



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**

***AVALIAÇÃO DE REDE PLUVIOMÉTRICA E ANÁLISE DE  
VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO:  
ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO IPOJUCA EM  
PERNAMBUCO***

**Autor: JOÃO HIPÓLITO PAIVA DE BRITTO SALGUEIRO**

**Orientadora: SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO**

**Co-orientador: MANOEL SYLVIO CARNEIRO CAMPELLO**

Recife - PE  
Agosto de 2005

**João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro**

***“Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco”***

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, na área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, em cumprimento às exigências para obter o Grau de Mestre.

**Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Ph. D.**

Orientadora

**Manoel Sylvio Carneiro Campello, D. Sc.**

Co-orientador

Recife - PE  
Agosto de 2005

**Salgueiro, João Hipólito Paiva de Britto**

**Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação : estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco / João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro. – Recife : O Autor, 2005.**

xvi, 122 folhas : il., fig., tab.

**Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2005.**

**Inclui bibliografia e anexos.**

**1. Engenharia civil – Recursos hídricos. 2. Redes pluviométricas – Variabilidade espacial da precipitação – Avaliação da eficiência. 3. Bacia do rio Ipojuca, Pernambuco – Diagnóstico pluviométrico – Rede específica – Métodos convencionais e geoestatísticos. I. Título.**

556.042

CDU (2.ed.)

UFPE

627.123

CDD (22.ed.)

BC2006-282

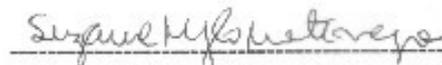
**“Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco”**

Parecer da Comissão examinadora de defesa de dissertação de mestrado de

**João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

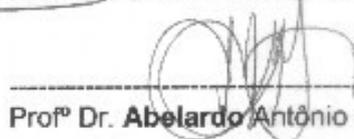
Aprovado por:



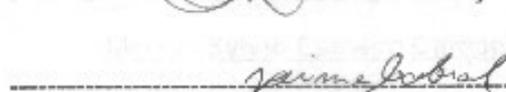
Profª Drª **Suzana Maria Gico Lima Montenegro**, (UFPE)



Profº Dr. **Geber Barbosa de Albuquerque Moura**, (UFRPE)



Profº Dr. **Abelardo Antônio de Assunção Montenegro**, (UFRPE)



Profº Dr. **Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral**, (UFPE)

Recife, PE – Brasil.

Agosto de 2005

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Inteligência Suprema e causa primária de todas as coisas por ter me permitido realizar esta tarefa.

A todos os meus familiares, aqui e no outro plano, e em especial à minha mulher e filha, Leidjane e Camila Salgueiro por terem superado os momentos em que me fiz ausente durante esta jornada, e a minha prima Christina Salgueiro por todo o apoio dedicado.

Aos trabalhadores do Núcleo Espírita Jesus no Lar pelas vibrações emanadas em meu favor.

Ao ex-Superintendente da CPRM, Marcelo Soares Bezerra e o atual, José Wilson Temóteo, pela confiança que ambos depositaram em minha pessoa no cumprimento desta tarefa.

À professora Suzana Montenegro pela orientação, dedicação e otimismo nos momentos mais difíceis e ao professor Sylvio Campello pela honra de poder compartilhar sua vasta experiência.

A todos os colegas de turma, especialmente os engenheiros: Marcos Vieira, Sergio Carneiro, Clélia Araújo, Marcelo Asfora e Ronaldo Faustino pelos momentos em que unidos vivenciamos.

Aos professores das disciplinas cursadas: Jaime Cabral, Almir Cirilo, Lourdinha Florêncio, Mariano Aragão e M<sup>a</sup> do Carmo Sobral, pelos conhecimentos que foram repassados.

Aos engenheiros Osvalcélvio Furtunato e Thaisa Alcoforado e o bolsista Anderson Nunes da UFPE pelas colaborações técnicas específicas.

Às Secretárias do Departamento de Hidráulica da UFPE: Sueli, Janaina e Valquíria, extensivo também à Dona Laudénice pela atenção que dedicaram em todos os momentos.

Aos colegas da CPRM, Engenheiros: José Carlos Silva, Flávio Moreira, Adriano Santos, Douglas Luna e Cristiane Melo pelo apoio e incentivo. Aos geólogos Waldir Duarte Filho, Sérgio Guerra, Roberto Batista, Cláudio Scheid e Pedro Pfaltzgraff pelas colaborações técnicas. Às técnicas: Etna Pinheiro e Fabiane Albino pelos serviços de informática prestados e o Almir da copiadora.

Ao Departamento de Hidrologia da CPRM representado pelo Eng<sup>o</sup> Cláudio Peixinho, pela compreensão das dificuldades e apoio à capacitação e ao Eng<sup>o</sup> Valdemar Guimarães da ANA pela disponibilização de algumas literaturas aqui utilizadas.

Às meteorologistas do ITEP: Francis Lacerda, Werônica, Aparecida, Ana Mônica, Ioneide e Adriani, pelas informações concedidas e ao Eng<sup>o</sup> Robson de Carlo pelos trabalhos cartográficos.

À todas as instituições que contribuíram direta e indiretamente com as informações que deram suporte ao desenvolvimento deste trabalho, como: ANA, SUDENE, SECTMA, COMPESA, CHESF, IPA, INFRAERO e outras.

E, finalmente, aos professores Geber Moura e Abelardo Montenegro da UFRPE por terem aceitado integrar-se à banca examinadora e a todos que compuseram a platéia.

## RESUMO

A análise do comportamento da precipitação em uma bacia hidrográfica é fundamental para a engenharia e o gerenciamento dos recursos hídricos. Por ser uma variável aleatória com estrutura de correlação espacial, a geoestatística é indicada para análise da variabilidade espacial. Esta análise, associada à análise da variabilidade temporal e ao conhecimento dos padrões de precipitação, tornam-se instrumentos importantes para avaliação da eficiência de redes pluviométricas. Este trabalho apresenta uma avaliação de rede pluviométrica e análise da variabilidade espacial da precipitação, na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. Para isto, utilizou-se a geoestatística e outros métodos determinísticos usualmente empregados na determinação das densidades, números de pluviômetros, interpolação de variáveis e estimativa de precipitação anual média. Nesse sentido, foram utilizados as *recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), a precisão desejada segundo os objetivos principais, os polígonos de Thiessen e o inverso do quadrado da distância*. A precipitação anual média e o coeficiente de irregularidade foram analisados utilizando o *inverso do quadrado da distância* e as técnicas geoestatísticas de *krigagem ordinária* e *Co-krigagem*. A partir de um diagnóstico realizado na bacia, foi possível identificar uma rede pluviométrica adequada à aplicação de todos estes métodos. O arcabouço metodológico utilizado reforçou os conhecimentos atuais sobre precipitação na bacia. As duas variáveis apresentaram forte estrutura de correlação espacial, ressaltando a necessidade de tratá-las como variáveis regionalizadas. Dentre os métodos utilizados, os geoestatísticos mostraram-se mais adequados, embora não houvesse vantagem na utilização da *Co-krigagem* na área em estudo, quando comparado com a *krigagem ordinária*. As metodologias geoestatísticas, além de permitirem a avaliação da precipitação anual média e de realizar interpolações em pontos não amostrados, com o menor erro de estimativa, permitem quantificar esses erros. Dessa forma, em uma análise posterior para reestruturação da rede pluviométrica pode-se utilizar esse elemento, além de outros, como indicador para locação, reativação e desativação de estações.

## ABSTRACT

The analysis of the rainfall behavior in a watershed is of fundamental importance for the planning and management of water resources. As a random variable with spatial correlation structure, the use of geostatistics is indicated for the analyses of spatial variability of precipitation. These analyses, associated to the temporal variability analysis and to the knowledge of rainfall patterns, are important instruments for evaluation of the efficiency of a pluviometric network. This work presents an evaluation of the pluviometric network and the analysis of the spatial variability of precipitation in the Ipojuca's River Basin, Pernambuco State, Brazil. Geostatistics was used, along with other methods employed in the determination of the densities of pluviometers, interpolation of variables and aerial average estimates. In this sense, the following methods were used: the recommendations of the World Meteorological Organization (WMO), the method of the desired precision according to the main objectives, the polygons of Thiessen and the inverse of the square of the distance. For the aforementioned techniques and Geostatistics, the medium annual rainfall rate and the coefficient of irregularity were analyzed, using both Ordinary Kriging and Co-kriging. Starting from a diagnosis accomplished in the basin, it was possible to identify an appropriate rainfall network, adequate to the application of all these methods. The applied methodology reinforced the current knowledge about rainfall patterns in the watershed. The two variables presented strong spatial correlation structure, pointing out the need of treating them as regional variables. Among the used methods, Geostatistics proved to be more appropriate, although Co-kriging wasn't that successful. The geostatistics methodologies, besides allowing the evaluation of the rainfall annual rate and accomplishing interpolations in non-measured points in space, with the minimum estimate errors, allow to quantifying these errors. In that way, in a subsequent analysis for restructuring the rainfall network, this element can be used, as well as other ones, as an indicator for locating new and suggesting reactivation and desactivation of stations.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>	<b>01</b>
<b>I.1 – Introdução.....</b>	<b>02</b>
<b>I.2 – Objetivo geral.....</b>	<b>04</b>
<b>I.3 – Objetivos específicos.....</b>	<b>04</b>
<b>CAPÍTULO II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>05</b>
<b>II. 1 – A importância e a situação das águas.....</b>	<b>06</b>
<b>II. 2 – Gestão dos recursos hídricos.....</b>	<b>09</b>
<b>II. 3 – Planos de recursos hídricos.....</b>	<b>10</b>
<b>II. 4 – Climatologia.....</b>	<b>13</b>
<b>II. 5 – Sistemas meteorológicos.....</b>	<b>14</b>
<b>II. 6 – Pluviometria.....</b>	<b>15</b>
<b>II. 7 – Estações pluviométricas.....</b>	<b>16</b>
<b>II. 8 – Redes de monitoramento pluviométrico.....</b>	<b>17</b>
<b>II. 9 – Planejamento e avaliação das redes pluviométricas.....</b>	<b>18</b>
<b>II. 10 – Histórico pluviométrico em Pernambuco.....</b>	<b>20</b>
<b>II. 11 – A Rede Hidrometeorológica Nacional.....</b>	<b>22</b>
<b>II. 12 – As Recomendações da Organização Mundial de Meteorologia.....</b>	<b>23</b>
<b>II. 13 – O método de Thiessen.....</b>	<b>24</b>
<b>II. 14 – O Critério da precisão desejada segundo os objetivos principais.....</b>	<b>25</b>
<b>II. 15 – O Critério das características meteorológicas dominantes de uma região.....</b>	<b>25</b>
<b>II. 16 – O Método do Inverso do quadrado da distância.....</b>	<b>26</b>
<b>II. 17 – Noções de Geoestatística.....</b>	<b>27</b>
<b>II. 18 – O Método Kriging.....</b>	<b>32</b>
<b>II. 19 – O Método Co-kriging.....</b>	<b>33</b>
<b>II. 20 – Revisão da literatura.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO III – ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
<b>III 1 – Características gerais da Bacia do Rio Ipojuca.....</b>	<b>44</b>
<b>III. 1.1 – Localização e divisões especiais.....</b>	<b>44</b>
<b>III. 1.2 – Aspectos econômicos e sociais.....</b>	<b>46</b>
<b>III. 1.3 – Caracterizações climáticas e meteorológicas.....</b>	<b>49</b>
<b>III. 1.4 – Uso do solo e vegetação.....</b>	<b>52</b>

<b>III. 1.5 – Hidrografia e relevo.....</b>	<b>53</b>
<b>CAPÍTULO IV – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
<b>IV. 1 – Definição de uma rede pluviométrica específica na Bacia do Ipojuca.....</b>	<b>56</b>
<b>IV. 1.1 – Diagnóstico pluviométrico.....</b>	<b>56</b>
<b>IV. 1.2 – Escolha da instituição operadora.....</b>	<b>61</b>
<b>IV. 1.3 – Seleção das estações e formação do banco de dados.....</b>	<b>62</b>
<b>IV. 1.4 – Configuração da rede específica.....</b>	<b>63</b>
<b>IV. 1.5 – Determinação dos parâmetros estatísticos e análise de frequências.....</b>	<b>65</b>
<b>IV. 1.6 – Determinação dos coeficientes de variação espacial e temporal.....</b>	<b>68</b>
<b>IV. 2 – Metodologias mais utilizadas para avaliação de redes pluviométricas e análise da variabilidade espacial da precipitação.....</b>	<b>69</b>
<b>IV. 2.1 – Recomendações da Organização Mundial de Meteorologia.....</b>	<b>69</b>
<b>IV. 2.2 – Critério da precisão desejada segundo os objetivos principais.....</b>	<b>72</b>
<b>IV. 2.3 – Método dos polígonos de Thiessen.....</b>	<b>72</b>
<b>IV. 2.4 – Método do Inverso do quadrado da distância.....</b>	<b>73</b>
<b>IV. 2.5 – Métodos geoestatísticos.....</b>	<b>75</b>
<b>IV. 2.5.1 – Método Kriging.....</b>	<b>79</b>
<b>IV. 2.5.2 – Método Co-kriging.....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>V. 1 – Avaliação da eficácia da rede pluviométrica específica.....</b>	<b>82</b>
<b>V. 1.1 – Densidades pluviométricas segundo as recomendações da OMM.....</b>	<b>82</b>
<b>V. 1.2 – Número de pluviômetros segundo a precisão desejada.....</b>	<b>85</b>
<b>V. 2 – Análise da variabilidade espacial, estimativa e padrões da precipitação anual média.</b>	<b>85</b>
<b>V. 2.1 – O método dos polígonos de Thiessen.....</b>	<b>85</b>
<b>V. 2.2 – O método do Inverso do quadrado da distância.....</b>	<b>87</b>
<b>V. 2.2.1 – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média.....</b>	<b>87</b>
<b>V. 2.2.2 – Estimativa da precipitação anual média na bacia.....</b>	<b>89</b>
<b>V. 2.2.3 – Análise dos padrões de precipitação.....</b>	<b>89</b>
<b>V. 2.3 – Krigagem.....</b>	<b>90</b>
<b>V. 2.3.1 – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média.....</b>	<b>91</b>
<b>V. 2.3.2 – Estimativa da precipitação anual média na bacia.....</b>	<b>94</b>
<b>V. 2.3.3 – Análise da variabilidade espacial da precipitação.....</b>	<b>94</b>
<b>V. 2.3.4 – Análise dos padrões de precipitação.....</b>	<b>98</b>

