimensão m . Os dois vetores L e C são obtidos por minimização da diferença:

$$d_{ij} = P_{ij} - l_i \times c_j$$

onde P_{ij} é o valor observado.

Plotando num gráfico o valor dos erros relativos centrados acumulados em função do tempo, fica fácil observar desvios sistemáticos que correspondem a não homogeneidade ou erros locais. O erro relativo centrado acumulado é dado pela fórmula:

$$E_{kj} = \sum_{i=1}^k e_{ij} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_{ij} \quad \text{para } 1 \leq k \leq n$$

onde e_{ij} é o erro relativo:

$$e_{ij} = \left(\frac{P_{ij}}{l_i \times c_j} - 1 \right)$$

Desvios bruscos e isolados correspondem teoricamente a erros grosseiros de medição ou transcrição. Os critérios utilizados na correção destes dependem da análise de cada caso em particular, mas em geral, um desvio isolado só pode ser corrigido diante da certeza de que o mesmo não é correto, Nesse caso, se faz a substituição desse valor pelo estimado através do vetor regional.

Se o gráfico apresentar desvios sistemáticos, a correção se realiza segundo as equações seguintes:

$$P_{ij}^c = K P_{ij}$$

sendo $K = 1 - \bar{e}_{ij}$

$$e \quad \bar{e}_{ij} = \frac{1}{r} \sum_{i_0}^{i_0+r-1} (P_{ij} - l_i \times c_j) / P_{ij}$$

P_{ij}^c é a precipitação corrigida; \bar{e}_{ij} é o desvio médio entre valores observados e calculados, correspondente ao período com tendência a ser corrigida; r = número de observações do dito período e i_0 corresponde a primeira observação deste mesmo período.

- **Estratégia adotada**

Os postos listados na tabela 4.7 pertencem à região da bacia do Baixo Paraíba. Considerou-se então 10 postos da bacia do Baixo Paraíba classificados como bons ou excelentes (SCIENTEC, 1999) e realizou-se a análise de consistência sobre o período

disponível comum, qual seja, de 1962 a 1997, sendo que existe uma interrupção nos anos 1992 e 1993 impossível de ser preenchida sem risco de cometer erros inaceitáveis. A análise de consistência foi feita primeiramente a nível anual onde falhas foram preenchidas, erros grosseiros detectados e analisada a ocorrência de não homogeneidade. Depois o mesmo procedimento foi feito a nível mensal. Considerou-se então errados, os totais mensais daqueles onde o erro detectado com o vetor regional a nível mensal explicava o erro observado a nível anual no mesmo ano. A nível diário, o preenchimento de falha assim como a correção dos erros são efetuados por observação visual dos dados diários em vários postos vizinhos do posto analisado, nos mesmos meses e anos onde falhas ou erros foram detectados a nível mensal. Neste caso, procura-se detectar registros diários errados, ou correspondendo a eventos chuvosos inexistentes ou ainda eventos chuvosos não registrados pela observância da penetração do evento chuvoso no espaço geográfico abrangido. As falhas ou erros são então corrigidos. Os totais mensais assim como os totais anuais são recalculados.

Após um estudo minucioso da qualidade dos dados e um estudo de correlações entre os postos descrito mais adiante, resolveu-se descartar do estudo os postos de Várzea Cercada; Faz. Santo Antônio; Faz. Princesa; Fazendinha; Água Mineral; Marés e Faz. Bulhões por apresentarem dados duvidosos. A análise de consistência pelo método do vetor regional, seguindo a mesma metodologia apresentada anteriormente foi então efetuada a nível anual, mensal e diário para os postos de Faz. Mamuaba de Cima; Faz. Mamuaba; Faz. Mumbaba; Faz. Santa Emília; Faz. Veneza; Imbiribeira; Jangada; R-2 Centro; R-5 Cruz das Armas; R-9 Tambaú e Riacho do Salto, no período de 1972 a 1989. A estes postos administrados pela CAGEPA foram também adicionados para este estudo os postos de També e Sapé, previamente consistidos. O posto pluviométrico de Alhandra foi descartado deste estudo pois não apresentou um comportamento regional aceitável.

Ao final deste estudo, dispõe-se então de dados consistidos a nível diário, mensal e anual, para 11 postos no período de 1972 a 1989 assim como para os postos de També e Sapé no período de 1962 a 1997 com interrupção em 1992 e 1993.

Os totais anuais precipitados brutos desse dois postos, por apresentarem uma série histórica suficientemente longa serão utilizados para se efetuar mais adiante um estudo sobre a tendência dos totais anuais precipitados assim como para detectar a existência ou não de ciclos entre períodos secos e períodos chuvosos.

4.4.3 – Análise estatística dos totais anuais e dos totais mensais precipitados nos postos pluviométricos consistidos.

Para cada posto consistido pelo estudo anterior calcularam-se os parâmetros estatísticos clássicos para as séries mensais e anuais, quais sejam: a média, o desvio padrão, o máximo, o mínimo (em mm); o coeficiente de variação; o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose. Os valores obtidos são fornecidos na tabela apresentada no Anexo 1.

Para os postos de També e de Sapé, os quais apresentam um período de observação maior, um ajustamento a funções de distribuição foi efetuado. Procurou-se a melhor distribuição que se ajusta aos totais anuais entre as distribuições Normal, Log-Normal e Gama incompleta a dois e três parâmetros. Para julgar a qualidade dos ajustes utilizou-se os testes do χ^2 e de Kolmogorov-Smirnov com nível de significância $\alpha = 0,05$, e constatou-se com esse nível de significância que as distribuições Normal, Log-Normal e Gama a 3 parâmetros se ajustaram corretamente, sendo que para os dois postos, També e Sapé, o melhor ajustamento foi obtido com a distribuição Log-Normal.

4.4.4 – Análise das séries temporais dos totais anuais precipitados.

Para traçar planos de aproveitamento dos recursos hídricos observando horizontes distantes de uma ou varias dezenas de anos, é importante efetuar uma análise das tendências dos totais precipitados anuais. Consiste em detectar se a série histórica registrada demonstra uma tendência, que seja essa positiva ou negativa e se existe registro de um ciclo entre períodos mais chuvosos e períodos mais secos. Neste trabalho este estudo foi feito para os postos de Sapé e També por apresentarem séries históricas suficientemente longas. O estudo foi feito sobre os valores brutos a fim de não considerar eventuais correções efetuadas pelo método do vetor regional que poderiam perturbar a análise. A variabilidade inter-anual relativamente elevada demonstrada pelos valores do coeficiente de variação (Anexo 1) conduz a hietogramas apresentando feições caóticas. Por este motivo, calculou-se as tendências para os valores brutos dos totais anuais precipitados assim como para valores suavizados pelas médias móveis de três e cinco anos. Os resultados são apresentados na tabela 4.8. Os valores são significativos quando a tendência apresenta o mesmo sinal para os valores brutos e os

valores suavizados e que o nível de significância (p) seja inferior a 5%, O nível de significância apresentado na tabela 4.8 corresponde ao menor valor calculado para as três séries de dados utilizados. Nos casos dos postos de També e de Sapé (figuras 4.7a e b), observa-se que não existe nenhuma tendência significativa.

Tabela 4.8 – Análise das tendências dos totais anuais precipitados nos postos pluviométricos de També e de Sapé.

| Posto | Tendência / val. brutos | Tendência / m. móvel de 3 anos | Tendência / m. móvel de 5 anos | p |
|-------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| També | - 0,66 | - 0,88 | -1,13 | 0,10 |
| Sapé | - 0,24 | - 0,15 | 0,85 | 0,53 |

O traçado do periodograma (figuras 4.8a e b) permite detectar a existência de ciclos sobre os totais anuais precipitados. Dessas figuras observa-se que o posto pluviométrico de Sapé não apresenta periodicidade enquanto o posto de També apresenta uma periodicidade de 11 anos.

4.4.5 – Análise da distribuição anual média da precipitação mensal

Neste parágrafo, procura-se observar a variabilidade intra-anual da precipitação. De fato os totais anuais precipitados podem ser na realidade concentrados em poucos meses ou