<b>V. 2.4</b> – Co-krigagem.....	100
<b>V. 2.4.1</b> – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média.....	101
<b>V. 2.4.2</b> – Discussões sobre a aplicação do método co-kriging na Bacia do Ipojuca.....	104
<b>CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>VI. 1</b> – Conclusões.....	106
<b>VI. 2</b> – Recomendações.....	107
<b>CAPÍTULO VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>
<b>VII. 1</b> – Referências bibliográficas.....	109
<b>CAPÍTULO VIII – ANEXOS.....</b>	<b>115</b>
<b>VIII. 1</b> – Coeficientes de variação espacial e temporal.....	116
<b>VIII. 2</b> – Relatórios finais do <i>ArcGIS</i> .....	118
<b>VIII. 3</b> – Mapa Rodoviário, Municipal e Hidrográfico.....	123
<b>VIII. 4</b> – Mapa Hipsométrico.....	124

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura II. 1</b> – Distribuição das vazões específicas para cada região brasileira.....	08
<b>Figura II. 2</b> – Modelo semivariográfico típico.....	30
<b>Figura II. 3</b> – Comportamento do semivariograma no efeito pepita puro.....	30
<b>Figura III. 1</b> – Localização da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca.....	45
<b>Figura III. 2</b> – Divisão Hidrográfica de Pernambuco em Unidades de Planejamento Hídrico.....	47
<b>Figura III. 3</b> – Polígono das secas na Região Nordeste.....	50
<b>Figura III. 4</b> – Repartição das precipitações anuais médias na Bacia do Ipojuca.....	51
<b>Figura III. 5</b> – Mapa da localização de registros pluviométricos na Bacia do Rio Ipojuca..	52
<b>Figura III. 6</b> – Perfil longitudinal do Rio Ipojuca.....	54
<b>Figura IV. 1</b> – Estação pluviométrica com pluviômetro convencional, sem cercado, operado pela SECTMA em 2003, no município de Sanharó.....	59
<b>Figura IV. 2</b> – Estação meteorológica com pluviômetro telemétrico (PCD), operado pela SECTMA em 2003, no município de Caruaru.....	59
<b>Figura IV. 3</b> – Estação pluviométrica com pluviômetro convencional, com cercado, operado pela CPRM em 2003, no município de Poção.....	9
<b>Figura IV. 4</b> – Rede pluviométrica operada na Bacia do Ipojuca em 2004.....	60
<b>Figura IV. 5</b> - Rede pluviométrica específica.....	63
<b>Figura IV. 6</b> – Períodos de observação hidrológica da rede específica.....	64
<b>Figura IV. 7</b> – Gráfico das precipitações máximas, médias e mínimas das séries anuais médias em cada estação.....	65
<b>Figura IV. 8</b> – Distribuição normal das precipitações anuais médias.....	67
<b>Figura IV. 9</b> – Distribuição log-normal das precipitações anuais médias.....	67
<b>Figura IV. 10</b> – Distribuição normal dos coeficientes de irregularidade.....	67
<b>Figura IV. 11</b> – Distribuição log-normal dos coeficientes de irregularidade.....	67
<b>Figura IV. 12</b> – Distribuição normal das altitudes.....	68
<b>Figura IV. 13</b> – Distribuição log-normal das altitudes.....	68
<b>Figura IV. 14</b> – Divisão da Bacia do Ipojuca segundo a divisão do polígono das secas.....	70
<b>Figura IV. 15</b> – Estimativa de um ponto no <i>ArcGIS</i> segundo o Inverso do quadrado da distância.....	74
<b>Figura IV. 16</b> – Malha de pontos para estimativa da precipitação anual média com o Inverso do quadrado da distância.....	75
<b>Figura IV. 17</b> – Transformação estatística e remoção de tendência no <i>ArcGIS</i> .....	76

<b>Figura IV. 18</b> – Estimativa de pontos no <i>ArcGIS</i> utilizando a anisotropia.....	77
<b>Figura IV. 19</b> – Comportamento espacial das variáveis.....	77
<b>Figura V. 1</b> – Densidades relativas da rede pluviométrica nas partes Leste e Oeste.....	84
<b>Figura V. 2</b> – Polígonos de Thiessen da rede específica na Bacia do Ipojuca.....	86
<b>Figura V. 3</b> – Regressão linear dos valores medidos e estimados para as precipitações anuais médias com o Inverso do quadrado da distância.....	88
<b>Figura V. 4</b> – Mapa das precipitações anuais médias com Inverso do quadrado da distância.....	88
<b>Figura V. 5</b> – Regressão linear dos valores medidos e estimados para os coeficientes de irregularidade com o Inverso do quadrado da distância.....	90
<b>Figura V. 6</b> – Mapa dos coeficientes de irregularidade com Inverso do quadrado da distância.....	90
<b>Figura V. 7</b> – Semivariograma esférico ajustado para precipitação anual média com Kriging.....	91
<b>Figura V. 8</b> – Regressão linear dos valores medidos e estimados para a precipitação anual média com Kriging.....	92
<b>Figura V. 9</b> – Erros normalizados e valores normais na precipitação anual média com Kriging.....	92
<b>Figura V. 10</b> – Mapa da precipitação anual média com Kriging.....	93
<b>Figura V. 11</b> – Mapa das estimativas de erros da precipitação anual média com Kriging.....	93
<b>Figura V. 12</b> – Mapa da precipitação anual média no ano de média variabilidade espacial com Kriging.....	95
<b>Figura V. 13</b> – Mapa da precipitação anual média no ano de maior variabilidade espacial com Kriging.....	95
<b>Figura V. 14</b> – Mapa da precipitação anual média no ano de menor variabilidade espacial com Kriging.....	97
<b>Figura V. 15</b> Semivariograma esférico ajustado para os coeficientes de irregularidade com kriging.....	98
<b>Figura V. 16</b> – Regressão linear dos valores medidos e estimados para os coeficientes de irregularidade com Kriging.....	99
<b>Figura V. 17</b> – Erros normalizados e valores normais nos coeficientes de irregularidade com Kriging.....	99
<b>Figura V. 18</b> – Mapa dos coeficientes de irregularidade com Kriging.....	100

<b>Figura V. 19</b> – Mapa das estimativas de erros dos coeficientes de irregularidade com Kriging.....	100
<b>Figura V. 20</b> – Ajuste do semivariograma gaussiano na precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	101
<b>Figura V. 21</b> – Regressão linear dos valores medidos e estimados para a precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	102
<b>Figura V. 22</b> – Erros normalizados e valores normais para a precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	102
<b>Figura V. 23</b> – Mapa da precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	103
<b>Figura V. 24</b> – Mapa das estimativas de erros da precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	103
<b>Figura V. 25</b> – Comparação de tendências entre a precipitação anual média e a altitude na Bacia do Ipojuca.....	104
<b>Figura VIII. 1</b> – Relatório final das precipitações anuais médias com o inverso do quadrado da distância.....	118
<b>Figura VIII. 2</b> – Relatório final dos coeficientes de irregularidade com o inverso do quadrado da distância.....	118
<b>Figura VIII. 3</b> – Relatório final das precipitações anuais médias com kriging.....	119
<b>Figura VIII. 4</b> – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de média variabilidade espacial com kriging.....	119
<b>Figura VIII. 5</b> – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de máxima variabilidade espacial com kriging.....	120
<b>Figura VIII. 6</b> – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de mínima variabilidade espacial com kriging.....	120
<b>Figura VIII. 7</b> – Relatório final dos coeficientes de irregularidade com kriging.....	121
<b>Figura VIII. 8</b> – Relatório final das precipitações anuais médias com co-kriging.....	122

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela II. 1</b> – Órgãos operadores de redes pluviométricas no Estado de Pernambuco em 2003.....	22
<b>Tabela II. 2</b> – Modelo original para densidades mínimas das redes pluviométricas (WMO, 1984).....	23
<b>Tabela II. 3</b> – Modelo revisado para densidades mínimas das redes pluviométricas (WMO, 1994).....	23
<b>Tabela III. 1</b> – Áreas dos municípios da Bacia do Ipojuca.....	44
<b>Tabela III. 2</b> – Índice de Desenvolvimento Humano dos municípios da Bacia do Rio Ipojuca.....	46
<b>Tabela III. 3</b> – Vegetação e uso do solo.....	53
<b>Tabela IV. 1</b> – Estações pluviométricas operadas na Bacia do Rio Ipojuca no ano de 2004.....	60
<b>Tabela IV. 2</b> – Banco de dados hidrológicos.....	63
<b>Tabela IV. 3</b> – Estatísticas obtidas na Distribuição normal e log-normal das variáveis.....	66
<b>Tabela IV. 4</b> – Determinação das áreas das partes Leste e Oeste.....	70
<b>Tabela IV. 5</b> – Determinação das populações das partes Leste e Oeste.....	71
<b>Tabela IV. 6</b> – Determinação das densidades demográficas das partes Leste e Oeste.....	71
<b>Tabela IV. 7</b> – Precipitação anual média e áreas de influência segundo Thiessen.....	73
<b>Tabela IV. 8</b> – Determinação do semivariograma teórico através da validação cruzada.....	78
<b>Tabela V. 1</b> – Quantidades de pluviômetros e densidades pluviométricas das partes Leste e Oeste.....	83
<b>Tabela V. 2</b> – Determinação do número de pluviômetros segundo a precisão desejada....	85
<b>Tabela V. 3</b> – Identificação das estações nos polígonos de Thiessen na Bacia do Ipojuca.....	86
<b>Tabela V. 4</b> – Relatório dos parâmetros para as precipitações anuais médias com o Inverso do quadrado da distância.....	88
<b>Tabela V. 5</b> – Relatório dos parâmetros para os coeficientes de irregularidade com o Inverso do quadrado da distância.....	89
<b>Tabela V. 6</b> – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média com Kriging.....	92

<b>Tabela V. 7</b> – Comparação de métodos no cálculo da precipitação anual média.....	94
<b>Tabela V. 8</b> – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de média variabilidade espacial com kriging.....	95
<b>Tabela V. 9</b> – Relatórios de parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de máxima variabilidade espacial com Kriging.....	96
<b>Tabela V. 10</b> – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de mínima variabilidade espacial com Kriging.....	97
<b>Tabela V. 11</b> – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para os coeficientes de irregularidade com Kriging.....	99
<b>Tabela V. 12</b> – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média e altitude com Co-kriging.....	102
<b>Tabela VIII. 1</b> – Coeficientes de variação espacial e temporal.....	116

## LISTA DE SIGLAS

<b>ANA</b>	- Agencia Nacional de Águas;
<b>ANEEL</b>	- Agencia Nacional de Energia Elétrica;
<b>CERH - PE</b>	- Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco;
<b>CHESF</b>	- Companhia Hidrelétrica do São Francisco;
<b>CODECIPE</b>	- Companhia de Defesa Civil de Pernambuco;
<b>COMPESA</b>	- Companhia Pernambucana de Saneamento;
<b>CPATSA</b>	- Centro de Pesquisa Agronômica do Trópico Semi-Árido;
<b>CPTEC</b>	- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos;
<b>CPRM / SGB</b>	- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil;
<b>DAEE</b>	- Departamento de Água e Energia Elétrica de São Paulo;
<b>DNAEE</b>	- Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica;
<b>DNOCS</b>	- Departamento Nacional de Obras Contra a Seca;
<b>EBAPE</b>	- Empresa de Abastecimento e Extensão Rural do Estado de Pernambuco;
<b>EMATER</b>	- Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Pernambuco;
<b>EMBRAPA</b>	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
<b>ESRI</b>	- Environmental Systems Research Institute;
<b>GIS</b>	-Geography Information System;
<b>GPS</b>	- Global Positioning System;
<b>IBGE</b>	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
<b>INFRAERO</b>	- Empresa de Infraestrutura Aeroportuária;
<b>INMET</b>	- Instituto Nacional de Meteorologia;
<b>INPE</b>	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais;
<b>IPA</b>	- Instituto de Pesquisa Agropecuária;
<b>IPEA</b>	- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada;
<b>ITEP</b>	- Instituto de Tecnologia de Pernambuco;
<b>LAMEPE</b>	- Laboratório de Meteorologia de Pernambuco;
<b>MMA</b>	- Ministério do Meio Ambiente e Amazônia Legal;
<b>MME</b>	- Ministério de Minas e Energia;
<b>OMM</b>	- Organização Mundial de Meteorologia;
<b>PCD</b>	- Plataforma de Coleta de Dados;
<b>PDRH</b>	- Plano Diretor de Recursos Hídricos;
<b>PERH – PE</b>	- Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco;

<b>PIB</b>	- Produto Interno Bruto;
<b>PMPE</b>	- Polícia Militar de Pernambuco;
<b>PNUD</b>	- Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento;
<b>PROHD</b>	- Programa de Homogeneização de Dados;
<b>RMR</b>	- Região Metropolitana do Recife;
<b>SECTMA</b>	- Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente;
<b>SIRH – PE</b>	- Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco;
<b>SNIRH</b>	- Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos;
<b>SIG</b>	- Sistema de Informação Geográfica;
<b>SRH - PE</b>	- Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco;
<b>SUDENE</b>	- Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste;
<b>WMO</b>	- World Meteorological Organization
<b>UNESCO</b>	- Organização Cultural, Científica e Educacional das Nações Unidas;
<b>UTM</b>	- Universal Transversa de Mercator;

*CAPÍTULO I*

*CONSIDERAÇÕES INICIAIS*

## I.1 – Introdução

A necessidade de melhor gerenciar os recursos hídricos decorre da preocupação que atualmente assola a humanidade quanto aos seus limites de aproveitamento. O conhecimento da precipitação durante o ano é o fator determinante para estimar, entre outros, a necessidade de irrigação de culturas e o abastecimento de água doméstico e industrial afirmam (BERTONI & TUCCI, 1993). Sendo assim, o conhecimento das precipitações, indiscutivelmente, assume um requisito fundamental ao desenvolvimento socioeconômico de uma região ou uma bacia hidrográfica. A estimativa dos seus valores mais prováveis, a identificação das áreas de ocorrências e a regularidade com que as mesmas se distribuem, constituem informações imprescindíveis ao planejamento hídrico.

Diante deste cenário, aumenta também a necessidade de melhoramento da eficiência das redes pluviométricas, impondo-lhes uma condição cada vez mais importante na geração de dados pluviométricos, de boa qualidade e quantidade adequada às análises diversas. O estudo detalhado da variabilidade temporal e espacial das precipitações passa a ser o segmento que conduzirá sempre à configuração ótima das redes pluviométricas. Entretanto, GOMES & SILANS (2000) afirmaram que pouca atenção foi dada à técnica de avaliação da variação espacial da precipitação, já que desde os trabalhos de THIESSEN (1911), esta técnica é efetuada de modo corriqueiro utilizando os chamados *Polígonos de Thiessen*.

Os primeiros estudos que trataram da variabilidade espacial dos fenômenos naturais, praticamente tiveram seus inícios no começo do século passado, cuja área de interesse se concentrou nas pesquisas voltadas à variabilidade de atributos dos solos, que por sua vez viriam a otimizar as práticas agrícolas.

Os conceitos da Estatística Clássica sempre se mantiveram presentes no estudo da distribuição espacial. Entretanto, VIEIRA (2000) afirmou que a sua supremacia foi questionada na África do Sul pelo engenheiro KRIGE (1951), dando origem ao *Método geoestatístico de krigagem*, através das experiências voltadas, desta vez, para concentração de minérios, as quais identificaram as dependências entre as coleções de dados espacializados, contradizendo alguns fundamentos desta Estatística. Afirmou ainda que MATHERON (1963), baseado nos trabalhos deste engenheiro, desenvolveu na França a *Teoria das variáveis regionalizadas*, a qual viria consolidar a Geoestatística como uma ciência, sendo DELHOMME (1976) o pioneiro na aplicação em Hidrologia.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) estabeleceu regras gerais para o dimensionamento das redes hidrológicas, publicando as *Recomendações para densidades mínimas* desde 1965 até hoje bastante utilizadas, segundo suas atualizações e reedições, caracterizadas pela facilidade de aplicação. A mesma organização também publicou outras *Técnicas específicas usadas*

para projeto de redes (WMO nº 580, 1982). Porém, praticamente não se verificaram muitas evidências de suas aplicações no decorrer dos tempos. É possível também destacar, entre outros critérios divulgados pela Universidade de Laval (LLAMAS, 1993): a *Precisão desejada segundo os objetivos principais*, as *Características meteorológicas dominantes em uma região* e a *Experiência internacional*, este último envolvendo os estudos de W. B. LANGBEIN, publicados pela WMO nº 15 (1965) segundo (LLAMAS, 1993). Todos indicados para o planejamento das redes pluviométricas, embora as pesquisas comprovem suas maiores utilizações sob forma de citações do que propriamente as aplicações.

Diante dos recursos apropriados, é possível afirmar que a Geoestatística, mesmo dispondo de interpoladores mais precisos, praticamente tem sua aplicabilidade ainda bastante restrita, ou seja, limitando-se, quase que totalmente às pesquisas de caráter acadêmicos e sem fins exequíveis. As *Recomendações da OMM para densidades mínimas* ainda são os instrumentos usados para avaliação das redes hidrológicas embora se reconheçam as suas relativas imprecisões. No entanto, o uso da geoestatística para avaliação de redes hidrológicas tende a despertar sua importância e adequabilidade para o planejamento dessas redes.

Mesmo reconhecendo a importância dos métodos geoestatísticos, as suas aplicações requerem uma grande extensão de cálculos, associados a um certo grau de complexidade. Vale salientar que tais obstáculos vêm sendo cada vez mais simplificados devido ao grande avanço da informática, dispondo cada vez mais de *softwares* específicos no mercado. Outro complicador que se pode verificar é a exigência das séries temporais históricas, que nem sempre são disponíveis ou encontram-se com poucas condições de trabalhabilidade. Este fato pode ser atribuído ao desinteresse de alguns Governos quanto à perseverança nos programas de hidrologia. Estas dificuldades podem justificar um estímulo à utilização corrente das *Recomendações da OMM*.

É preciso conscientizar-se que os métodos e critérios tradicionais, apesar do reconhecimento às grandes contribuições científicas que continuam conduzindo às pesquisas, devem moderadamente ser complementados ou substituídos por ferramentas de maiores acurácias, como a *Krigagem* e a *Co-krigagem*, ou outros métodos geoestatísticos, a fim de que o bom rendimento das redes pluviométricas e os resultados dos estudos da variabilidade espacial sejam mais eficazes, mesmo admitindo a insuficiência de informações hidrológicas adequadamente disponíveis.

Este trabalho vem oportunizar uma discussão sobre os métodos e critérios que vem sendo mais utilizados nas avaliações das redes pluviométricas e nas análises da variabilidade espacial das precipitações. A Bacia do Rio Ipojuca foi escolhida como área para este estudo, uma vez reconhecida a importância que a mesma representa no contexto socioeconômico do Estado de Pernambuco.

**I.2 – Objetivo geral**

Avaliar rede pluviométrica e analisar a variabilidade espacial da precipitação em bacias hidrográficas através da aplicação de diferentes ferramentas.

**I.3 – Objetivos específicos**

- Avaliar a rede pluviométrica da Bacia do Rio Ipojuca promovendo diagnóstico de sua adequabilidade;
- Analisar a variabilidade espacial da precipitação anual média e do coeficiente de irregularidade meteorológica na Bacia do Rio Ipojuca;
- Fornecer subsídios para proposta de reestruturação da rede pluviométrica da Bacia do Rio Ipojuca.

*CAPÍTULO II*

***FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO  
DA LITERATURA***

## II. 1 – A importância e a situação das águas

A água é a fonte de manutenção da vida de todos os seres que habitam a biosfera do nosso planeta. Considerada um mineral inorgânico, formado de oxigênio e hidrogênio, está sempre presente nas reações bioquímicas essenciais à existência de todas as espécies, inclusive o Homem, constituído por cerca de 70% desse mineral, o qual desempenha funções fisiológicas fundamentais.

As moléculas da água participam ativamente das reações fotossintéticas dos vegetais, resultando na produção de oxigênio e matéria orgânica, iniciando assim a cadeia alimentar, onde o Homem igualmente aos demais seres vivos, retira os recursos indispensáveis à sua sobrevivência.

A circulação natural da água no Planeta Terra ocorre em todos os estados físicos, percorrendo os ambientes atmosféricos, terrestres e subterrâneos, através de ciclos contínuos, impulsionados pela ação da energia solar associada à força gravitacional. Esse movimento recebe o nome de ciclo hidrológico.

Para quantificar os volumes armazenados em cada fase deste ciclo de forma equilibrada, a engenharia hidrológica dispõe de ferramentas empíricas e probabilísticas capazes de identificar aproximadamente esses valores, como a determinação do “balanço hídrico”. A equação do balanço hídrico pode ser aplicada de maneira global, em uma região em estudo ou nas bacias hidrográficas.

Entre os diversos usos da água, o que exige maior grau de pureza é o abastecimento humano, por isso é considerada a mais nobre das utilizações. A ingestão ou o contato direto, quando não providos de qualidades satisfatórias, pode torná-la nociva à saúde pública, podendo ocasionar graves epidemias através da veiculação hídrica.

O crescimento das atividades consideradas de alta demanda de água, como as atividades industriais, agropecuárias, produção de energia, entre outras, é devido ao aumento das populações. A expectativa para o futuro quanto à incerteza da sua disponibilidade, em volume e em qualidade, apresenta-se com alto grau de comprometimento, devido aos inadequados processos de aproveitamento deste recurso que se vem constatando, associado principalmente à disposição dos rejeitos resultantes das atividades humanas nas bacias hidrográficas, além da escassez das ofertas provocada pelo antropismo, na maioria das vezes.

FREITAS & SANTOS (2000) afirmaram que os levantamentos realizados pela Organização Mundial das Nações Unidas - OMM indicaram que um terço da população mundial vive em regiões de moderado a alto estresse hídrico, e que as estatísticas demonstraram claramente que nos próximos 30 anos a situação global das reservas tenderá consideravelmente a piorar, caso não ocorram ações emergenciais para melhoria da oferta em relação à demanda d'água.

Embora as fontes hídricas possam ser consideradas abundantes, freqüentemente apresentam uma distribuição desuniforme na superfície da Terra. Em alguns lugares, as retiradas são bastante

elevadas em comparação à oferta, justificando assim uma substancial redução das disponibilidades superficiais e um decréscimo das reservas subterrâneas.

A ocupação inadequada do solo nas bacias hidrográficas e a má utilização desse bem no ambiente natural, em conjunto com outros fatores ligados à urbanização e industrialização, vem provocando alterações climáticas, afetando diretamente o balanço hídrico, com repercussão em ocorrências de secas e inundações inesperadas, seguidas de prejuízos às populações e aos governos em várias escalas econômicas e sociais. A primeira torna-se castigante por se estender em longos períodos de estiagens, enquanto a segunda, a abundância súbita impossibilita em alguns casos a capacidade de prevenção, resultando em graves sinistros.

O aquecimento causado pelo efeito estufa também influencia a circulação da água na terra, aumentando a temperatura e conseqüentemente a evaporação, que, junto a outros fatores, pode aumentar a precipitação em umas regiões e diminuir em outras. Além disso, a variabilidade interanual da precipitação vem sendo afetada freqüentemente pelos fenômenos do *El Niño e La Niña*.

As atividades antrópicas exercidas ao longo do tempo sobre o meio ambiente, na utilização dos recursos hídricos disponíveis, desenvolveram-se sob a consideração de que estes recursos teriam uma capacidade de regeneração ilimitada e sua quantidade seria inesgotável. Isto decorreu em um quadro de escassez de água e degradação do meio ambiente. Apesar das vigentes legislações que tratam das questões relacionadas à preservação do meio ambiente, a fiscalização por parte dos órgãos competentes ainda não corresponde ao sucesso desejável.

O crescimento demográfico e a irregularidade na distribuição espacial das concentrações populacionais podem ser considerados alguns dos maiores obstáculos para o gerenciamento dos recursos hídricos, no que diz respeito ao atendimento aos volumes demandados, seguidos da respectiva redução da capacidade qualitativa para aproveitamento dos corpos d'água, conseqüentemente avariados. Os locais das concentrações populacionais, onde geralmente se constata maiores demandas em relação às ofertas, nem sempre coincidem com os locais das disponibilidades hídricas.

A escassez e a má qualidade das águas para suas devidas utilizações exigem dos Governos mais atenção e investimentos na área de pesquisa, visando a aplicação de novas alternativas acompanhadas de tecnologias mais avançadas. Práticas como recuperação dos mananciais hídricos, racionalização do consumo e redução dos desperdícios, inclusive o estímulo à educação ambiental, são metas imprescindíveis a serem estabelecidas de forma a garantir a perpetuação do recurso para o futuro. A intensificação da aplicação dos instrumentos das leis que protegem os recursos hídricos consiste também em caminho auspicioso para reversão do quadro.

MAIA NETO (1997) afirma que no terceiro milênio as maiores imposições das sociedades aos governos em busca de melhores qualidades de vida poderão acontecer em decorrência da possível escassez do alimento, emprego e água, se não forem adotadas medidas estratégicas com visão de futuro, reduzindo os desperdícios, recuperando a qualidade dos mananciais hídricos, racionalizando o consumo e avançando em tecnologia racional de exploração hídrica.

Os conflitos provenientes das disputas pelos usos das águas já começam a acontecer em todas as partes, e o desafio torna imprescindível às tomadas de decisões com base na gestão dos recursos hídricos, começando por otimizar a coleta dos dados hidrológicos através das redes de monitoramento, para assim assegurar informações suficientes para os estudos e projetos que visem melhorar e disciplinar o aproveitamento desse recurso.

O Brasil pode ser considerado um país privilegiado por ocupar uma área detentora de 12 a 15% do total do volume de água doce e líquida que circula na terra. Cerca de 58.000 km<sup>3</sup> em armazenamento subterrâneo e 257.790 m<sup>3</sup>/s escoando na superfície. A principal desvantagem decorre da sua exuberância territorial, associada à grande diversidade climática constatada em suas cinco regiões geográficas, onde as precipitações ocorrem diferentemente. Isso significa que esse vasto potencial hídrico encontra-se distribuído de maneira desuniforme. As descargas específicas superficiais para cada região brasileira estão apresentadas na Figura II.1.

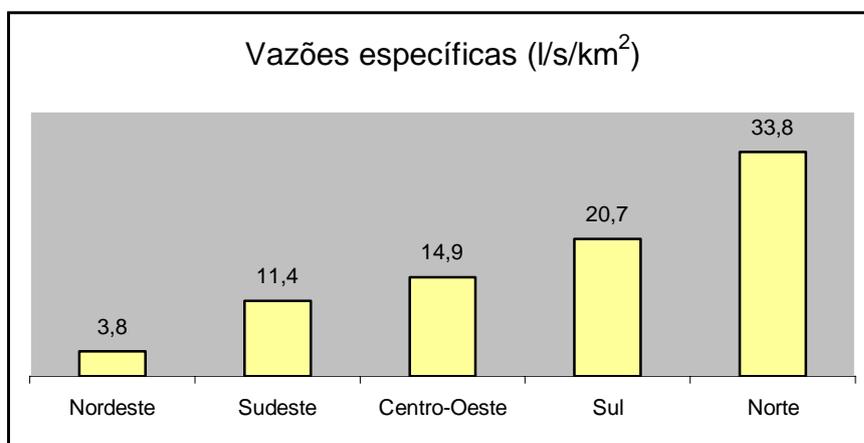


Figura II. 1 - Distribuição das vazões específicas para cada região brasileira (Maia Neto, 1997).

Na Região Norte, o Rio Amazonas é considerado o maior rio do mundo em volume d'água, onde seus altos índices pluviométricos garantem a perenização da sua malha fluvial. Já na região Nordeste, marcada pelo conhecido "polígono das secas", predomina o clima semi-árido, caracterizado pelos baixos registros pluviométricos e altos registros evaporimétricos, os quais contribuem para a manutenção da intermitência de grande parte da sua rede de drenagem.

## II. 2 – Gestões dos recursos hídricos

A necessidade de melhor gerenciar a água vem se ampliando em todos países. Segundo LANNA (1993), com o aumento da intensidade e variedade dos usos ocorrem conflitos entre usuários. As formas mais eficientes de evitar e administrar esses conflitos estão na gestão integrada do uso, controle e conservação dos recursos hídricos. Isso envolve a consideração de uma grande diversidade de objetivos (econômicos, ambientais, sociais, etc.), usos (irrigação, geração de energia, abastecimento, etc.) e alternativas. Desse quadro, o planejamento dos recursos hídricos aparece como uma atividade complexa, que envolve grande número de disciplinas e que deve ser aplicado por equipes multi e interdisciplinares.