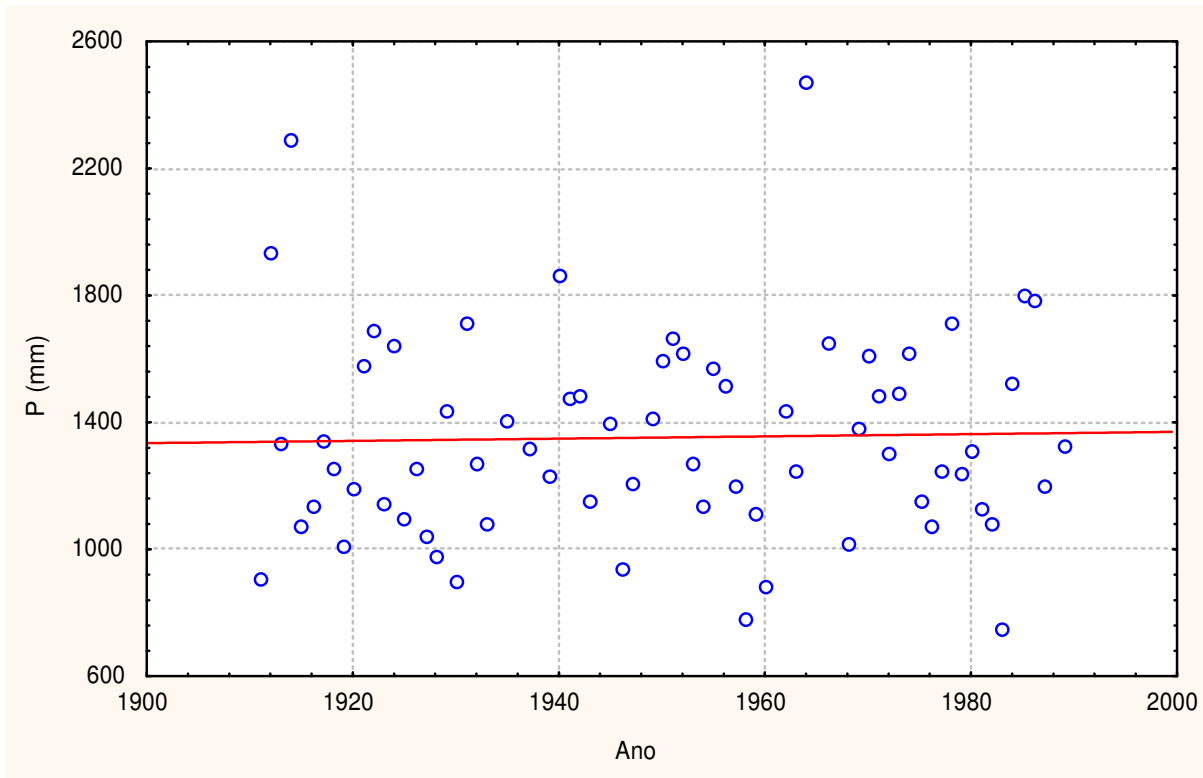


Figura 4.7a – Análise de Tendência do Posto També

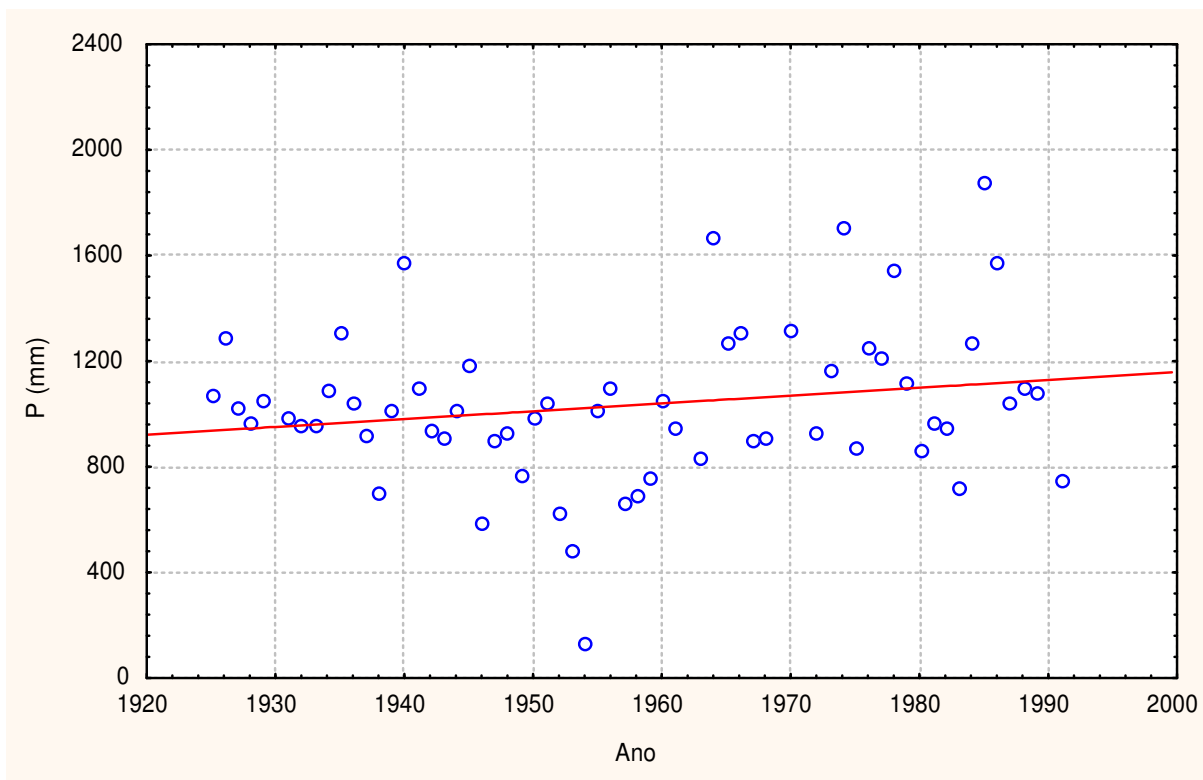


Figura 4.7b – Análise de Tendência do Posto Sapé

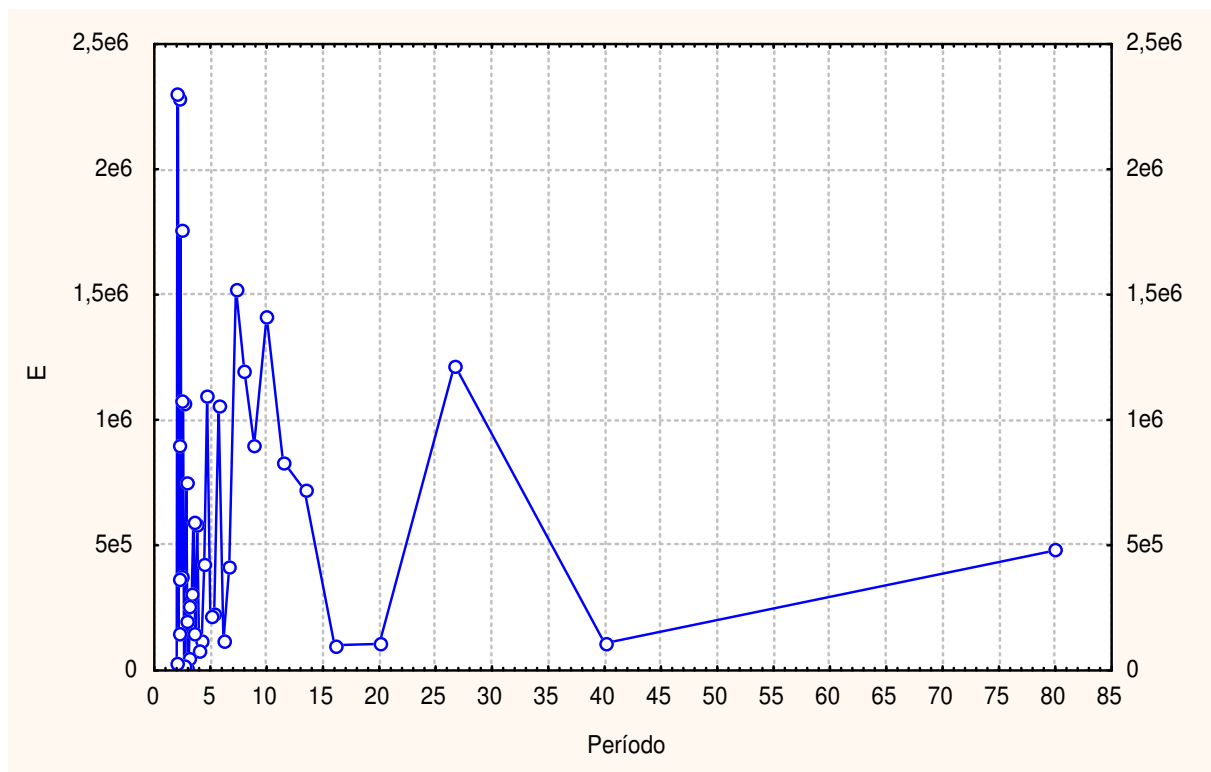


Figura 4.8a – Periodograma do Posto També

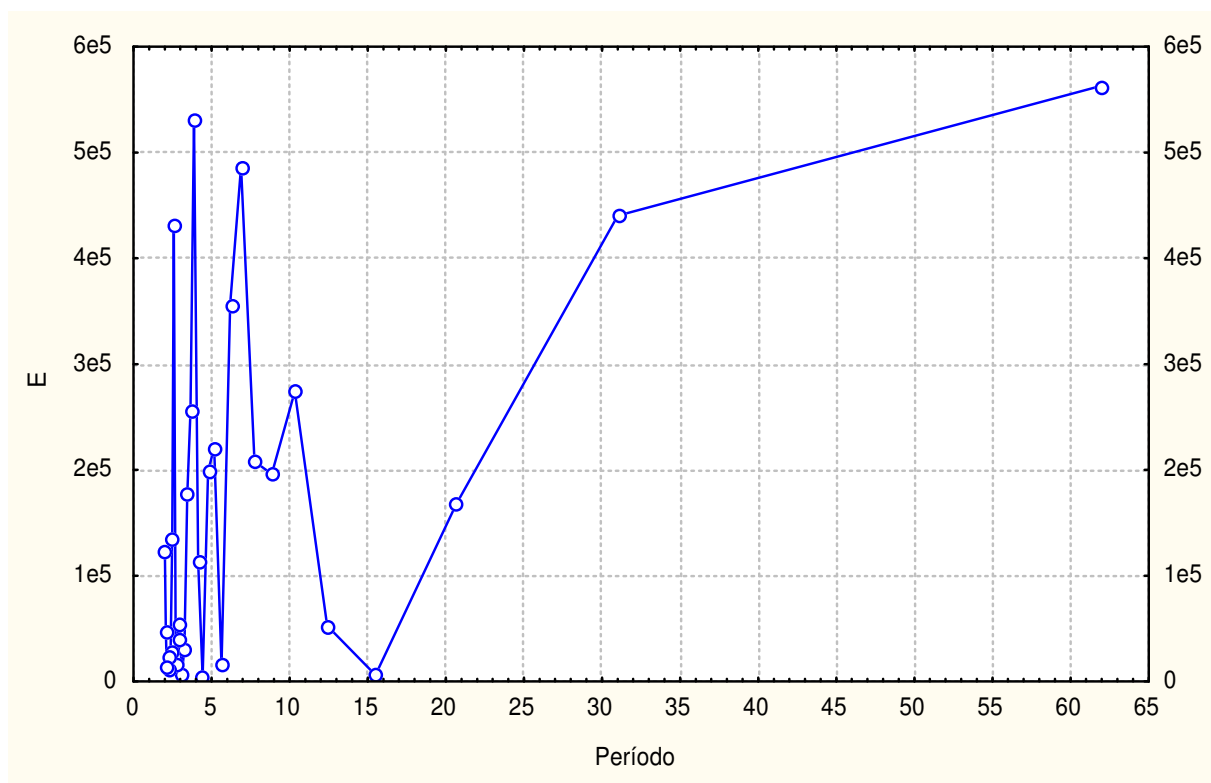


Figura 4.8b – Periodograma do Posto Sapé

então repartidos bastante regularmente ao longo do ano. Esta análise é importante porque caracteriza a relativa vulnerabilidade das disponibilidades hídricas na bacia. Calcula-se então a percentagem da média dos totais anuais precipitados que a média mensal representa para cada mês e traça-se a curva resultante para todos os postos em estudo. Os resultados são apresentados sob a forma de mapa na figura 4.9. Observa-se que a precipitação fica concentrada nos meses de março, abril, maio, junho e julho.

4.4.6 – Análise espacial da precipitação.

A bacia hidrográfica do Rio Gramame, de forma alongada apresenta uma orientação leste – oeste, Os movimentos de massas de ar descritos no parágrafo 4.1, mostram que a precipitação no litoral do Estado da Paraíba entre outros Estados do Nordeste é freqüentemente associada a perturbações de leste. Assim, devido ao contraste Oceano - Continente na extremidade leste do Estado, chuvas de carácter convectivas são freqüentemente observadas e um forte gradiente negativo das precipitações no sentido leste - oeste é esperado. A observação da variabilidade espacial da precipitação sobre a bacia hidrográfica em estudo deve ser efetuada e vai orientar a escolha do modelo hidrológico de transformação chuva – vazão que será utilizado.

Na tabela 4.9 é apresentada a matriz de correlação entre os totais anuais precipitados em todos os postos pluviométricos deste estudo. Os postos administrados pela CAGEPA, são muito mais próximos entre si do que os postos instalados pela SUDENE. Mesmo assim, detecta-se nos valores apresentados na tabela 4.9, uma série de coeficientes de correlação inferiores a 0,80, que traduz uma variabilidade espacial de pequena escala relativamente importante. Esta é associada ao carácter convectivo das chuvas na região.

- **Análise geoestatística**

Quando uma determinada propriedade varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através de dependência espacial, a estatística clássica deve ser abandonada e dar lugar a uma estatística relativamente nova: a geoestatística. Por estatística clássica entende-se aquela que utiliza parâmetros como média e desvio padrão para representar um fenómeno, e baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local

Tabela 4.9 - Coeficientes de correlação dos totais anuais precipitados

| Postos | Faz. Mamuaba de cima | Faz. Mamuaba | Faz. Mumbaba | Faz. Sta. Emília | Faz. Veneza | Imbiribeira | Jangada | R-2 Centro | R-5 C das Armas | R-9 Tambaú | Riacho do Salto | Sapé | També |
|----------------------|----------------------|--------------|--------------|------------------|-------------|-------------|---------|------------|-----------------|------------|-----------------|------|-------|
| Faz. Mamuaba de cima | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| Faz. Mamuaba | 0,46 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| Faz. Mumbaba | 0,35 | 0,60 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| Faz. Sta. Emília | 0,57 | 0,67 | 0,76 | 1,00 | | | | | | | | | |
| Faz. Veneza | 0,64 | 0,65 | 0,66 | 0,88 | 1,00 | | | | | | | | |
| Imbiribeira | 0,26 | 0,87 | 0,58 | 0,66 | 0,55 | 1,00 | | | | | | | |
| Jangada | 0,57 | 0,58 | 0,78 | 0,87 | 0,72 | 0,55 | 1,00 | | | | | | |
| R-2 Centro | 0,54 | 0,60 | 0,77 | 0,93 | 0,85 | 0,63 | 0,83 | 1,00 | | | | | |
| R-5 C das Armas | 0,60 | 0,61 | 0,80 | 0,93 | 0,87 | 0,55 | 0,87 | 0,95 | 1,00 | | | | |
| R-9 Tambaú | 0,50 | 0,42 | 0,44 | 0,68 | 0,69 | 0,48 | 0,51 | 0,75 | 0,71 | 1,00 | | | |
| Riacho do Salto | 0,56 | 0,72 | 0,66 | 0,86 | 0,76 | 0,61 | 0,83 | 0,77 | 0,85 | 0,63 | 1,00 | | |
| Sapé | 0,62 | 0,66 | 0,70 | 0,89 | 0,83 | 0,65 | 0,67 | 0,91 | 0,88 | 0,71 | 0,71 | 1,00 | |
| També | 0,62 | 0,65 | 0,61 | 0,90 | 0,86 | 0,64 | 0,73 | 0,87 | 0,90 | 0,73 | 0,81 | 0,87 | 1,00 |

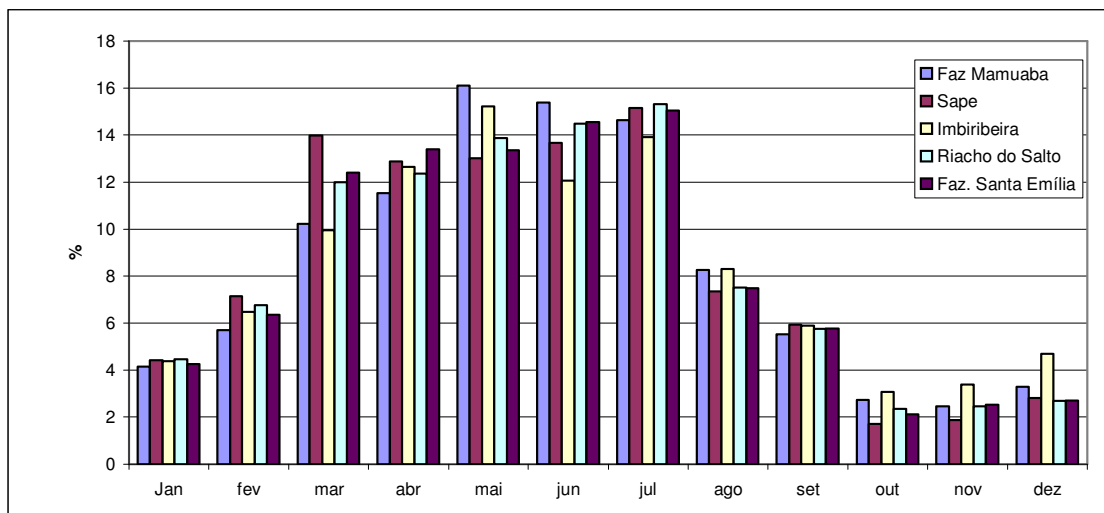


Fig. 4.9a – Variabilidade intra-anual da precipitação para os postos Faz. Mamuaba, Sapé, Imbiribeira, Riacho do Salto e Faz. Santa Emília

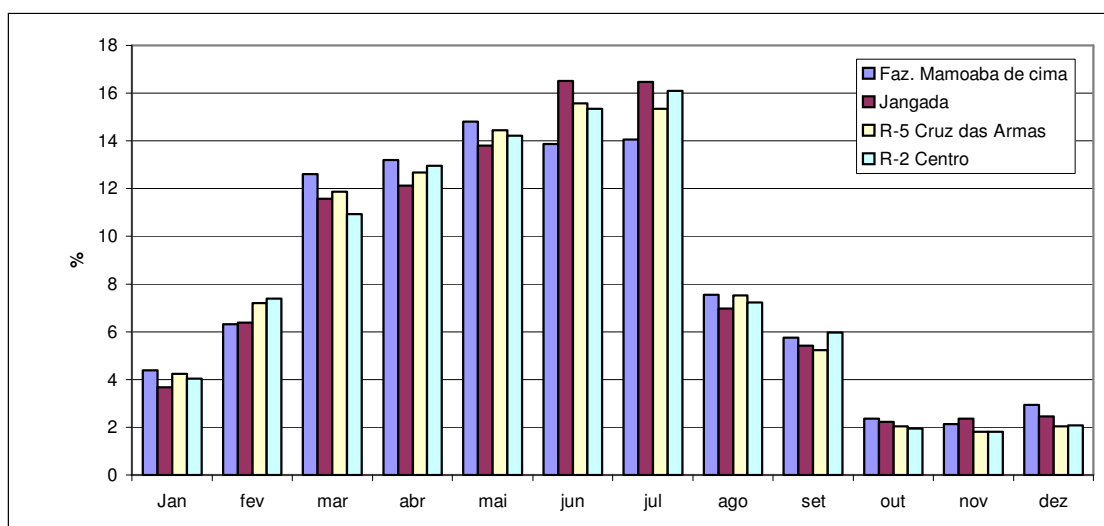


Fig. 4.9b – Variabilidade intra-anual da precipitação para os postos Faz. Mamuaba de Cima, R-5 Cruz das Armas, Jangada e R-2 Centro