No Brasil, o Governo Federal e os Estaduais assumiram efetivamente a prioridade desse recurso natural, assegurando o beneficiamento da sociedade, estruturando sistemas de gerenciamento que incorporassem as diretrizes para um modelo de gestão.

A Constituição brasileira de 1988 estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Em 08 de janeiro de 1997, foi aprovada a Lei Federal nº 9.433 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamentando o inciso I do artigo 21 dessa Constituição, que dá competência à União de explorar e instituir esse sistema de gerenciamento, definindo critérios de outorga de direitos de uso.

Essa Lei, que instituiu a nova política, fixou alguns atributos inovadores que lhe deram um caráter personalizado. Nos fundamentos, a água é tratada como um bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico. A gestão deve ser praticada de forma descentralizada, contando sempre com a participação do Poder Público, das comunidades e dos usuários das múltiplas utilizações das águas, tendo a bacia hidrográfica como unidade territorial, com direito à criação de comitês representativos. O direito de uso tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos e passa a ficar sujeito à cobrança, conforme seja outorgado.

Além das diretrizes gerais de ação, os Planos de Recursos Hídricos integraram os instrumentos dessa Lei. Os Planos de Recursos Hídricos são planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação de seus programas e projetos geralmente em longo prazo. Outro instrumento importante é o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH, devendo este ser alimentado a partir dos dados gerados pelos órgãos integrantes desse sistema de gerenciamento.

Reconhecida como uma política moderna e inovadora, inspirada no exemplo francês, sua implementação viabilizou a criação de uma agência, cujo objetivo seria disciplinar a utilização dos mananciais superficiais e subterrâneos, de forma a evitar a poluição e o desperdício, para assim garantir água de boa qualidade às gerações futuras. Para isso foi criada a Agência Nacional de

Águas - ANA, ligada ao Ministério do Meio Ambiente, cujo projeto de criação ocorreu em 20 de julho de 2001, através da Lei nº 9.984.

Em 17 de janeiro de 1997, mesmo ano em que se instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, o Estado de Pernambuco aprovou duas Leis Estaduais: a primeira instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos, através da Lei nº 11.426, baseada nos princípios da Lei Nacional; a segunda, Lei nº 11.427, tratou da conservação e proteção das águas subterrâneas do Estado, implantando como medida, a licença para a exploração de poços, outorga, cadastramento e fiscalização.

Para torná-las o marco inicial para instituição das políticas estabelecidas foi criada a Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco - SECTMA em 1998. Neste mesmo ano foi finalizada a elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH-PE, devidamente compatibilizado com os planos de desenvolvimento econômico e social da União e do Estado, estabelecendo assim as diretrizes e critérios gerais para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Atendendo aos princípios da Lei estadual vigente, foram criados o Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – CERH-PE e alguns Comitês de bacias hidrográficas - COBH, que gradativamente foram adquirindo suas estruturas funcionais e atribuições legais previstas, inclusive a de aprovar os Planos Diretores. A elaboração desses planos exige uma interdisciplinaridade, por conta da necessidade de se trabalhar diferentes áreas de conhecimento para o objeto em análise.

MUNIZ & RIBEIRO (2000) afirmam que na elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos, o objeto em estudo é a bacia hidrográfica, que se restringe aos espaços delimitados pelas trajetórias dos cursos d'água. Deste modo, o objeto de estudo não é a água simplesmente, mas o significado que ela passa a adquirir no conceito de suas trajetórias.

### **II. 3 – Planos de recursos hídricos**

Conforme a SECTMA (1998), o PERH-PE foi o primeiro plano na área de recursos hídricos desenvolvido no Estado de Pernambuco. Motivou-se no atendimento às exigências das novas legislações Federal e Estadual sobre águas, as quais estabeleceram a obrigatoriedade de sua elaboração.

Os estudos consideraram a formação de um cenário atual e outro futuro. Este segundo foi estabelecido dentro de hipóteses prospectivas de desenvolvimento e subdividido em dois outros tipos de cenários: o tendencial e o desejável, os quais contemplaram o uso e o controle dos recursos hídricos.

Dentre os objetivos do PERH-PE, pode-se destacar o planejamento dos recursos hídricos, com vista a garantir sua disponibilidade, proteção, conservação e o seu aproveitamento de forma racional, em benefício das gerações atual e futura, estimulando o desenvolvimento sustentado. Para isso, visou regulamentar a apropriação e o uso da água de modo a permitir a elaboração de programas orçamentários mais racionais em obras hidráulicas e em programas setoriais, como abastecimento urbano e rural, irrigação, desenvolvimento industrial, aquíicultura, etc.

O PERH-PE objetivou também uma análise de dois aspectos principais e interdependentes: a administração da oferta e a administração do uso, estabelecendo assim um balanço entre disponibilidades e demandas nas dimensões espaciais e temporais, além de investigar os locais de conflitos inerentes ao aproveitamento desse recurso.

O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos de Pernambuco - SIRH-PE elaborado para compor esse Plano utilizou como base os dados, as informações e os estudos disponíveis, complementados com novas investigações, pesquisas e estudos realizados para fins específicos deste planejamento, usando as novas técnicas de simulação hidrológica, geoprocessamento e sensoriamento remoto.

Para isso foi necessário dividir o espaço geográfico do Estado em regiões ou unidades de planejamentos (UP) para que permitissem a análise da situação atual, prever as condições futuras e, assim, antecipar as soluções que pudessem evitar ou minimizar os déficits hídricos e outros conflitos inerentes. Para essa divisão foram consideradas as bacias hidrográficas como base físico-territorial para o planejamento, resultando em 29 UP's, sendo 13 referentes às bacias principais e o restante aos grupos de pequenos rios, litorâneos e interioranos.

Para a Bacia do Rio Ipojuca também foi elaborado pela SECTMA (1999), o Plano Diretor de Recursos Hídricos - PDRH da Bacia do Ipojuca, o qual teve por objetivo o aproveitamento integrado das águas superficiais e subterrâneas dessa bacia, dentro de uma visão dinâmica de planejamento de longo prazo, e de forma a permitir uma gestão compartilhada dos múltiplos usos da água.

Atendendo à nova legislação, esse Plano diretor constituiu um instrumento básico de planejamento e visou fundamentar e orientar a implementação das Leis nº 9.433/97 e 11.426/97 que instituíram as Políticas de Recursos Hídricos no País e no Estado de Pernambuco, reproduzindo integralmente, em razão de sua importância, as ações propostas para o aproveitamento integrado, controle, preservação e gerenciamento dos recursos hídricos.

Quanto a metodologia considerou-se a Bacia do Rio Ipojuca dividida em quatro partes, cada uma denominada de Unidade de análise (UA). A divisão proporcionou uma maior precisão das

análises e dos balanços hídricos, os quais foram realizados por trecho, levando em conta a rede de drenagem, a divisão político-administrativa e as zonas fisiográficas, sendo preponderante o critério hidrológico.

Esta divisão teve também sua utilidade para agrupar representações de usuários durante os debates, para levantamento de informações e discussões de propostas da população à formulação do plano gestor de recursos hídricos. Essas Unidades consideraram em suas áreas as seguintes sedes municipais: UA 1 (Poção e Sanharó), UA 2 (Belo Jardim, Tacaimbó e São Caetano) e UA 3 (Caruaru, Bezerros, Gravatá e Chã Grande), todas situadas no Agreste da bacia, e UA 4 (Primavera, Escada e Ipojuca), com sua maior parte na Zona da Mata e a menor na faixa litorânea.

Foi realizado um diagnóstico econômico e social com base nas informações disponíveis, observações de campo e encontros participativos. A partir desse diagnóstico, foi desenvolvido um estudo prospectivo para os diversos horizontes do plano. A análise temporal compreendeu horizontes de curto, médio e longo prazo, tomando-se como referencial os anos de 2005, 2010 e 2020.

Considerou-se para a evolução da demanda do uso dos recursos hídricos a dependência de dois cenários importantes, ambos admitindo dois sub-cenários: um espontâneo chamado tendencial, que retrata uma visão pessimista, e outro, desejável, baseado em um caráter otimista.

Para esses horizontes e cenários definidos para o planejamento dos recursos hídricos foram avaliados os totais necessários para atender as demandas e foi proposto um plano de ações, visando o aproveitamento racional dos recursos hídricos da bacia, considerando a quantidade e a qualidade da água, bem como a proteção desses recursos e o meio ambiente.

O Conselho Estadual de recursos Hídricos de Pernambuco – CERH-PE homologou no Diário Oficial do Estado de Pernambuco, em 10 de outubro de 2002, a criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca de acordo com o seu estatuto social e em conformidade com a Lei estadual que estabeleceu a política de recursos hídricos no Estado. Este Comitê constitui-se um órgão colegiado que compõe o sistema integrado de recursos hídricos com atuação na referida bacia.

Satisfazendo o disposto na Lei, o CERH-PE colocou o Plano à disposição desse Comitê para aprovação. Esse comitê, uma vez constituído e submetido à assembléia, decidiu por dividir setorialmente a área da bacia em Câmaras Técnicas, representadas por núcleos de municípios, para assim analisar os estudos realizados e conseqüentemente poderem aprová-lo.

## II. 4 – Climatologia

Na meteorologia é feita uma distinção entre o tempo e o clima, considerando o tempo um estado da atmosfera em determinado momento e lugar, enquanto o clima se refere às características da atmosfera inferidas de observações contínuas durante um longo período, como por exemplo, uma normal climatológica, cujo tempo de observação é de 30 anos (INMET, 2003).

Comprovadamente o clima exerce sobre uma região significativa influência no seu desenvolvimento. As atividades humanas desempenhadas geralmente se diversificam em função das condições climáticas locais, determinando assim diferentes situações econômicas e sociais, as quais passam a refletir diretamente na qualidade de vida de suas populações. Do ponto de vista espacial ocorrem diferentes condições climáticas. Além disso, os fenômenos climáticos variam de maneira interanual e sazonal, podendo se apresentar de maneira favorável ou desfavorável em diferentes momentos ou lugares.

A precipitação pode ser entendida como a fase do ciclo hidrológico responsável pelo retorno das águas condensadas na atmosfera à superfície da terra. Comumente conhecida como chuva, tem seu início quando vapor de água presente na atmosfera condensa-se formando as nuvens, que podem se precipitar em um dado momento de condições meteorológicas favoráveis. Esse fenômeno, considerado aleatório no tempo e no espaço, provém das intervenções de fatores climáticos, característicos das regiões.

O regime hidrológico de uma região é determinado pelas suas características físicas, geológicas, topográficas e climatológicas. No clima, fatores como precipitação e evaporação assumem papel importante no balanço hidrológico, porém a temperatura, a umidade e o vento são indispensáveis para suas formações. A topografia influencia o movimento na superfície com o auxílio da gravidade e estimula a precipitação em altitudes, através da ação desses fatores climáticos inclusive a variação da pressão atmosférica. A geologia além de influenciar a topografia, define o local de armazenamento das águas provenientes da precipitação, com uma parte reservada na superfície e outra nos aquíferos.

A ascensão do ar úmido é fundamental para originar a precipitação, podendo acontecer com diferentes mecanismos. De acordo com esses mecanismos, as precipitações podem ser classificadas segundo três padrões:

- *Convectivas* - São chuvas de grandes intensidades, pequenas durações e abrangências em pequenas áreas, tornando-as sujeitas às inundações e violentas tempestades. Em Pernambuco ocorrem com mais frequências nas regiões do Agreste, Sertão e Zona da Mata com os distúrbios de leste.
- *Ciclônicas ou frontais* - São chuvas de médias intensidades, grandes durações e geralmente atingem grandes áreas, e podem provocar inundações em grandes bacias quando

acompanhadas de fortes ventos. No Litoral e Zona da Mata pernambucana podem-se verificar maiores abundâncias de suas ocorrências.

- *Orográficas* - São chuvas de pequenas intensidades e grandes durações, em pequenas áreas, localizadas próximas às elevações topográficas, que por sua vez constituem obstruções responsáveis pela antecipação de parte da precipitação, que não conseguem ultrapassá-las. Por terem forçosamente perdido grande parte da umidade durante as ultrapassagens podem caracterizar as regiões de climas mais secos no outro lado das encostas. No Estado de Pernambuco, por ser cortado pelo Planalto da Borborema esse fenômeno ocorre sistematicamente.

## II. 5 – Sistemas meteorológicos

Quanto aos sistemas meteorológicos existem pelo menos seis sistemas de circulação atmosférica que produzem chuvas e atuam na Região Nordeste e no Estado de Pernambuco. Segundo SECTMA (1998) esses sistemas atuantes podem ser classificados como:

- *Frentes Frias* - provenientes de regiões sub-antárticas que não atuam de forma sistemática sobre todo o Estado, mas em sub-regiões diferentes em dois períodos. No Sertão de Pernambuco, os principais meses de ocorrência de chuvas produzidas ou influenciadas vão de novembro a fevereiro, com máximas precipitações em dezembro, enquanto no litoral, Zona da Mata e na posição leste do Agreste, podem influenciar as precipitações nos meses de maio a agosto, com máximas precipitações em julho.
- *Ondas de Leste* - perturbações de pequena amplitude geralmente observadas nos ventos alísios que atuam no leste de Pernambuco e do Nordeste, principalmente no período de maio a agosto. O deslocamento dessas ondas se dá de leste para oeste a partir do Oceano Atlântico até atingir o litoral da região. Apesar da sua pequena amplitude podem produzir chuvas intensas e inundações e, em alguns casos, penetrar até 300 km dentro do continente.
- *Zona de Convergência Intertropical* – ZCIT – formada pela convergência dos ventos alísios do Hemisfério Norte (alísios de nordeste) e os do Hemisfério Sul (alísio de sudeste). É facilmente identificada pela presença constante de nebulosidade, a mais alta taxa de precipitação do Planeta, e atua sobre uma região qualquer por período de tempo superior a dois meses. É o principal sistema de produção de chuva no Sertão e Agreste de Pernambuco. No Sertão, caracteriza um período chuvoso que vai de dezembro a maio, com máximas precipitações durante fevereiro e março, e no Agreste, um período chuvoso de fevereiro a julho com as máximas precipitações durante abril e maio. Em anos muito chuvosos pode causar inundações principalmente na Região Metropolitana do Recife - RMR e Zona da

Mata. Por outro lado, quando não atua nos meses de março e/ou abril produz secas principalmente no semi-árido.

- *Brisas terrestres e marítimas* - ocorrem no litoral do Nordeste durante todo o ano. A convergência causada pela brisa terrestre e os alísios de oeste-sudeste, associada ao grau de instabilidades da atmosfera é muito importante para a precipitação noturna. As áreas afastadas da costa entre 100 e 300 km têm o máximo diurno associado com a brisa marítima. A brisa marítima é máxima quando existe um contraste máximo entre a temperatura da superfície do mar e a temperatura da terra, geralmente no final do outono e no início do inverno, nos meses de maio, junho e julho. Em Pernambuco, as brisas terrestre e marítima atuam no Litoral e na Zona da Mata durante todo o ano, e são mais observadas nos meses de outono e inverno, produzindo chuvas fracas e moderadas.
- *Vórtices Ciclônicos da Atmosfera Superior* - VCAS – atuam no Nordeste e em Pernambuco principalmente nos meses de novembro a fevereiro. O aparecimento desses vórtices está relacionado com a circulação geral da atmosfera e podem permanecer sem movimento aparente por vários dias até desaparecer, normalmente quando se movem para sudoeste, adentrando o continente. A sua atuação sobre o Estado de Pernambuco se dá de forma muito irregular, já que esses sistemas, na dependência de seu posicionamento, podem produzir tanto chuvas intensas como seca. A frequência desses sistemas tem uma grande dependência na variabilidade interanual da atmosfera e se tornam mais constantes em anos de ocorrência do fenômeno *El Niño*.
- *Oscilações de 30 - 60 dias* - são pulsos de energia que se movem de oeste para leste. A sua atuação no Nordeste ainda não é bem conhecida. Sabe-se apenas que esses sistemas atuam por período de 10 a 30 dias, podendo produzir precipitações prolongadas com resultados prejudiciais, como também podem beneficiar com chuvas de alguma intensidade nos anos que são considerados secos.

## II. 6 – Pluviometria

A parte da hidrologia que trata dos processos pelo qual se pode medir, ou avaliar, valores que representem, ou dêem idéia, do tamanho de um evento de precipitação em uma região ou uma bacia hidrográfica, chama-se pluviometria. O conhecimento dos totais precipitados constitui elemento importante na determinação das vazões superficiais e conseqüentemente suas disponibilidades para um perfeito gerenciamento do recurso hídrico.

As informações são localizadas e têm seus valores aferidos de várias formas através de equipamentos específicos, instalados estrategicamente, segundo algumas recomendações técnicas,

de modo que ao captarem e acumularem as precipitações possam torná-las mensuráveis. Os equipamentos podem ser de operações manuais, mecanicamente automáticas ou eletrônicas.

As informações geradas nas estações pluviométricas vêm geralmente acompanhadas de erros de leitura, transcrição e digitação, acumulação diária, defasagem nos horários de leituras, omissão de informações, entre outros. Por este motivo, faz-se necessário a depuração destes erros e o preenchimento das falhas. Depois de consistidos, os dados passam a ganhar a confiabilidade desejada para então serem disponibilizados aos usuários. Esses dados tornam-se fundamentais em estudos relacionados à gestão dos recursos hídricos, com aplicação nos setores hidroenergético, planejamento, saneamento básico, abastecimento público e industrial, irrigação e drenagem, pecuária, previsão do tempo, impacto ambiental, entre outros estudos.

## II. 7 – Estações pluviométricas

As estações pluviométricas, ou postos de medição de chuvas, são os locais escolhidos para instalação dos equipamentos de medição da precipitação. Suas localizações devem ser geograficamente fixadas obedecendo a uma certa regularidade na distribuição espacial.

As estações devem estar sempre aptas ao perfeito monitoramento hidrológico segundo manutenções periódicas, tanto nos equipamentos como nos componentes da estação. Sua função é prover dados para constituir séries históricas ininterruptas, tornando necessário que sejam satisfeitos alguns critérios que garantam tal continuidade com qualidade. O DAEE (2003) recomenda para suas instalações o seguinte:

- O pluviômetro deve ser instalado em local que permita a livre recepção de toda e qualquer precipitação, independente de sua direção ou obliquidade;
- Os obstáculos devem ficar afastados pelo menos a uma distância igual ao dobro de suas próprias alturas;
- Deve-se evitar instalá-los em terrenos fortemente inclinados, sobretudo em encostas voltadas para a direção predominante dos ventos;
- A fim de minimizar os efeitos locais das correntes aéreas, devem ser preferidas posições em que a velocidade dos ventos, ao nível do receptor, seja tão pequena quanto possível, mas sem interposição de obstáculos à sua livre recepção;
- Se no local instalado for constatado que as correntes aéreas causam grandes perturbações, recomenda-se a utilização de barreiras protetoras. Estas barreiras poderão ser de vegetação, a uma distância de 3 a 4 metros do aparelho e altura máxima de 1,50 m, que condicionarão os movimentos das correntes paralelamente ao plano da superfície receptora;

- A borda do aro receptor deve estar rigorosamente nivelada a 1,50 m do solo. O aparelho deverá ser fixado por abraçadeiras próprias a uma estaca-suporte, rigidamente fixada no solo e pintada;
- O acesso ao pluviômetro deve ser possível em qualquer época do ano;
- Deve ser feito um cercado de proteção em volta do aparelho para protegê-lo de animais e de vândalos, com altura máxima de 1,50 m;

PAIVA (2001) afirmam que a hidrologia tem sido extremamente ágil no desenvolvimento de metodologias e modelos de simulação, que de certa forma suprem a escassez de dados, permitindo que se possa planejar e executar obras de aproveitamento, mesmo que não se disponha de séries com a extensão estatisticamente representativa para caracterizar o regime hidrológico de uma determinada região. Esses modelos, embora ferramentas de valiosa eficácia, quando bem aplicados, são de pouca serventia, quando não se dispõe de dados para sua calibração e validação.

Os órgãos públicos e entidades privadas, entre outras organizações, vêm perseverando ao longo do tempo, em estudos cada vez mais aprofundados na questão de melhor aproveitar os recursos hídricos. Para isso é de fundamental importância que seja quantificada e registrada com certa precisão as alturas de chuvas precipitadas nas regiões, através de coletores pluviométricos organizados em redes, de maneira que se permita um grau elevado de confiabilidade nas informações geradas por cada estação.

## II. 8 – Redes de monitoramento pluviométrico

Uma rede pluviométrica é formada por um conjunto organizado de estações, distribuídas espacialmente segundo alguns critérios técnicos e recomendações para densidades, de maneira que a mesma opere com a maior eficiência possível. O seu objetivo é fornecer séries temporais contínuas das grandezas registradas em cada estação, garantindo uma certa precisão, e de tal forma que seja possível a interpolação dos valores prováveis dessas grandezas entre elas.

SANTOS *et al.* (2001) afirmam que a densidade e distribuição de estações em uma rede e a frequência de observação necessária dependem da variabilidade temporal e espacial das variáveis hidrológicas ou meteorológicas a serem observadas.

Conforme WMO nº 168 (1984) o objetivo de uma rede em uma região é permitir a interpolação entre os dados provenientes de estações distintas, a fim de determinar com suficiente precisão para fins práticos as características desses elementos hidrológicos em qualquer lugar da região (em quantidade suficiente para definir a distribuição estatística do elemento de estudo). Aos dados das estações de uma rede geralmente se aplica algum tipo de modelo hidrológico para fornecer a informação necessária às tomadas de decisões que envolvem fenômenos.

## II. 9 – Planejamento e avaliação das redes pluviométricas

Segundo OMM (1984) a implementação de redes hidrológicas torna-se um processo dinâmico, uma vez que os níveis de necessidade de informação mudam com o nível de desenvolvimento econômico de uma região. As redes têm como primeiro objetivo fornecer informações essenciais para o projeto geral dos recursos e para avaliar proposta de desenvolvimento futuro, quanto ao atendimento às necessidades da população e estímulo ao crescimento econômico. Nesse caso as redes deverão ser incrementadas para atender às necessidades adicionais requeridas pela região.

Para organizar formalmente uma rede geralmente constata-se a existência de algumas estações em funcionamento. Quando estas estações foram operadas durante um longo tempo e gerado séries confiáveis, conclui-se que deverão continuar operando uma vez que forneceram informações necessárias ao desenvolvimento da rede formal que se deseja. Caso alguma estação não tenha apresentado sua localização totalmente satisfatória é prudente instalar outra em suas proximidades, para assim estabelecer uma correlação entre as observações durante um período de pelo menos dez anos, podendo ser desativada no caso de insucesso. Se a correlação satisfizer, deverá considerar esse ponto antes de abandonar a antiga estação.

As estações que compõem uma rede podem ser classificadas em três categorias:

- *Estações principais ou de base* – fornecem as informações básicas para os estudos estatísticos e devem estar em funcionamento contínuo indefinidamente;
- *Estações secundárias* – fornecem dados básicos para interpolar a variabilidade espacial dos elementos hidrológicos. Deve funcionar durante um número limitado de anos ou tempo suficiente para estabelecer uma boa correlação entre elas e as estações de base.
- *Estações para fins específicos* – usadas para investigações especiais ou incremento de dados fornecidos pelas estações de base e secundárias, para um tempo de operação que atenda ao propósito do objetivo.

O desenvolvimento da rede se baseia no estabelecimento de uma rede básica mínima a qual deverá ser composta de um número de estações que seja necessário para o planejamento dos recursos hídricos de uma região. Essa rede deverá se estender de modo a atingir seus objetivos específicos, uma vez que, sendo considerada mínima não será adequada para elaboração de plano detalhado de desenvolvimento e não poderá satisfazer os numerosos requerimentos de uma região desenvolvida quanto a elaboração de projetos e gestão de recursos hídricos.

Estando a rede básica em operação, é fundamental o estabelecimento das relações regionais utilizando todos os dados gerados e disponíveis para estimar as características hidrológicas gerais que definam a distribuição estatística da precipitação, em qualquer ponto da região. Essa rede deverá ser ajustada e ampliada em função do tempo, o que permitirá estimar características

hidrológicas de áreas não observadas com um nível de precisão adequado para o objetivo pretendido.

Para uma rede básica que contenha uma baixa densidade de estações é importante que os registros sejam de boa qualidade. Em um projeto de desenvolvimento de redes, o número de estações que requeiram observações durante um longo período não deve ser excessivo, uma vez que as considerações econômicas e técnicas devem ser observadas.

A importância dos dados fornecidos pela rede certamente é função da demanda. Como muitas utilizações nem sempre são evidentes, seria oportuno questionar sua justificativa econômica, mas é necessário que se entenda que o desenvolvimento econômico e social deverá pressionar a demanda de informações.

Segundo KISHI & CENTENO (1992), o estabelecimento de redes de coleta de dados hidrometeorológicos nem sempre é resultado de um planejamento científico, mas algumas vezes se prende às limitações impostas por critérios práticos, como facilidades de instalação e operação das estações. No entanto, critérios técnicos e científicos são obedecidos sempre que possível. O planejamento de uma rede é um processo dinâmico e deve ser periodicamente reavaliado, de maneira a adaptá-lo melhor aos progressos na exploração e gerenciamento dos recursos hídricos em uma região.

TRARBACH (2004) afirmou que para o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos seria fundamental a utilização de informações hidro-climáticas fornecidas pelas redes de monitoramento, dentre as quais, as redes pluviométricas.

A rede é considerada ideal quando baseada na maximização econômica dos dados hidrológicos que são gerados, para que se tornem recursos essenciais no auxílio às tomadas de decisão, uma vez que nem sempre essas decisões podem ser adiadas para que se completem as séries estatísticas de que necessitam a elaboração dos projetos. Por esse motivo, deve-se estabelecer uma rede mínima, considerando o menor número de pontos de coleta, distribuído com base nas experiências anteriores. Isso só é possível através de avaliações periódicas das redes, as quais resultam geralmente em ampliações e modernizações dos equipamentos, com o objetivo de compatibilizar o atendimento à demanda da dinâmica do desenvolvimento econômico e o crescimento demográfico das regiões.

PAIVA (2001) esclareceram que a adequada caracterização quali-quantitativa dos recursos hídricos está diretamente ligada ao seu monitoramento. Destacaram ainda o objetivo de padronizar a forma de coleta de informações, promovendo uma uniformidade das observações, além de métodos, procedimentos e técnicas que podem ser adotadas nos projetos de redes e instrumentação de forma geral, para vários tipos de climas e propósitos. Vale salientar que tais indicações são somente a primeira fase a ser satisfeita, uma vez que estudos sobre a variabilidade espacial das variáveis

hidrometeorológicas e as condições de acesso existentes, representam informações extremamente importantes para a eficiência da coleta de informações.

De um modo geral, a concepção de densidade pode ser entendida como sendo uma ferramenta capaz de servir de investigação na avaliação de uma rede e orientação para manutenção de sua eficiência, tornando-se necessário que seja planejada e bem ajustada, para assim refletir as atuais condições sócio-econômicas e físico-climáticas das regiões.

A densidade mínima para estações hidrológicas vem sendo recomendada pela OMM, através de edições publicadas e atualizadas, para diferentes climas e zonas fisiográficas, através de um critério simples, o qual considera para classificação, as condições básicas das suas áreas inclusive a variação sazonal das chuvas. Nestas condições, são consideradas, além do clima e do comportamento pluvial, a acessibilidade, a topografia, a geologia e as condições de adaptação humana, que podem conduzir a problemas estruturais e operacionais.

A densidade populacional também interfere no projeto de uma rede. Em condições satisfatórias seria impossível começar uma operação, com uma certa quantidade de estações onde a população tem baixa densidade. Decorreria, antes de tudo, na dificuldade de encontrar observadores, além da precariedade nos acessos e meios de comunicação. Na prática, nas zonas pouco povoadas as condições climáticas são extremas, como exemplo: as regiões áridas, polares e as florestas equatoriais, para onde se recomendavam os pluviômetros totalizadores, por estes exigirem para manutenção e operação uma baixa frequência de visitas, hoje podendo ser substituídos pelas estações telemétricas, cujas informações são transmitidas por intermédio de satélites.

Por conseguinte, as áreas urbanas necessitam de uma rede com grande densidade de pluviômetros, tanto para atender o aspecto temporal como espacial das tempestades, as quais exigem maiores demandas para elaboração de projetos, gestão dos recursos hídricos e controle em tempo real dos sistemas de drenagem, entre outras aplicações da engenharia.