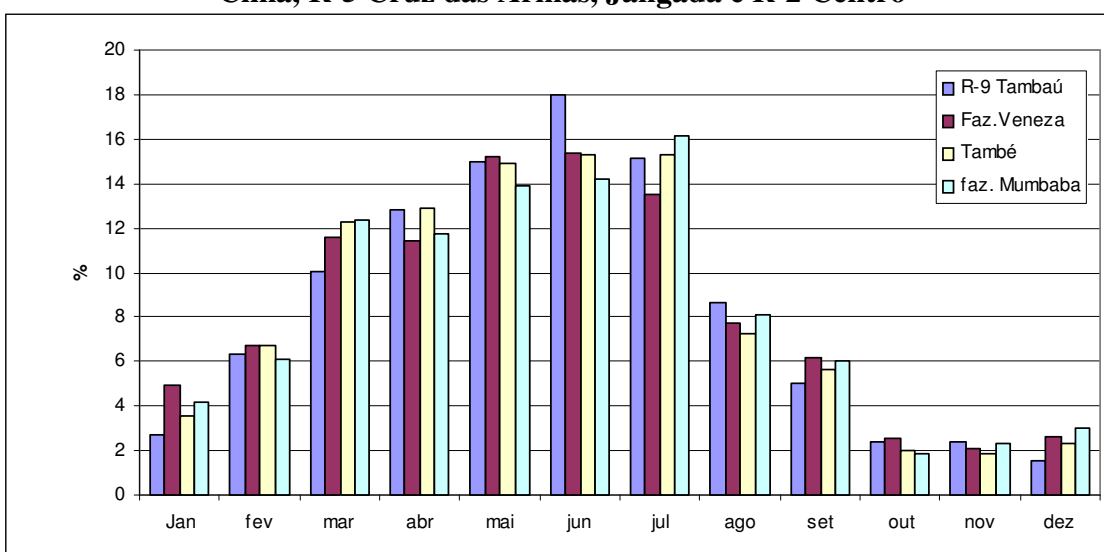


Fig. 4.9c – Variabilidade intra-anual da precipitação para os postos Fazenda Veneza, També, Faz. Mumbaba e R-9 Tambaú

para outro são aleatórias. Desse modo, estes dois ramos da estatística têm validade de aplicação em condições perfeitamente distintas. Para se determinar qual das duas deve ser usada em cada caso, utiliza-se o semivariograma que expressa a dependência espacial entre as amostras. Havendo dependência espacial, pode-se estimar valores da propriedade em estudo para os locais não amostrados dentro do campo, sem tendenciosidade e com variância mínima, através do método denominado Krigagem.

- **A função semivariograma**

Para o estabelecimento do problema, considere-se um campo de área **S**, para o qual se tem um conjunto de valores medidos $\{z(x_i), i = 1, n\}$, onde x_i , identifica uma posição no espaço ou no tempo, e representa pares ordenados (x_i, y_i) . Faz-se com que a função aleatória $Z(x_i)$, para qualquer x_i dentro de **S**, admita a hipótese de estacionaridade de ordem 2 para efetuar-se o cálculo do semivariograma. Uma função aleatória é estacionária de ordem 2 se:

$$E\{Z(x_i)\} = m \quad (1)$$

a) O valor estimado $E\{Z(x_i)\}$ existir e não depender da posição de x_i , ou seja: para qualquer x_i dentro da área **S**

b) Para cada par de variáveis aleatórias, $\{Z(x_i), Z(x_i + h)\}$, a função covariância, $C(h)$, existir e for função de h :

$$C(h) = E\{Z(x_i)Z(x_i + h)\} - m^2 \quad (2)$$

para qualquer x_i dentro de **S**.

A função variograma calculada a partir de valores amostrais de determinada variável de regionalização é conhecida como variograma experimental ou não-paramétrico. O semivariograma é, por definição:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (3)$$

e pode ser estimado através de:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $\{Z(x_i), Z(x_i + h)\}$, separados por um vetor h (Journel & Huijbregts, 1978, pag.12). O gráfico de $\gamma^*(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , e portanto depende de ambos, magnitude e direção de h . Quando o gráfico do semivariograma é idêntico para qualquer direção ele é chamado isotrópico e representa uma situação bem mais simples do que quando é anisotrópico.

O gráfico do semivariograma experimental, $\gamma(h)$ versus h , calculado usando a equação (4), mostrará uma série de pontos discretos de $\gamma(h)$ correspondendo a cada valor de h , e para o qual uma função contínua deve ser ajustada. Delhomme(1976) discutiu vários modelos de ajustes aplicáveis a diferentes fenômenos. Neste estudo, resultados com os principais modelos serão apresentados.

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas e pode ser uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmica nestas aplicações. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (Vieira et al., 1981). Por isto, se o modelo ajustado estiver errado, todos os cálculos seguintes também o estarão. Dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar (“sill”) e modelos sem patamar.

Na tabela 4.10 são apresentados os diferentes ajustes efetuados. Os diferentes parâmetros são explicados a seguir: C_0 é o efeito de pepita, que traduz a variabilidade espacial de pequena escala; $C_0 + C_1$ é o patamar, e A é o alcance do semivariograma, distância a partir da qual as correlações são fracas.

Para aplicar a teoria das variáveis generalizadas é necessário abranger um espaço relativamente grande, para que a cada distância h corresponde um número de pares de observação suficientemente importante. Assim o número de observações deve ser relativamente elevado. No caso deste estudo, e devido a descrição do movimento de massas de ar efetuado no parágrafo 4.1, resolveu-se utilizar os dados dos totais anuais precipitados de

todos os postos pluviométricos do Litoral até o Planalto da Borborema (incluído), o que perfaz um número de 114 postos pluviométricos. Na tabela 4.10 os valores mostrados são relativos ao ano de 1972. O coeficiente R^2 é o coeficiente de determinação. Na figura 4.10 está traçado o semivariograma com o ajuste efetuado pelo modelo linear com patamar para representar o ano 1972. Observa-se que com o modelo linear com patamar, o alcance é de 180,8 quilômetros. Observa-se também a existência de um efeito de pepita, o qual só foi possível detectar devido aos postos pluviométricos administrados pela CAGEPA. Este efeito será considerado na aplicação do Krigagem.