## **II. 10 – Históricos pluviométricos em Pernambuco**

MAKSOUUD (1961) identificou até 1958 na Grande Região Nordeste, durante períodos variáveis de tempo, 1225 postos pluviométricos em funcionamento, dos quais 149 pertenceram a Pernambuco. Alguns operaram somente por um mês ou pouco mais, outros funcionaram por alguns anos e foram extintos e, em uma terceira parte pôde-se constatar séries contínuas de muitos postos com mais de 40 anos de observações.

Essa geração de postos foi mantida no Estado de Pernambuco por diversas instituições e registrou séries históricas importantes. As quantidades de postos operados pelas instituições foram: 75 pelo DNOCS; 24 pelo Serviço de Meteorologia Nacional, 4 pela Divisão de Águas e 46 por

entidades públicas e privadas. Coube também, na mesma época, a instalação de 4 pluviógrafos dos 27 instalados no Nordeste, que equivaleram a 3% dos 149 pluviômetros instalados em Pernambuco.

Em 1960 iniciou-se a fase que foi caracterizada pela criação da SUDENE e a reestruturação da rede. Autarquia vinculada ao Ministério do Interior, que entre outras atribuições, reconheceu a necessidade e a urgência de estudos hidrológicos básicos para o completo conhecimento dos recursos hídricos da região e seu comportamento.

Atendendo à solicitação de um grande número de usuários do sistema, a SUDENE publicou: “Dados Pluviométricos mensais do Nordeste”, sendo o “Volume 6” dedicado ao Estado de Pernambuco, constando a divulgação das séries pluviométricas, operacionalizadas de maneira compartilhada de rede, capaz de assegurar o seu pleno e adequado funcionamento, a vista dos custos crescentes de manutenção e necessidades técnicas de sua modernização e redimensionamento (SUDENE,1990). Arquivados em bancos de dados, essas informações subsidiaram inúmeros projetos e estudos específicos, de órgãos governamentais e empresas privadas, constituindo-se em fonte obrigatória de consulta para especialistas e profissionais afins.

Nos primeiros anos da década de 1990, os serviços hidrometeorológicos da SUDENE já sinalizavam os primeiros indícios de uma fragilidade econômica na administração da rede, resultando na desativação de alguns postos e no repasse dessa administração para órgãos das esferas estaduais, através de convênios de cooperação técnica.

A proposta resultou na operação e manutenção de um total de 145 pluviômetros no Estado de Pernambuco, cujas ações foram confiadas ao IPA e LAMEPE, entre os anos de 1992 a 1997. Em 1998, com a criação da SECTMA, esta instituição tornou-se prioritária quanto à responsabilidade da administração da rede.

Findada a vigência do convênio, a falta de recursos financeiros suficientes para operação e manutenção dos postos, desmotivada pelos diferentes programas dos Governos, levou a extinção de um número considerável de postos, outros precisaram ser transferidos para locais onde as observações puderam ser realizadas por outros órgãos do estado, sem ônus para o órgão gestor. Vale salientar que uma quantidade mínima continuou a ser operada durante um certo tempo por observadores não exigentes da gratificação.

Entretanto, para atender aos serviços de gestão dos recursos hídricos e meteorologia, foram realizados programas de ampliação e modernização, com instalações de pluviômetros convencionais e estações telemétricas (hidrológicas e meteorológicas), além de parcerias com outros órgãos operadores e entidades privadas (usinas de açúcar) através de consultas sistemáticas, com o intuito de aumentar a eficiência da rede pluviométrica no Estado.

Em 2003, o Estado de Pernambuco contou com uma cobertura pluviométrica de um total de 375 estações operadas simultaneamente por diversas entidades Federais e Estaduais, cuja densidade decrescia no sentido do Litoral ao Sertão, segundo informações das próprias entidades. A Tabela II.1 apresenta as quantidades de estações operadas pelas entidades no Estado de Pernambuco em 2003.

Tabela II. 1 - Órgãos operadores de redes pluviométricas no Estado de Pernambuco em 2003

Item	Órgão operador	Nº de pluviômetros
01	ANA / CPRM - SGB	40
02	INMET	11
03	SECTMA	222
04	COMPESA	13
05	IPA / EBAPE	82
06	INFRAERO / AERONÁUTICA	02
07	EMBRAPA / CPATSA	04
08	CHESF	01
<b>TOTAL</b>		<b>375</b>

## II. 11 – A Rede hidrometeorológica Nacional

Considerando o Brasil um país com dimensão continental distribuída em oito grandes bacias, é preciso planejar, desenvolver, operar e manter uma grande rede pluviométrica, bem como disseminar as informações aos diversos usuários.

A Rede Hidrometeorológica Nacional se encontra atualmente sob a administração da ANA, e foi instalada de modo a viabilizar o levantamento de informações necessárias aos estudos e projetos que demandam o conhecimento das disponibilidades hídricas e potenciais hidráulicos das bacias hidrográficas brasileiras. As informações coletadas, após tratamento, são enviadas para compor o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH e posteriormente disponibilizadas aos usuários.

Em 2001, esta Rede representou um total de 11.000 estações operadas por diversos tipos de organizações governamentais e privadas, das quais, 4200 constituíram a Rede Hidrometeorológica Básica Nacional (CPRM, 2004). Esta segunda é operada e mantida sob a responsabilidade do MME através da CPRM / SGB. É, portanto, constituída de estações: sedimentométricas, qualidade das águas, climatológicas, pluviométricas e fluviométricas, sendo as duas últimas convencionais ou telemétricas.

## II. 12 – As Recomendações da Organização Mundial de Meteorologia

Com o intuito de melhor avaliar e planejar as redes hidrológicas, a OMM criou no ano de 1965, um manual de práticas hidrológicas, contendo as regras gerais para recomendações dos limites adequados às densidades pluviométricas mínimas, as quais vêm sendo revisadas com base nos exames das respostas fornecidas pelas redes dos países. Essas regras foram aperfeiçoadas de modo a considerá-las mais precisas na obtenção dos resultados. Tais recomendações têm sido utilizadas até hoje como definição de normas para as redes hidrológicas. A Tabela II.2 apresenta o modelo publicado na (WMO, 1984) ainda com seu perfil original, enquanto a (WMO, 1994) mostra uma revisão nos procedimentos anteriormente estabelecidos conforme a Tabela II.3, ambas representando a quarta e décima quinta edição do referido manual.

Tabela II. 2 – Modelo original para densidades mínimas das redes pluviométricas (WMO, 1984)

Características fisiográficas	Limite das normas para uma rede mínima	Limite das normas admissíveis em circunstâncias especialmente difíceis <sup>1</sup>
	Superfície (em km <sup>2</sup> ) por estação	Superfície (em km <sup>2</sup> ) por estação
Regiões planas de zonas temperadas, mediterrâneas e tropicais;	600 - 900	900 - 3.000
Regiões montanhosas de zonas temperadas, mediterrâneas e tropicais;	100 - 250	250 - 1.000 <sup>4</sup>
Pequenas ilhas montanhosas com precipitação muito irregular e rede hidrográfica muito densa	25	
Zonas áridas e polares <sup>2</sup>	1.500-10.000 <sup>3</sup>	

1 Limite máximo e admissível em circunstâncias excepcionalmente difíceis;

2 Sem incluir os grandes desertos;

3 Segundo as possibilidades;

4 Em condições de grande dificuldade podem ampliar-se até 2.000 km<sup>2</sup>.

Tabela II. 3 – Modelo revisado para densidades mínimas das redes pluviométricas (WMO, 1994)

Unidades fisiográficas	Densidades mínimas por estações (Área em km <sup>2</sup> por estação)	
	Sem registrador	Com registrador
Costeira	900	9.000
Montanhosa	250	2.500
Planas e interiores	575	5.750
Montanhosas/onduladas	575	5.750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas Urbanas		10 – 20
Polares/áridas	10.000	100.000

Segundo LLAMAS (1993), a mesma Organização divulgou também em 1965 um modelo elaborado por W. B. LANGBEIN, que permitiu a avaliação das redes pluviométricas de vários países de condições físicas e socioeconômicas diferentes, através do conhecimento individual das populações e das redes pluviométricas em operação.

O modelo constou de um gráfico cartesiano em escalas logarítmicas, cujas variáveis relacionaram os números de pluviômetros em operação em cada país, para áreas de 1.000 km<sup>2</sup>, e as respectivas densidades demográficas. Para isso foram estabelecidos os limites razoáveis para densidades relativas das redes pluviométricas nacionais, segundo as delimitações nos campos de ocorrências dos pontos representativos dos países analisados, permitindo avaliar as dimensões das redes em função do desenvolvimento socioeconômico extraído da relação da quantidade de estações pluviométricas e o crescimento demográfico.

As ocorrências desses pares ordenados nos campos delimitados no referido gráfico identificaram os países cujas redes pluviométricas atendiam as suas condições socioeconômicas, representadas pelas densidades demográficas na linha de abscissas e os números de pluviômetros das suas redes na linha de ordenadas. Pôde-se com isto considerar o crescimento populacional como um indicador para densidade da rede que se deve estabelecer e garantir assim as condições necessárias ao desenvolvimento socioeconômico dos países, no que venha a depender da geração de informações hidrológicas.

Segundo LLAMAS (1993), uma rede pluviométrica de densidade razoável deve situar-se no interior dos intervalos de confiança em função da densidade demográfica. Porém a rede, assim definida, não é a ideal para certos usos específicos. O método sugere um limite inferior que deve ser respeitado.

## II. 13 – O Método de Thiessen

Este método consiste em estimar a precipitação média em uma região ou uma bacia hidrográfica, a partir da ponderação das médias dos valores precipitados em cada estação pluviométrica, associados a um fator de peso atribuído segundo a proporcionalidade das áreas de influência que cada uma define. As linhas que delimitam estas áreas constituem os polígonos de Thiessen. A precipitação média é então calculada pela média ponderada entre as médias das precipitações de cada estação e os pesos a elas atribuídas, os quais seriam as suas áreas de influência.

Embora leve em conta a desuniformidade na distribuição espacial das estações, pode ser inviabilizado em algumas situações por não considerar a influência do relevo, Para que os resultados sejam bons os terrenos deverão ser levemente acidentados e as distâncias entre os pluviômetros pouco extensas.

**II. 14 – O Critério da precisão desejada segundo os objetivos principais**

Segundo LLAMAS (1993), este critério deve ser utilizado para avaliar os volumes hídricos disponíveis em um dado período de tempo, em função dos usos reais e potenciais da água, sob uma precisão requerida. Como objetivo geral pode-se adotar uma precisão média que pode variar entre 5 a 10% para satisfazer a maioria dos usos, e em particular, para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos.

A determinação do número de estações pluviométricas necessárias para avaliar, com certa precisão, a altura média das precipitações sobre uma região é um problema estatístico. A altura da chuva pode ser avaliada por meio de uma simples média aritmética obtendo-se então o número ótimo de pluviômetros conforme a expressão (1).

$$N = \left( \frac{Cv}{p} \right)^2, \text{ onde:} \quad (1)$$

$N$  é o número de pluviômetros;

$p$  é o percentual de erro admissível e;

$Cv$  é o coeficiente de variação espacial.

**II. 15 – O Critério das características meteorológicas dominantes de uma região**

Segundo LLAMAS (1993), este critério consiste em examinar com detalhe os eventos meteorológicos dominantes. Quando o regime pluviométrico dominante é o de chuvas provocadas por tormentas frontais, a rede requer uma estrutura pouco densa e uma grande continuidade cronológica. Assim, uma grande distância entre as estações pode ser compensada por uma grande extensão nos registros.

No caso de tormentas intensas, associadas às circulações convectivas, a superfície de ação da chuva é mais reduzida uma vez que a variabilidade da precipitação é mais espacial do que cronológica. Esta situação exige uma rede mais densa para impedir que eventos meteorológicos importantes ocorram entre as estações e não sejam registradas. Nestas condições, a rede deve estar formada por um certo número de estações de base, que registrem a chuva com precisão através de registros contínuos (pluviógrafos).

Com o objetivo de analisar o regime dominante pode-se então introduzir a concepção de “coeficiente de irregularidade meteorológica”, para considerar a preponderância de processos irregulares (precipitação convectiva) sobre a regularidade meteorológica (precipitação frontal).

Este coeficiente se define como sendo a relação entre a precipitação anual máxima e a mínima durante um período longo de observações, conforme a expressão (2). Quanto maior for este coeficiente, mais irregular será o regime de chuvas e, por conseguinte, mais densa deverá ser a rede

para captar eventos chuvosos importantes concentrados em pequenas superfícies. Esse coeficiente pode ser considerado alto se obtido acima de 3.

$$ci = \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} \quad (2)$$

onde:  $\rho_{\max}$  é a precipitação máxima e  $\rho_{\min}$  precipitação mínima.

## II. 16 – O Método do Inverso do quadrado da distância

Para diversas aplicações na área de engenharia de recursos hídricos é necessário o conhecimento da precipitação e de outras variáveis, em pontos não amostrados. Faz-se então necessário o uso de interpoladores.

O inverso da distância é um método determinístico de interpolação linear que utiliza a ponderação dos inversos das distâncias a um número específico de pontos amostrados mais próximos de um dado ponto. Para isso, o conhecimento das coordenadas geográficas de cada ponto é necessário. Matematicamente podem ser utilizados os expoentes: 1, 2, 3 e 4 através da expressão geral (3) para uma variável “Z” qualquer.

$$Z(x_j, y_j) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i, y_i) d_{ij}^{-p}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-p}}, \text{ onde:} \quad (3)$$

$(x_j, y_j)$  é um ponto no espaço a ser interpolado;

$(x_i, y_i)$ ,  $i = 1 \dots n$ , são os pontos na vizinhança, com “n” igual ao número desses pontos;

$d_{ij}$  é a distância entre os pontos e;

$p$  é o expoente da distância.

Com este método é possível fazer previsões de valores em locais onde não foram amostrados utilizando os pontos de valores conhecidos através da expressão (4). Para a obtenção dos pesos atribuídos aos valores medidos a expressão (5):

:

$$Z(x_j, y_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i, y_i) \text{ com } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \text{ onde:} \quad (4)$$

$Z(x_j, y_j)$  são os valores a serem previstos;

$Z(x_i, y_i)$  são os valores observados;

$n$  é o número de pontos amostrados;

$\lambda_i$  são os pesos atribuídos a cada ponto, com:

$$\lambda_i = \frac{1}{(d(x_B, x_i))^2}, \text{ onde:} \quad (5)$$

$x_B$  é a posição do centro de massa da área;

$x_i$  são as posições dos pontos medidos.

A utilização do expoente “2” caracteriza o modelo mais comum para interpolar valores entre uma amostra de pontos distribuídos no espaço, o qual se denomina “inverso do quadrado da distância”. Este princípio se encontra associado a uma semelhança com os critérios adotados por Newton e Coulomb, em tempos remotos, para explicar a Lei da Gravitação Universal e da Força Elétrica. Ambas utilizaram os inversos dos quadrados das distâncias entre as massas dos planetas nas órbitas e as cargas elétricas nos átomos.

## II. 17 – Noções de Geoestatística

Segundo VIEIRA (2000) a Geoestatística foi desenvolvida por KRIGE (1951), na África do Sul, e consiste em uma técnica empírica de estimação, originada da percepção da necessidade fundamental da utilização das distâncias entre pontos amostrados, não exigidos pela estatística clássica, constituindo um avanço na solução de problemas até então limitados. A primeira aplicação dessa teoria em hidrologia foi realizada por DELHOMME (1976). O mesmo autor afirma ainda que para isto, MATHERON (1963) aplicou na França um tratamento formal, chamando de “Teoria das Variáveis Regionalizadas”, definindo como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade geográfica aparente, a qual se representa por funções numéricas ordinárias que assumem um valor definido a cada ponto no espaço e matematicamente descrevem um fenômeno natural.

A geoestatística dispõe de interpoladores eficientes capazes de estimar valores em pontos que não foram amostrados. Para isso, a estacionaridade estatística é uma condição específica que a variável regionalizada deve satisfazer. Diz-se estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória forem os mesmos para qualquer distância.

Esta estacionaridade deve ser de segunda ordem, a qual implique a existência de uma variância finita dos valores medidos. Esta hipótese só não precisa ser aceita para alguns fenômenos físicos que tenham uma capacidade infinita de dispersão. Para essa situação a geoestatística admite

hipótese intrínseca, a qual deve ser aplicada por requerer apenas a estacionaridade sem nenhuma restrição.

A estacionaridade de campo assume sua homogeneidade estatística, implicando na independência da função espacial numérica que varia de um local a outro com a continuidade aparente constituindo as variáveis regionalizadas, explica ALMEIDA *et al.* (2004). Essa continuidade explica também a dependência espacial requerente pela geoestatística, a qual pode ser estimada pelo semivariograma.

Quando as amostras forem coletadas nas duas dimensões do campo e a interpolação entre os locais medidos for necessária para a construção de mapas de isolinhas, será preciso usar uma ferramenta adequada para inferir a dependência espacial. Essa ferramenta é conhecida como semivariograma, afirma VIEIRA (2000). A expressão seguinte estima matematicamente a dependência espacial através do semivariograma.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (6)$$

Tem-se que  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i + h)$  são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância “ $h$ ”, e  $N(h)$ , o número desses pares para cada “ $h$ ”. O uso desse estimador pressupõe que a propriedade atenda a uma condição de estacionaridade, segundo a qual, no mínimo a hipótese intrínseca seja atendida, afirma (JOURNAL & HUIJBREGTS, 1978), citado em MELLO *et al.* (2003). Segundo MONTENEGRO *et al.* (1999), este mesmo autor diz ainda que o número de pares de pontos deve ser maior ou igual a 30.

Os valores das diferenças  $Z(x_i) - Z(x_i + h)$  contidas na expressão (6) em geral decrescem à medida que a distância “ $h$ ” diminui. Com isto, deve-se admitir que os pontos localizados mais próximos sejam mais parecidos entre si do que separados por grandes distâncias. Isso não acontece se existir a presença de tendência. Nos casos em que a variável regionalizada possui uma diferença sistemática entre dois valores pontuais, ou seja, uma tendência é identificada, o processo é então não estacionário e a função variográfica depende da posição dos pontos  $x_i$  e  $x_j$ , e da distância entre eles. Uma tendência pode ser representada por uma fórmula matemática, em polinômio, por exemplo, e ser removida dos dados. Após a remoção da tendência, a análise geoestatística é efetuada nos resíduos. Após a análise, a tendência é novamente adicionada aos dados para o seu mapeamento.

No caso dos pontos não igualmente espaçados a tendência e os resíduos para o semivariograma podem ser conhecidos através da expressão (7), da seguinte maneira:

$$Z(\chi_i) = m(\chi_i) + e(\chi_i), \text{ onde:} \quad (7)$$

$Z(\chi_i)$  é uma função aleatória para qualquer posição de  $\chi_i$  e;

$m(\chi_i)$  é a tendência principal e;

$e(\chi_i)$  é o erro residual.

A tendência por ser determinística pode ser modelada por uma função matemática, por exemplo: uma região em declive pode ser representada por um plano (tendência de primeira ordem), um vale pode ser representado por uma fórmula mais complexa, como um polinômio de segundo grau que reproduza a forma “U”. Essa função da tendência produz a representação da superfície (área) que se deseja. A tendência é uma componente fixa da variável e pode ser removida de maneira que apenas a componente aleatória seja analisada. A tendência é então removida para estimativa do semivariograma experimental e ajuste do modelo teórico. Nesse caso trabalha-se com os resíduos, que é o que permanece após a remoção da tendência.

LANDIM (1998) orienta que a análise do semivariograma possibilita o reconhecimento do comportamento espacial da variável regionalizada, do tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, da variação nas diferentes direções do terreno e da continuidade da característica estudada no terreno.

O semivariograma é chamado isotrópico quando é idêntico em todas as direções e anisotrópico quando há variações de comportamento em diferentes direções. O variograma direcional revela que em certas direções, estimativas de variáveis em pontos separados por pequenas distâncias estão mais correlacionadas do que em outras direções. A influência direcional na estrutura de correlação de uma variável regionalizada pode ser causada pela ação do vento, do escoamento superficial, de uma estrutura geológica, ou uma grande variedade de outros processos. As razões para essa influência direcional podem ser estatisticamente quantificadas. A anisotropia difere de tendência porque essa última pode ser descrita por um processo físico e modelada por uma fórmula matemática determinística. A causa da anisotropia, ou influência direcional no semivariograma, usualmente não é conhecida, então é modelada como um erro aleatório. O modelo anisotrópico define um ângulo em relação à direção do semi-eixo maior da elipse.

O semivariograma é dito experimental, quando obtido a partir das amostras colhidas no campo, e teórico, após o ajuste do modelo ao semivariograma experimental. O ajuste de um dos modelos teóricos ao semivariograma experimental, calculado na expressão (6), constitui um passo muito importante nas aplicações da “Teoria das Variáveis Regionalizadas”. A Figura II.2 mostra um modelo típico de semivariograma e seus parâmetros.

Assim,  $\gamma^*(h)$  aumenta com “h” e se anula quando  $h = 0$ , conforme a expressão (6). Entretanto quando “h” tende para zero,  $\gamma^*(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado “efeito pepita” ( $C_0$ ).

Este valor revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, e pode ser atribuído em parte aos erros de medição ou efeitos de escala. O crescimento do  $\gamma^*(h)$  em função de “h” ocorre até um certo limite máximo no qual se estabiliza tomando a denominação de “patamar” ( $C + C_0$ ). Essa distância “h” pela qual  $\gamma^*(h)$  atinge o patamar é o alcance (a), o qual assume a distância limite de dependência espacial, como pode ser observado na Figura II.2.

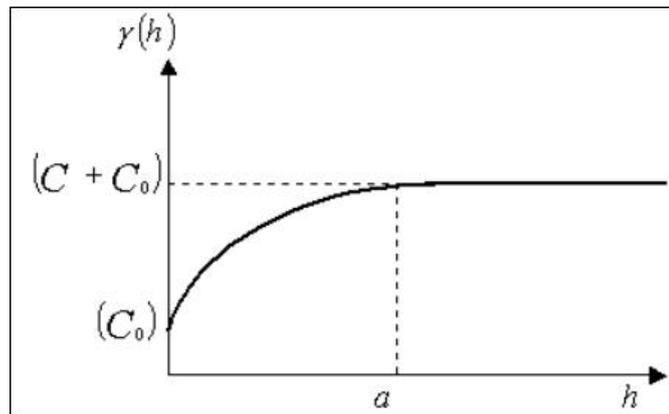


Figura II. 2 – Modelo semivariográfico típico.

Quando o semivariograma apresenta valor constante e igual ao patamar para qualquer valor de h, tem-se o efeito pepita puro, que corresponde a uma total ausência de correlação espacial entre duas variáveis  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$  para qualquer distância “h”. Neste caso o gráfico se aproxima do comportamento apresentado na Figura II.3.

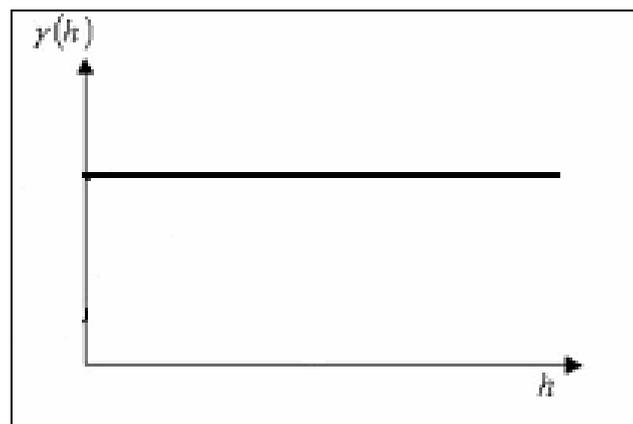


Figura II. 3 – Comportamento do semivariograma no efeito pepita puro.

Os semivariogramas podem assumir três classificações diferentes a partir da relação contida na expressão (8), de acordo com o grau de dependência espacial que assumam. Esta expressão pode resultar em valores percentuais inferiores a 25%, entre 25 e 75% e superiores a 75%, para “r”. Estes

intervalos enquadram os semivariogramas nas classificações de forte, moderada e fraca dependência espacial conforme CAMBARDELLA *et al.* (1994).

$$r = \left[ \frac{C_0}{C + C_0} \right] \times 100\% \quad (8)$$

O comportamento do  $\gamma^*$  em função de “h” definirá o modelo do semivariograma teórico que melhor se ajustará ao modelo experimental. Os modelos teóricos podem se apresentar sem patamares ou com patamares conforme o comportamento de  $\gamma^*$  em relação a “h”. Os modelos lineares e potências pertencem aos modelos sem patamares, ou seja, que não atingem o patamar. Em geral, estes tipos são utilizados para modelarem fenômenos com capacidades infinitas de dispersão. Quanto aos modelos com patamares destacam-se os modelos esféricos, exponenciais e gaussianos. Após o ajuste dos semivariogramas experimentais aos modelos teóricos, ou parametrização dos semivariogramas, é necessário as suas validações. O processo usualmente empregado é conhecido como validação cruzada.

Apesar da existência de outros, estes modelos são mais utilizados e encontrados nas literaturas de que tratam o assunto. As equações (9) a (11) mostram matematicamente seus comportamentos.

Modelos de semivariograma sem patamar:

a) Modelo linear:

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} h \quad (9)$$

onde  $\frac{C_1}{a}$  é o coeficiente angular ou declividade da reta.

b) Modelo potência:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1(h)^a \quad (10)$$

Modelos de semivariograma com patamar:

- Modelo esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (11)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

- Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad 0 < h < d, \quad (12)$$

onde  $d$  é a máxima distância no qual o semivariograma é definido.

- Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(\left(-\frac{h}{a}\right)^2\right) \right] \quad 0 < h < d, \quad (13)$$

onde  $d$  é a máxima distância no qual o semivariograma é definido.

A continuidade e a regularidade de uma função regionalizada exprimem-se pelo seu comportamento na vizinhança da origem, afirma (VALENTE, 1982). Sendo assim, os semivariogramas podem apresentar situações diferentes de comportamentos. Os modelos teóricos, esféricos e exponenciais, apresentam comportamentos lineares nas proximidades da origem, enquanto nos modelos gaussianos, os comportamentos são parabólicos. O comportamento parabólico atende ao mais alto grau de regularidade no espaço. A descontinuidade na origem caracteriza o efeito pepita ( $C_0$ ), e quando ocorre independência entre os valores tomados pela variável regionalizada em dois pontos qualquer do espaço, representando o caso limite completamente aleatório, o comportamento do efeito pepita é puro, como mostra a Figura II.3.

## II. 18 – O Método Kriging

Entre outros métodos geoestatísticos, o método Kriging, conhecido também por krigagem, teve seu nome em homenagem ao matemático sul-africano chamado KRIGE no ano de 1951. Trata-se de um processo de estimação de valores distribuídos no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Sua utilização serve para previsão de uma variável regionalizada dentro de um determinado campo geométrico, através de um procedimento exato de interpolação que leva em conta todos os valores observados. O método fornece além dos valores estimados o erro associado a tal estimação, o que distingue dos demais algoritmos disponíveis.

As informações a partir do semivariograma são usadas para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras. Utiliza também a dependência espacial entre os pontos vizinhos expressos no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Essas duas últimas características fazem da krigagem um interpolador ótimo. Trata-se de uma série de técnicas de análises de regressão que procuram minimizar a

variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Entre outros tipos de métodos geoestatísticos a krigagem pode ser dividida em: ordinária, simples e universal. Na krigagem ordinária, a estimação de uma variável regionalizada pode ser efetuada sem o conhecimento da média. Este modelo será aqui aplicado para as variáveis em estudo. A expressão (14) define matematicamente este interpolador:

$$Z^*(\chi_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i), \text{ com } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \text{ onde:} \quad (14)$$

$Z^*(\chi_0)$  são valores estimados para qualquer local  $\chi_0$ ;

$N$  é o número de valores medidos;

$\lambda_i$  são os pesos associado a cada valor medido,  $Z(X_i)$ .

A WMO nº 580 (1982) apresenta, entre outras técnicas para projetos de redes pluviométricas a partir de estações existentes, o método kriging, no qual esclarece que a estrutura da correlação espacial no processo hidrológico é medida e usada para determinar uma relação e especificar os pesos que são aplicados às medidas. Deste modo, o erro de estimativa do processo será mínimo em alguma situação não medida. É fornecida uma definição do erro de estimativa e de geometria da rede, especificamente os pontos cujos erros serão máximos. A avaliação do aperfeiçoamento nos mapas dos erros de estimativas das variáveis hidrológicas é o critério para locação das estações.