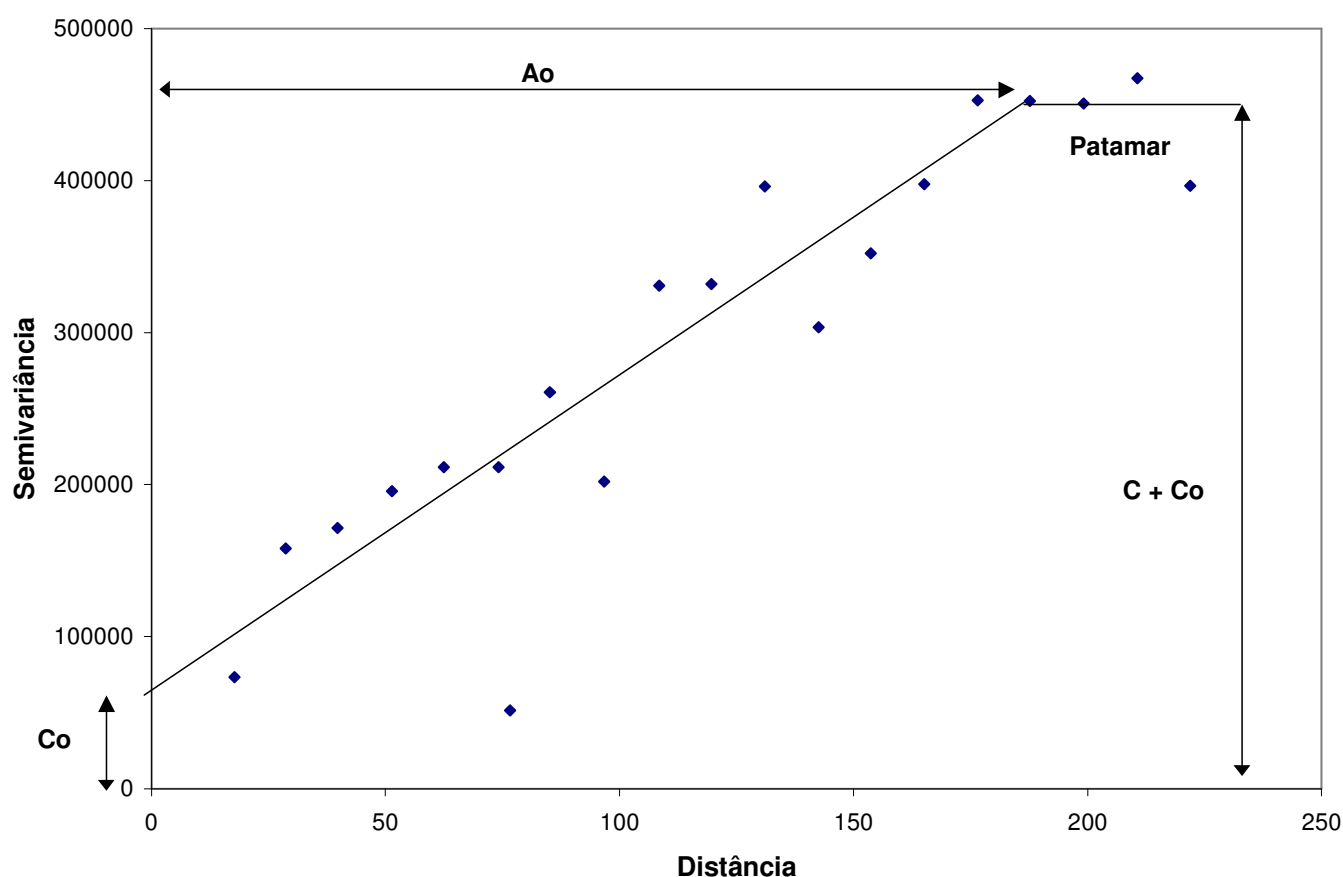


Figura 4.10 – Semivariograma com ajuste linear para o ano 1972

Tabela 4.10 - Ajustes do semivariograma para o ano de 1972

| Modelos | Co | Co + C | Ao | R ² |
|--------------------|---------|------------|---------|----------------|
| Linear | 79593,9 | > 510928,7 | > 227,9 | 0,919 |
| Linear com patamar | 63000,0 | 447600,0 | 180,8 | 0,945 |
| Esférico | 43000,0 | 455300,0 | 236,9 | 0,940 |
| Exponencial | 6000,0 | 517000,0 | 116,2 | 0,928 |
| Gaussiano | 97000,0 | 459800,0 | 203,7 | 0,927 |

Na figura 4.11 está representada a distribuição espacial dos postos pluviométricos. Observa-se nitidamente a presença de maior densidade de postos pluviométricos na bacia do Rio Gramame que deu origem ao efeito de pepita calculado. O mesmo estudo de ajuste foi efetuado para todos os anos do período 1972 – 1989. O modelo exponencial, globalmente apresentou melhor ajuste. Este modelo que será utilizado para o Krigagem.

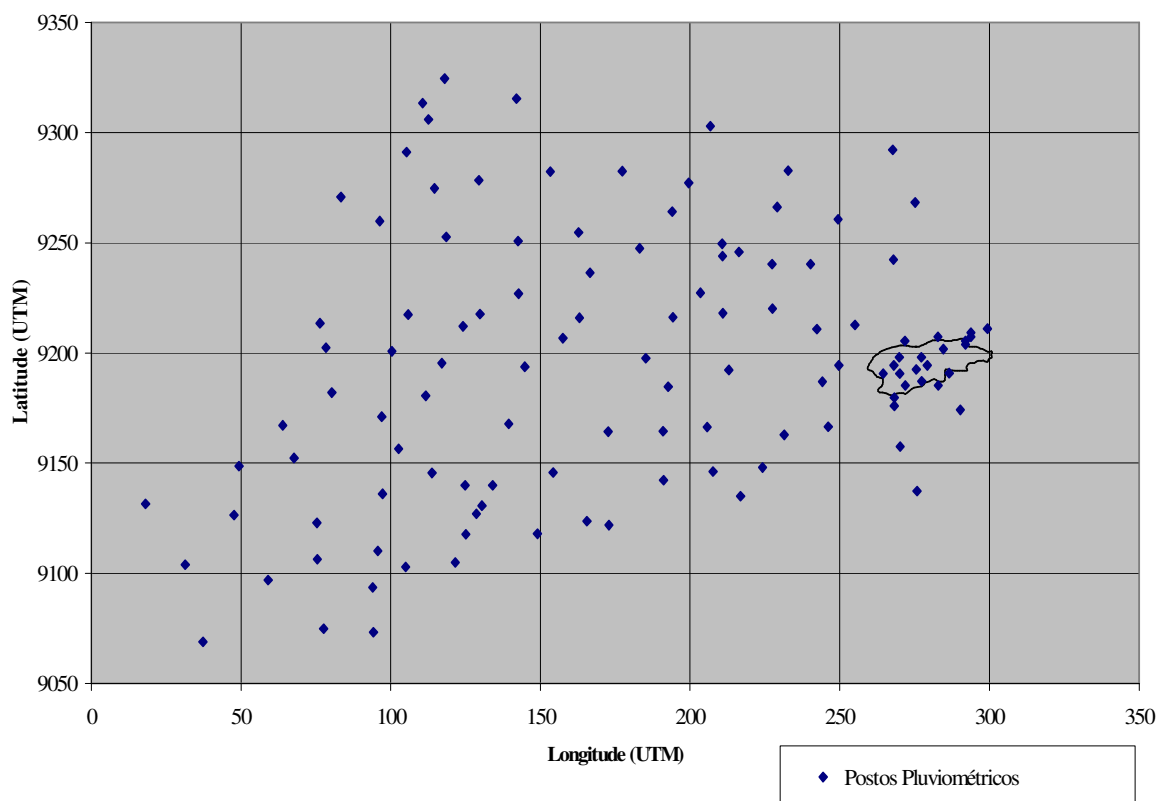


Figura 4.11 – Distribuição espacial dos postos pluviométricos

A técnica do Krigagem

Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima. O método de interpolação chama-se Krigagem, nome dado por Matheron (1970) em homenagem ao matemático sul-africano Krige.

Na estimativa do semivariograma e do cálculo da krigagem existe sempre um certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou os parâmetros ajustados aos modelos. Esta incerteza é o erro da estimativa, o qual pode ser estimado através do procedimento de auto validação comumente chamado de “jackknife”. Resumidamente, este procedimento envolve a estimativa da cada ponto medido “fazendo de conta” que ele não existe, durante a sua estimativa. Existe a necessidade absoluta de se “fazer de conta” que o valor sendo estimado não existe.

Se para cada um dos N locais onde se tem um valor $Z(x_i)$, se estimar um valor através da krigagem, então poder-se-á fazer um gráfico dos valores pareados $Z(x_i)$, $Z^*(x_i)$ e calcular a regressão linear entre eles. A regressão será então:

$$Z^*(x_i) = a + bZ(x_i) \quad (5)$$

onde a é a intercessão, b é o coeficiente angular da reta e R^2 é o coeficiente de determinação entre $Z(x_i)$ e $Z^*(x_i)$.

Assim, se a estimativa $Z^*(x_i)$ fosse idêntica ao valor medido $Z(x_i)$, então a seria nulo, b e R^2 seriam iguais a unidade. À medida em que os valores de a aumentam de 0 para valores positivos, isto indica que o estimador $Z^*(x_i)$ está superestimando valores pequenos de $Z(x_i)$ e subestimando valores grandes. À medida que a decresce de 0 para valores negativos, o contrário acontece. Este último caso, porém não é comum. Deste modo, a qualidade da estimativa pode ser medida pelo julgamento destes parâmetros.

Aplicando-se as condições de não-tendência e de variância mínima, nos erros absolutos, pode-se então dizer que:

$$\overline{EA} = E\{EA(x_i)\} = E\{Z^*(x_i) - Z(x_i)\} = 0 \quad (6)$$

e

$$VAR(\overline{EA}) = E\{(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2\} = \text{mínima} \quad (7)$$

Se estas condições não forem satisfeitas, então alguma das condições previamente assumidas estará sendo violada. Porém, a equação (7) é bastante difícil de ser verificada porque o conceito de ser mínimo torna-se subjetivo quando não se tem uma referência. O procedimento seguinte pode contribuir nesse sentido.

Lembrando que no cálculo dos valores estimados, $Z^*(x_i)$, sempre se tem a variância da estimativa, $\sigma_K^2(x_i)$, então pode-se definir o erro reduzido como:

$$ER(x_i) = (Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_K(x_i) \quad (8)$$

A divisão pela raiz quadrada da variância da estimativa faz com que os $ER(x_i)$ sejam sem dimensão e que, por isso, as condições de não tendência e de variância mínima, requeiram que:

$$\overline{ER} = E\{ER(x_i)\} = E\{(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_K(x_i)\} = 0 \quad (9)$$

e

$$VAR(\overline{ER}) = E\{(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_K(x_i)\}^2 = 1 \quad (10)$$

Estas propriedades fazem deste tipo de erro uma valiosa ferramenta e de fácil uso nas aplicações da geoestatística.

Neste trabalho, utilizou-se a técnica do Krigagem para traçar as isoietas na bacia hidrográfica do Rio Gramame. Apresenta a vantagem em relação ao traçado clássico das isoietas de poder facilmente estimar em cada ponto do mapa o valor da precipitação anual. Traçou-se as isoietas para o ano de 1976, representativo da pluviosidade anual média na bacia.

Na figura 4.12 estão traçadas as isoietas pela técnica de interpolação do Krigagem. O semivariograma foi ajustado a um modelo exponencial apresentando as seguintes características: Efeito de Pepita (C_o) = 20,000; Patamar ($C_o + C$) = 431,000; Alcance (A_o) = 139,1; Coeficiente de Determinação $R^2 = 0,909$. A verificação pelo Jackknife indicou um R^2

igual a 0,682 com um coeficiente de 0,71. A média e a variância do erro reduzido foram respectivamente de 0,018 e 1,17.

A partir do mapa das isoietas traçou-se na figura 4.13 um corte vertical no paralelo 9200 km (UTM), que mostra o forte gradiente longitudinal (Leste - Oeste) da precipitação na bacia hidrográfica. Três regiões foram determinadas: A região I, com o gradiente de 7,4 mm/km; a região II, no centro da bacia, com o gradiente de 31,0 mm/km e a região III com o gradiente de 12,5 mm/km. São valores de gradiente extremamente elevados, principalmente no centro da bacia hidrográfica.

4.4.7 – Chuvas Intensas

A equação da intensidade em função da frequência e duração para estimativas das chuvas intensas em João Pessoa foi estabelecida por Aquino (1972).

Este autor propõe a seguinte equação:

$$i = \frac{369,4 \times Tr^{0,15}}{(t + 5)^{0,568}}$$

onde i é a intensidade da chuva em mm/h.

Tr é o tempo de recorrência em anos.

t é a duração em minutos.

Otto Pfastetter, no seu celebre trabalho “Chuvas Intensas do Brasil” traçou gráficos das chuvas intensas para a cidade de João Pessoa.

As curvas propostas por Otto Pfastetter para diversos tempos de recorrência, assim como as curvas resultantes do trabalho de Aquino estão traçadas na figura 4.14.

4.5 – O balanço hídrico

Neste trabalho, utilizou-se o modelo de balanço hídrico de Thornthwaite e Matter (1955). Com os resultados do balanço hídrico são determinados o índice de umidade, o índice de aridez e o índice hídrico.

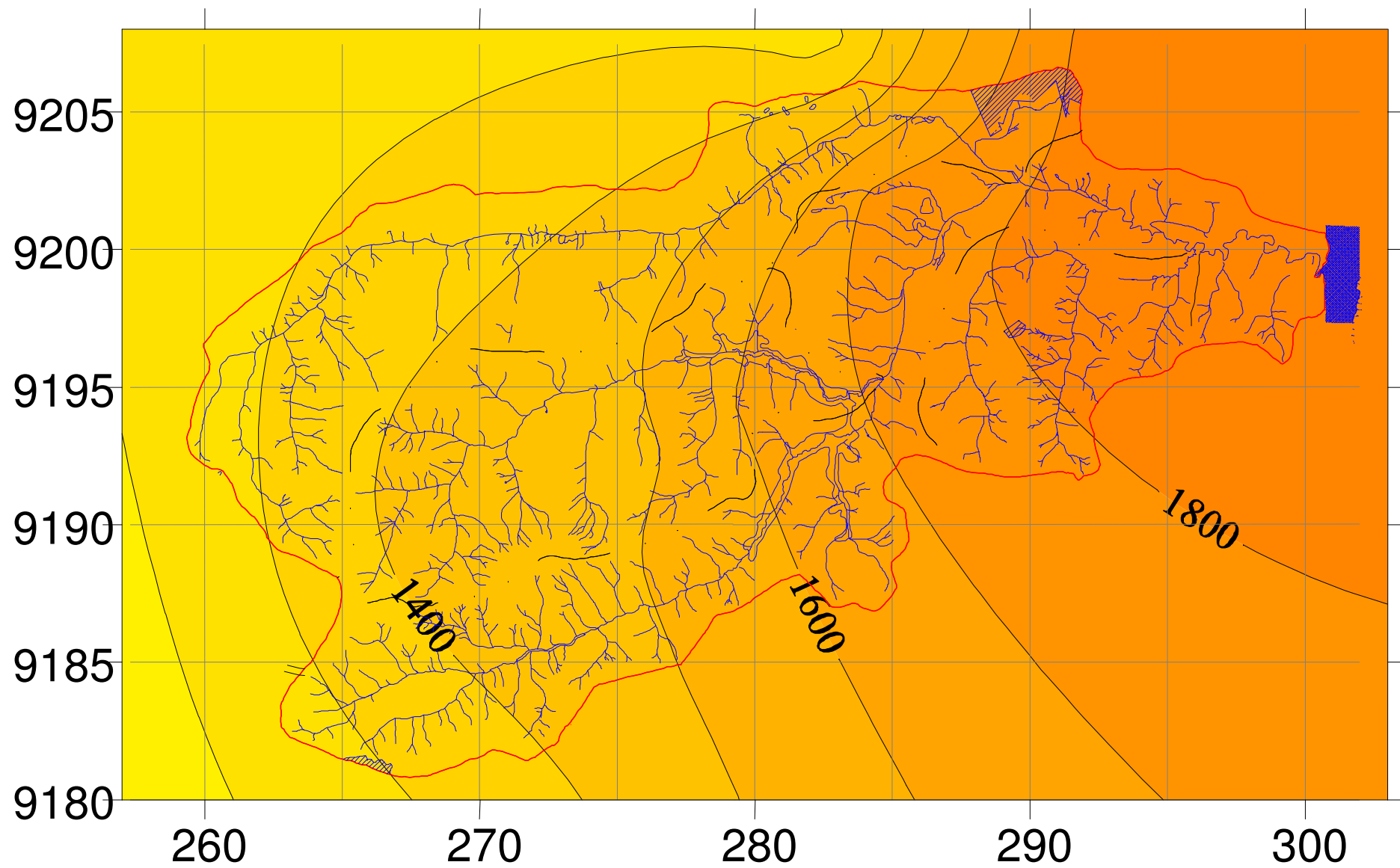


Figura 4.12 – Isoietas Médias Anuais

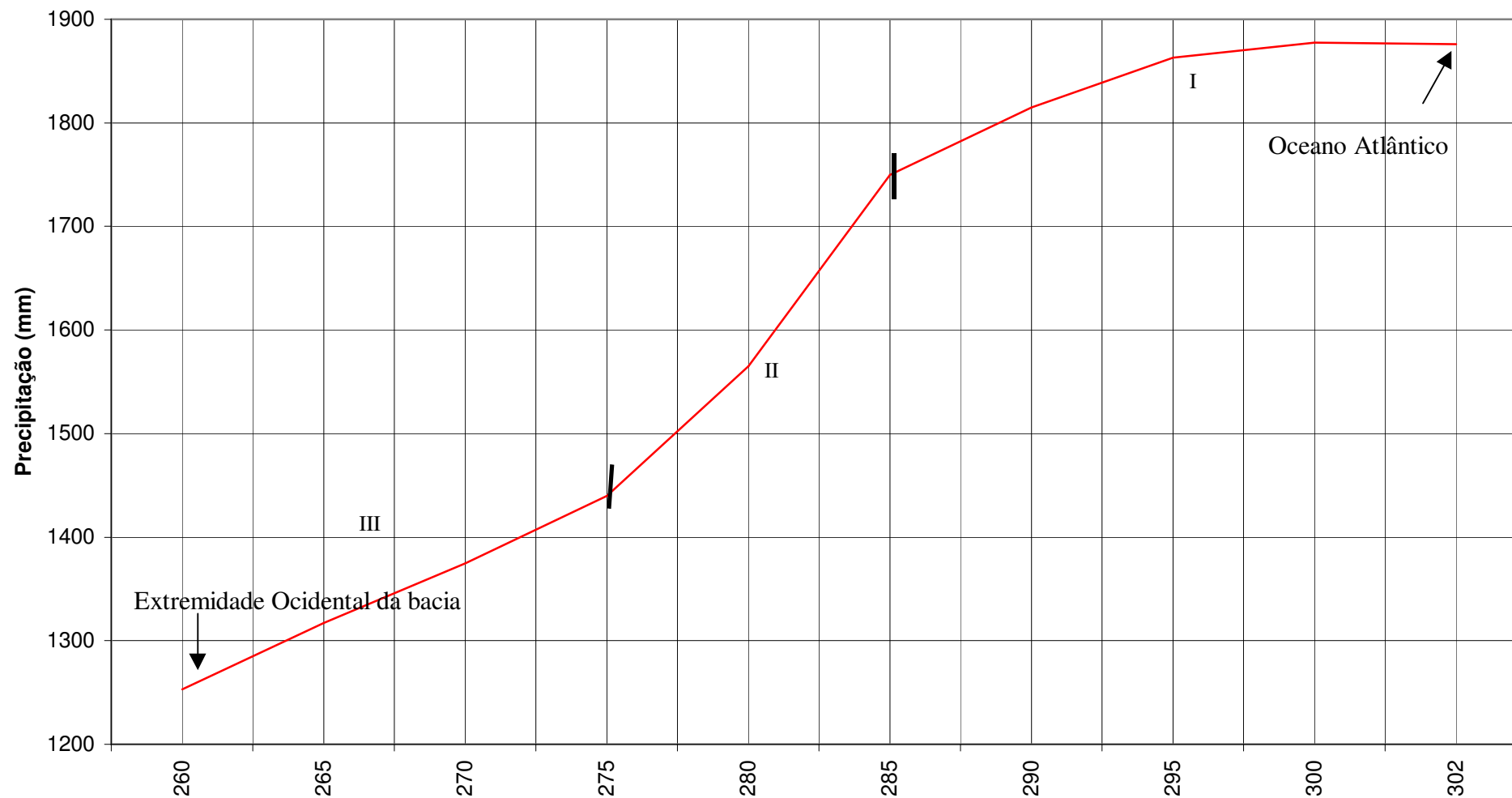


Figura 4.13 - Gradiente de Precipitação Média Anual

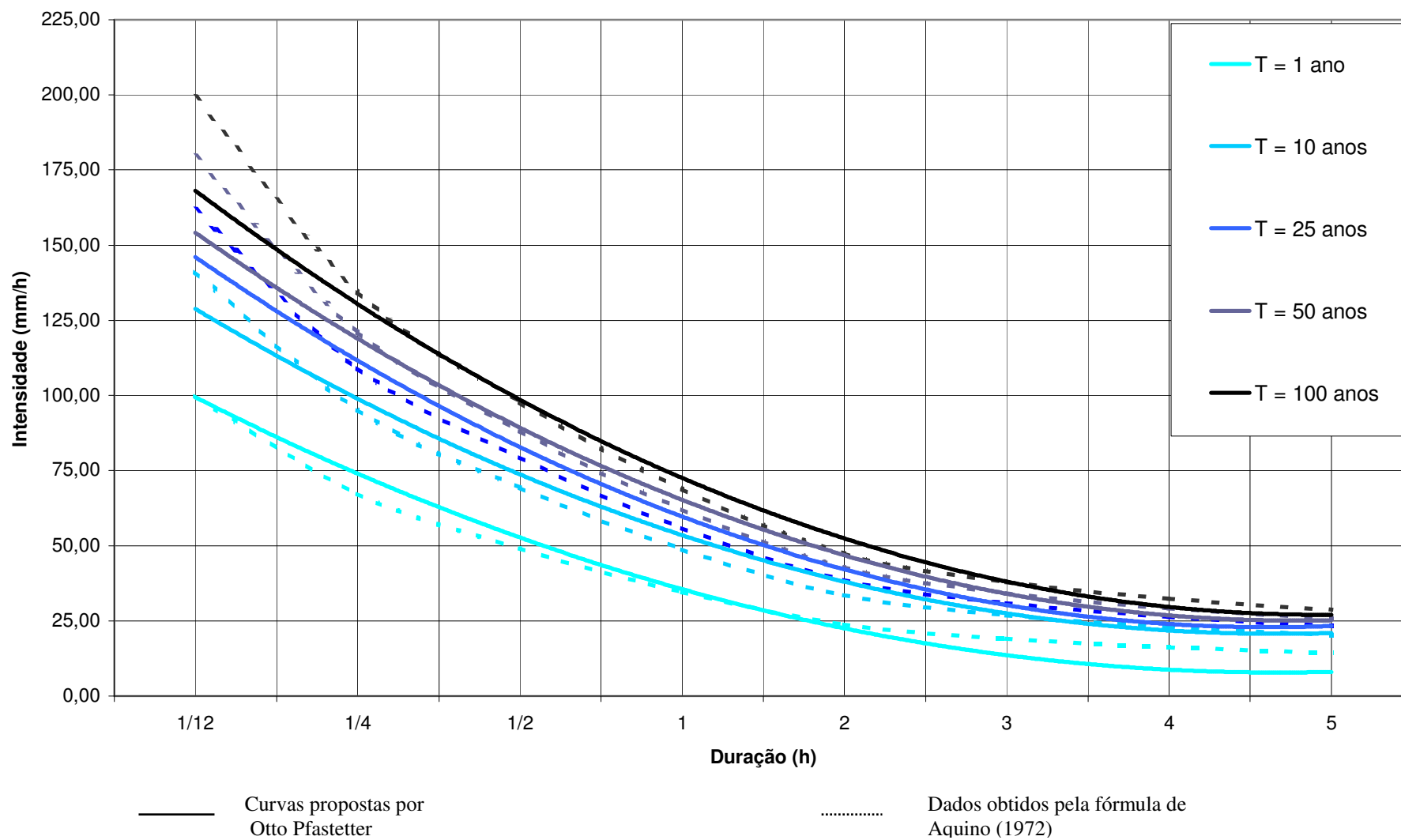


Figura 4.14 – Curvas INTENSIDADE – DURAÇÃO - RECORRÊNCIA

O Balanço hídrico de Thornthwaite e Matter

O Balanço hídrico é realizado a nível anual, utilizando-se dos valores de precipitação e evapotranspiração médias mensais. Considerando a capacidade C de retenção de água do solo expressa em mm, procura-se avaliar a cada mês, a quantidade $A(i)$, $i = 1, \dots, 12$ armazenada dentro do solo. O processo é iterativo e se inicia a partir do último mês do período chuvoso, para o qual se considera que a quantidade de água armazenada dentro do solo é igual a sua capacidade de retenção. Nos meses subsequentes, observa-se a diferença entre a precipitação $P(i)$ e a evapotranspiração $ETP(i)$. Se esta for positiva, o armazenamento no solo passará a ser:

$$A(i) = A(i-1) + (P(i) - ETP(i))$$

Caso $A(i)$ seja superior a C , a capacidade de retenção do solo, a diferença $A(i) - C$ é considerada como excedente $EC(i)$. Se a diferença entre $P(i)$ e $ETP(i)$ for negativa, a quantidade armazenada no solo será dada por :

$$A(i) = C \exp(B N(i))$$

Onde:

B é um parâmetro que depende do valor de C .

$N(i)$ é o somatório dos valores negativos de $P(i) - ETP(i)$, desde o início do cálculo.

A evapotranspiração real é igual a evapotranspiração potencial quando a umidade do solo não for um fator limitante. Caso contrário será inferior. No balanço hídrico de Thornthwaite e Matter (1955), ela é calculada do seguinte modo:

Se a precipitação $P(i)$ for superior ou igual à evapotranspiração potencial $ETP(i)$, a evapotranspiração real daquele mês $ER(i)$ é igual a $ETP(i)$, caso contrário será dada pela expressão:

$$ER(i) = P(i) + |A(i) - A(i-1)|$$

A deficiência hídrica será então dada por:

$$Def(i) = ETP(i) - ER(i)$$

A definição dos índices climáticos

O índice de umidade, I_u , representa o excesso de água expresso em porcentagem da necessidade que é representada pela evapotranspiração potencial.

$$I_u = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} E_c(i)}{\sum_{i=1}^{12} ETP(i)}$$

O índice de aridez, I_a , representa a deficiência hídrica expressa em porcentagem da evapotranspiração potencial

$$I_a = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} Def(i)}{\sum_{i=1}^{12} ETP(i)}$$

Como na maioria dos casos, apresenta-se durante o ano, estações de excesso e falta de água, exprime-se então o índice efetivo de umidade para o ano (ainda chamado índice hídrico) da seguinte maneira:

$$I_m = I_u - 0,6 I_a$$

O índice efetivo de umidade ou índice hídrico permite efetuar a classificação climática de Thornthwaite a qual está resumida na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Tipos climáticos segundo Thornthwaite em função do índice efetivo de umidade

| Tipo Climático | Índice Efetivo de Umidade |
|------------------------------------|---------------------------|
| A – Super úmido | 100 e acima |
| B – Úmido | 100 → 80 |
| B ₃ – Úmido | 80 → 60 |
| B ₂ – Úmido | 60 → 40 |
| B ₁ – Úmido | 40 → 20 |
| C ₂ – Úmido e Sub-Úmido | 20 → 0 |
| C ₁ – Seco e Sub-Úmido | 0 → -20 |
| D – Semi-árido | -20 → -40 |
| E – Árido | -40 → -60 |

Valores de índice hídrico negativos são indicativos de clima seco em quanto valores positivos indicam clima úmido. No caso de clima úmido como é o caso da região abrangida pela bacia hidrográfica do rio Gramame, o índice de aridez fornece uma indicação suplementar quanto a distribuição estacional das precipitações como resumido na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Sub-tipos climáticos segundo Thorthwaite, em função da distribuição estacional das precipitações para clima úmido

| Sub-tipo climático | Características | Índice de aridez, Ia |
|--------------------|--|----------------------|
| r | Pequena ou nenhuma deficiência de água | 0 – 16,7 |
| S | Moderada deficiência no verão | 16,7 – 33,3 |
| W | Moderada deficiência no inverno | 16,7 – 33,3 |
| S2 | Grande deficiência no verão | > 33,3 |
| W2 | Grande deficiência no inverno | > 33,3 |

Aplicação do balanço hídrico climático à região da bacia hidrográfica do rio Gramame

No balanço hídrico proposto por Thornthwaite e depois modificado por Thornthwaite e Matter (1955), a evapotranspiração potencial é calculada pelo método de Thornthwaite que considera a evapotranspiração potencial como uma função da temperatura média mensal e da duração teórica do dia, a qual depende da latitude local (ϕ) e da declinação (δ). Um valor mensal da evapotranspiração potencial foi calculado para toda a bacia hidrográfica do rio Gramame, considerando as temperaturas médias mensais do posto climatológico de João Pessoa. A duração teórica do dia foi calculada para o ponto geográfico correspondente ao centro de massa da bacia.

De posse destes valores o índice térmico é calculado segundo a fórmula:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T(i)}{5} \right)^{1,514}$$

assim como o coeficiente a:

$$a = (0,675 I^3 - 77,1 I^2 + 17920 I + 492390) \times 10^{-6}$$

e a evapotranspiração potencial (em mm/mês):

$$ETP(i) = 16 \left(\frac{10T(i)}{I} \right)^a * f$$

onde f é um fator de correção:

$$f = \frac{Di}{30} \times \frac{N}{12}$$

que leva em conta o número efetivo de dias do mês Di e a duração teórica do dia N:

$$N = \frac{24}{\pi} \arccos(-\operatorname{tg} \phi \cdot \operatorname{tg} \delta)$$

Os diversos tipos de solo encontrados na região foram classificados segundo a capacidade de retenção de umidade, C, apresentada na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Classificação dos solos pela capacidade de retenção de umidade

| Classe de solos | Classe textural | Prof. (m) | CC (%) | PM (%) | D. ap. | C (mm) |
|-----------------|-------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| LV | Média | 2,00 | 8,60 | 5,40 | 1,43 | 9,10 |
| PV | Média | 1,70 | 8,46 | 5,43 | 1,29 | 6,60 |
| PV | Argilosa | 1,85 | 15,68 | 11,16 | 1,73 | 14,50 |
| PE | Argilosa | 2,10 | 16,28 | 5,25 | 1,54 | 35,70 |
| Ae | Média/Argilosa/ Arenosa | 1,50 | 25,73 | 9,14 | 1,32 | 32,80 |
| AMd | Areias Quartzosas | 2,50 | 4,00 | 1,00 | 1,65 | 12,40 |
| HP | Podzol | 1,20 | 4,00 | 1,00 | 1,65 | 5,90 |
| HGd | Solos Gley | 1,50 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| SM | Solos de Mangue | 2,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Nesta tabela, CC e PM representam respectivamente a capacidade de campo e o ponto de murchamento expressos em porcentagem de volume. D. ap. é a densidade aparente do solo e C é a capacidade de retenção de umidade. Os solos que obedecem às classes texturais Solos Gley e Solos de Mangue são permanentemente saturados em água. Assim não há sentido de efetuar o balanço hídrico para estes solos.

Na figura 4.15 estão representadas as diversas classes de solo para a bacia hidrográfica do rio Gramame.

Como pode ser visto nas figuras 4.12 e 4.13, a distribuição espacial da precipitação apresenta um forte gradiente no sentido Leste – Oeste. Assim, os índices de umidade I_u , de aridez, I_a , e hídrico, I_m , para cada classe de solo, foram calculadas dentro das faixas representadas pelas isoietas, de modo a caracterizar da melhor maneira possível a distribuição espacial da chuva em conjunto com a distribuição espacial das classes de solo. Neste cálculo utilizaram-se os valores médios de precipitação de postos pluviométricos inseridos nas faixas de isoietas. Os resultados aparecem na tabela 4.14.

O índice hídrico I_m , sempre positivo, inferior a 20 ou ligeiramente superior indica, segundo a classificação de Thornthwaite, um clima sub-úmido ou úmido. O índice de aridez, cujo valor situa-se sempre entre 16,7 e 33,3 indica moderada deficiência hídrica no verão.

FIGURA 4.15 – CARTA DOS SOLOS

Tabela 4.14 - Índices de umidade, Iu, de aridez, Ia e hídrico Im para as faixas de isoietas da bacia do Rio Gramame.

| Faixa de Isoieta até 1350 mm | | | | |
|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV – Textura média | 3 | 28,5 | 25,9 | 12,9 |
| PV – Textura argilosa | 42 | 27,9 | 25,3 | 12,7 |
| PE – Textura Argilosa | 55 | 26,4 | 23,8 | 12,1 |
| Faixa de Isoieta de 1350 à 1450 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV – Textura média | 43 | 25,8 | 26,8 | 9,7 |
| PV – Textura argilosa | 36 | 25,2 | 26,3 | 9,5 |
| PE – Textura Argilosa | 12 | 23,7 | 24,8 | 8,9 |
| HP – Podzol | 9 | 25,8 | 26,9 | 9,7 |
| Faixa de Isoieta de 1450 à 1550 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV – Textura média | 18 | 28 | 25,9 | 12,4 |
| PV – Textura argilosa | 36 | 27,4 | 25,4 | 12,2 |
| HP – Podzol | 46 | 28 | 26 | 12,4 |
| Faixa de Isoieta de 1550 à 1650 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV – Textura média | 31 | 29,4 | 25,8 | 13,9 |
| PV – Textura argilosa | 29 | 28,9 | 25,3 | 13,7 |
| HP – Podzol | 40 | 29,5 | 25,9 | 13,9 |
| Faixa de Isoieta de 1650 à 1750 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV – Textura média | 38 | 32,7 | 24,9 | 17,8 |
| PV – Textura argilosa | 23 | 32,2 | 24,4 | 17,6 |
| Ae – Textura média/argilosa/arenosa | 8,5 | 30,9 | 23,1 | 17 |
| HP – Podzol | 29,5 | 32,8 | 25 | 17,8 |
| HGd – Solos Gley | 1 | - | - | - |
| Faixa de Isoieta de 1750 à 1850 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV - Textura média | 29 | 37,4 | 24,4 | 22,7 |
| PV - Textura argilosa | 47 | 36,8 | 23,9 | 22,5 |
| Ae - Textura média/argilosa/arenosa | 5 | 35,5 | 22,6 | 22 |
| HP – Podzol | 11,5 | 37,4 | 24,5 | 22,7 |
| HGd - Solos Gley | 7,5 | - | - | - |
| Faixa de Isoieta a partir de 1850 mm | | | | |
| Classe de solo | % Área por faixa de isoietas | Iu (%) | Ia (%) | Im (%) |
| PV - Textura média | 50,4 | 39,7 | 24,3 | 25,1 |
| PV - Textura argilosa | 25 | 39,2 | 23,8 | 24,9 |
| Amd - Areias Quartzosas | 0,6 | 39,3 | 23,9 | 25 |
| HGd - Solos Gley | 5 | - | - | - |
| SM - Solos de Mangue | 19 | - | - | - |

4.6 – Estudo das chuvas extremas

Os postos pluviométricos de També e Alhandra apresentam séries históricas longas, respectivamente 81 e 58 anos. Os valores máximos diários anuais foram ajustados para ambos os postos a uma distribuição de Gumbel. O ajustamento é efetuado com o software GUMBEL, desenvolvido pela SCIENTEC, o qual constitui o MAG 3 segundo os termos de referência. O ajustamento aparece nas figuras 4.16 e 4.17. Nestas figuras são indicados os valores do parâmetro de locação, β e do parâmetro de escala, α da distribuição ajustada, assim como os coeficientes de assimetria C_s e de curtose k .

Na tabela 4.15 aparecem as precipitações máximas diárias anuais calculadas para diversos tempos de recorrência.

Tabela 4.15 – Precipitações máximas diárias anuais para diversos tempos de recorrência

| Tempo de recorrência (anos) | Posto També | Posto Alhandra |
|--|--|--|
| | Precipitação máxima diária (mm) | Precipitação máxima diária (mm) |
| 100 | 167,7 | 220,9 |
| 200 | 182,4 | 243,1 |
| 500 | 201,9 | 272,4 |
| 1000 | 216,6 | 294,5 |
| 10000 | 265,4 | 367,9 |

Figura 4.16 – Ajustamento à distribuição de Gumbel – Posto També

Figura 4.17 – Ajustamento à distribuição de Gumbel – Posto Alhandra

4.7 – Referências Bibliográficas

- AQUINO, José de Souza , 1972, Estudo de Chuvas Intensas da Grande João Pessoa. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica de Campina Grande, UFPB.
- DELHOMME, J. P., 1976, Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur Ingénieur, Université Paris VI, 130p.
- HIEZ, G., 1977, L'homogénéité des données pluviométriques Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie, Paris, 14(2): p.129 – 172.
- HIEZ, G., 1978, Processamento de dados – Método do vetor regional, Recife, Sudene.
- JOURNEL, A. G. and Huijbregts, Ch. J., 1978, Mining Geostatistics, London Academic Press, pág 12.
- MATHEROM, 1970, La Théorie des variables régionalisées, et ses applications, Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, (S), 212p.
- SCIENTEC, 1999, Climatologia no Estado da Paraíba – Estudo da Qualidade dos Dados, 114p.
- SUDENE, 1982, Bacia Representativa de Sumé – primeira estimativa dos recursos de água, Recife.
- SUDENE, 1984, Dados climatológicos básicos do Nordeste, 56p.
- THORNTHWAITE, C. W. & J. R. MATHER, 1955, Instructions and tables for computing potencial evapotranspiration and the water balance. Drexel Inst. of Tech. N. Jersey.
- VIEIRA, S. R. et al., 1981, Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. Apostila do curso GISBRASIL, 98, Curitiba.
- VAREJÃO E SILVA, M. A., 1987, Atlas Climatológico do Estado da Paraíba, 2ª Edição.