## II. 19 – O Método Co-kriging

O método co-kriging é também um procedimento geoestatístico segundo o qual diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto com base na correlação espacial, portanto, pode-se considerar uma extensão do método da krigagem. É aplicado em situações onde as estimativas de determinadas variáveis podem ser realizadas utilizando-se informações de outras, todas expressas no semivariograma. Para isso é necessário que exista dependência espacial cruzada entre essas variáveis regionalizadas, para que se possam efetuar estimativas de valores para os locais não medidos.

A sua aplicação visa atender determinadas situações particulares, em que numa mesma área, duas variáveis consideradas distintas, por representarem fenômenos diferentes, possuam dependências espaciais. Assim sendo, a estimativa de uma delas pode ser feita utilizando informações de ambas. Para que isso aconteça é necessário que se estabeleçam as funções variográficas, as quais passam a se chamar “semivariogramas cruzados”, aumentando assim sua precisão em relação à krigagem.

Considerando  $Z_1$  e  $Z_2$  duas variáveis que comprovem a existência de dependência espacial (para cada um delas e entre elas), e  $Z_2^*$  o valor que se deseja estimar para qualquer local  $\chi_0$ , a combinação linear de ambas pode assumir a estacionaridade de segunda ordem, decorrendo na equação matemática demonstrada pela expressão (15).

$$Z_2^*(\chi_0) = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{1i} Z_1(\chi_{1i}) + \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_{2j} Z_2(\chi_{2j}), \text{ com:} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{1i} = 0 \text{ e } \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_{2j} = 1, \text{ onde:}$$

$n_1$  e  $n_2$  são os números de vizinhos  $Z_1$  e  $Z_2$  respectivamente;

$\lambda_1$  e  $\lambda_2$  são os pesos associados a cada valor de  $Z_1$  e  $Z_2$ .

A equação (15) expressa, então, que a estimativa da variável  $Z_2^*$  deverá ser uma combinação linear de  $Z_1$  e  $Z_2$  com os pesos  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e com correlação cruzada entre elas VIEIRA (2000).

Para que o interpolador seja considerado ótimo é preciso que ocorra o máximo de confiança nas estimativas. Isso é possível porque duas condições deverão ser satisfeitas: a primeira prever a existência da variância mínima dos valores medidos e a segunda de não ocorrer tendências.

Igualmente à krigagem pode-se conhecer também a variância da estimativa de valores sem tendência para locais onde estes não foram medidos e a confiança associada a essas estimativas são decorrentes da minimização de erros residuais. Os modelos dos semivariogramas experimentais também são ajustados aos modelos teóricos, considerando o cruzamento de correlação entre a variável principal e a secundária, com vista à determinação de um modelo teórico que melhor se ajuste, através do mesmo processo comparativo dos resultados da validação cruzada.

## II. 20 – Revisão da literatura

Diversos estudos vêm sendo realizados para análise de redes pluviométricas, utilizando diferentes metodologias. ACQUAAH & DANKWA (1965) verificaram a rede de medição de precipitações na República de Ghana e em suas divisões regionais. Salientaram a importância dos recursos hídricos para o desenvolvimento da agricultura e da indústria com base nos conhecimentos meteorológicos e hidrológicos. A rede foi estudada do ponto de vista climático e populacional. As estações foram quantificadas separadamente quanto aos tipos e finalidade dos dados gerados. Foram também estabelecidas as densidades pluviométricas para as regiões e para o país, e através do gráfico de LANGBEIN foram determinadas as densidades relativas. Em seguida, elaboraram um gráfico cartesiano reunindo os números de pluviômetros operados em todo país em função das

décadas retroativas, até onde o conhecimento permitia. Determinada a tendência da curva, foi possível prever o número de pluviômetros para três décadas futuras, considerando o crescimento do número de pluviômetros proporcional ao desenvolvimento sócio-econômico do país, representado pelo seu crescimento demográfico.

SILVA *et al.* (1992) diagnosticaram a rede pluviométrica do Estado da Paraíba. A primeira etapa reservou-se ao levantamento de todos os postos operados por diversas instituições, sendo os mesmos separados e quantificados quanto às bacias hidrográficas pertinentes. Nesta etapa foram verificadas algumas concentrações de postos muito próximos, concluindo que a distribuição espacial precisaria ser melhorada. Em uma segunda etapa, visando obter informações qualitativas, partiu-se para visita aos postos em operação. Essas visitas tiveram como objetivos atualizar os dados cadastrais dos postos, coletar informações sobre os postos e os observadores, funcionamento dos equipamentos e condições técnicas de instalação. Os problemas detectados foram identificados e quantificados por localização e órgãos responsáveis. Os autores, então, previram uma terceira etapa, a qual seria realizado para avaliar as séries de dados existentes e assim poder criticar suas falhas e verificar suas consistências, além de tentar estabelecer correlações entre dados dos postos vizinhos.

Foi observado que no Estado da Paraíba basicamente predominavam duas redes maiores, uma operada pela EMATER e outra pela SUDENE. Concluiu-se, então, com a parcela de resultados incorretos, que ambas vinham sofrendo conseqüências da crise econômica que afetava o país na época. Com relação a SUDENE, foi destacado que a transferência das responsabilidades pela administração da rede aos estados e o ônus financeiro dela decorrente, em cogitação pela implantação dos Núcleos Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos, deveria ser refletida cuidadosamente, principalmente no tocante aos custos envolvidos, questionando sobre a preparação dos estados quanto às disponibilidades orçamentárias para assumirem sozinhos tais responsabilidades, inclusive a manutenção da estrutura de técnicos capacitados para realizar a operação da rede.

KISHI & CENTENO (1992) ressaltaram a importância do conhecimento dos dados hidrológicos para o estudo dos recursos hídricos. Com isso, foi analisada a rede pluviométrica do Estado de Alagoas, partindo pela quantificação dos postos e obtenção das densidades pluviométricas nas regiões geográficas do estado. Em seguida, esses dados foram comparados com padrões internacionais e outros estados do Brasil. Foi realizado também um levantamento de todos os órgãos públicos envolvidos, dos quais constavam equipamentos operando nessas regiões. Concluiu-se, então, que o Litoral, Zona da Mata e Região do São Francisco apresentaram valores mais favoráveis quanto às densidades pluviométricas, por nelas realizarem atividades econômicas mais intensas, enquanto o Sertão, de um modo geral, apresentou a menor densidade. Para obtenção

destes resultados foram utilizadas as recomendações da OMM. A densidade populacional foi considerada como um dos fatores determinantes na densidade de estações, e foi aplicado o modelo cartesiano de LANGBEIN, o qual apresentou resultados acima dos recomendados.

SHEFFER *et al.* (1994) analisaram a rede pluviométrica do Estado de Pernambuco operada pelo LAMEPE quanto ao seu dimensionamento. A densidade da rede, tanto para o Estado como para as microrregiões em particular, foi comparada aos critérios da OMM. Foi ressaltada a importância de uma rede bem dimensionada para obtenção de dados de boa representatividade, para serem utilizados no planejamento dos recursos hídricos. Foi destacado que, apesar de satisfatória, a densidade decrescia no sentido do Litoral ao Sertão, em consonância com as densidades demográficas. Após a comparação das densidades pluviométricas com outros estados brasileiros, foram analisadas as microrregiões de Pernambuco. A análise prosseguiu através da determinação das densidades relativas, a partir das densidades populacionais utilizando o gráfico de LANGBEIN. Verificou-se que a microrregião da Mata poderia ser considerada privilegiada e o Sertão apresentou as menores densidades pluviométricas. Apesar do Estado se encontrar dentro dos limites estabelecidos, observou-se que não havia uma distribuição uniforme dos postos. Os efeitos meteorológicos dominantes foram considerados como fator importante no planejamento de uma rede. Com isso, foi analisada a distribuição dos coeficientes de irregularidade das precipitações, mapeando-os em forma de isolinhas.

ALVES *et al.* (2002) analisaram a distribuição espacial da rede pluviométrica existente no Estado de Pernambuco, sob a responsabilidade da SRH-PE, através do Departamento de Hidrometeorologia. A finalidade dessa rede era disponibilizar informações pluviométricas para serem utilizadas em projetos, no âmbito da meteorologia, recursos hídricos, entre outras. A análise se estendeu entre as mesos e microrregiões do Estado, segundo avaliações realizadas distintamente, entre as redes de equipamentos convencionais e telemétricos.

Para isso utilizou-se o método recomendado pela OMM para as densidades mínimas permitidas. Foi observada uma boa densidade para o estado, embora tenham sido constatados valores inferiores ao permitido no Sertão e que 15 municípios se encontraram completamente desprovidos de medidores de chuvas. Foi Sugerida, então, a ampliação de ambas as redes, com prioridades para as PCD's nos locais de difícil acesso.

PAIVA (2001) apresenta um exemplo de projeto de rede de estações pluviométricas, fluviométricas e sedimentométricas para a Bacia do Rio Ibicuí, pertencente à Bacia do Rio Uruguai.

Destacam que anualmente foi efetuados uma avaliação das redes com o objetivo da implantação dos mecanismos de gestão previstos no Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul. O projeto da rede pluviométrica levou em condição as estações existentes, sua distribuição espacial, as condições de acesso, os limites recomendados pela WMO (1994) e a

estrutura espacial da precipitação média na região. No estudo foram identificadas 97 estações. Apesar desse número resultar em uma densidade considerada adequada pelos padrões da WMO (1994), foi verificado que do total 23 estações haviam sido extintas e algumas outras se encontravam agrupadas nos centros urbanos, não representando a variação espacial significativa para a caracterização da precipitação média. Foi proposto então uma rede básica com 34 estações, tomando como base o período de registro e a distribuição espacial dessas estações.

A avaliação da estrutura espacial da precipitação foi então realizada considerando essas 34 estações selecionadas e outras séries históricas de estações que haviam sido desativadas, mas que tinham período de observação suficiente para análise e estavam localizadas em regiões com deficiência de informações. A análise demonstrou a necessidade de 48 estações para estimativa da precipitação média na bacia e foram indicadas localizações para as estações projetadas levando em consideração as condições de acesso e disponibilidades de observador, confirmadas em visita de campo, e não simplesmente utilizando o resultado da análise de variabilidade espacial e as indicações de densidade da WMO (1994).

A ANA (2002), em convênio de cooperação com a UNESCO realizou estudos em todo o Brasil, visando diagnosticar e replanejar a Rede Hidrometeorológica Nacional. Como passo inicial investigou a rede existente para então definir os prognósticos exigidos à sua otimização. Na metodologia utilizada foram destacadas as recomendações da OMM, com aplicações diretas em alguns estados brasileiros e bacias hidrográficas mais importantes. Por tratar da Rede Nacional de um modo geral serão aqui resumidos os estudos realizados na Bacia do Rio São Francisco e no Estado da Bahia, exclusivamente dedicados à parte pluviométrica da Rede.

Na parte referente à Bacia do Rio São Francisco, para diagnosticar e apresentar proposta de complementação da rede existente e definir os parâmetros de reestruturação, considerou-se que a cobertura espacial da rede pluviométrica deveria ser ampla e homogênea para que as informações produzidas fossem representantes fiéis da bacia, e que tal homogeneidade, aliada ao aumento da qualidade das informações coletadas, fosse também alcançada com a correção das distorções existentes, para assim poder obter os dados necessários à gestão integrada dos múltiplos usos dos recursos hídricos na bacia, com a confiabilidade desejada. Para isso levou-se em conta que o esforço na identificação e equacionamento das parcerias entre os agentes seria de fundamental importância para a ampliação e modernização do monitoramento.

Diante destes objetivos, foram adotadas algumas diretrizes, inclusive o planejamento da rede conforme as recomendações da OMM, da ANA e do DNAEE / ANEEL, visando uma distribuição espacial mais adequada e evitando a dualidade de monitoramento da rede proposta, além de considerar que a implantação da rede básica seria feita em etapas sucessivas. A atualização do levantamento das entidades e estações, a disponibilidade dos dados e outras informações relevantes,

como a observância das particularidades regionais durante os procedimentos da ANA e recomendações da OMM, foram também evidenciadas.

Para adequação da densidade na bacia de um modo geral, constatou-se que a distribuição da cobertura foi considerada heterogênea apesar de ter atendido ao limite recomendado. Na parte reservada às estações da rede básica (operadas pela CPRM em convênio com a ANA), a densidade ficou bem aquém do limite mínimo desejado, embora tenha sido superado em algumas sub-bacias.

Com vista à ampliação da rede foram definidos alguns critérios para localização das estações na bacia: locaram-se as estações nas regiões de planícies e nas serras, mesmo quando aparentemente houvesse excessos de coberturas, por estas estarem sujeitas a precipitações de origem orográficas, visando ampliar a base de dados para estudos sobre precipitações concentradas; locou-se um pluviômetro convencional nos núcleos urbanos onde não havia cobertura ou nas suas proximidades; definiu-se em conjunto com a ANA que a cada grupo de 5 pluviômetros convencionais seria instalado um registrador, preferencialmente do tipo *data-logger*, equivalente a pluviógrafo e; nos locais mais inóspitos, sugeriu-se instalar estações automáticas e telemétricas com mais autonomia, devido aos elevados custos associados às visitas.

Do ponto de vista econômico, o custo de manutenção das estações, por um lado, tende a ser crescente, em função do aumento do quantitativo de estações, da substituição de equipamentos e sensores devido à obsolescência, depredação e danos de origens diversas. Por outro lado, o aumento da densidade de pontos da rede tenderá a trazer uma redução no custo médio de operação de cada ponto devido à diluição dos custos fixos e variáveis da operação da rede.

Na parte dedicada ao Estado da Bahia, os estudos consideraram que a avaliação e o planejamento de uma rede hidrometeorológica, com um número ideal de estações, é bastante complexo, dada a diversidade de fatores envolvidos para o seu planejamento. Destacou as recomendações da OMM, WMO (1984), o método baseado na precisão desejada e o método baseado nos eventos meteorológicos predominantes (LLAMAS, 1993), como metodologias para determinação de uma rede ótima. Considerou que LLAMAS (1993) em seus estudos sempre procurou relacionar as densidades pluviométricas aos fatores físicos e meteorológicos, com previsões do desenvolvimento urbano, agrícola e industrial, e da capacidade econômica local.

FERREIRA FILHO *et al.* (2000) aplicaram a metodologia kriging à rede pluviométrica do Estado do Ceará. Para isso foi necessário dividirem a área do Estado em três partes, quer sejam: Serra do Ibiapava, Litoral e Interior. Enfatizaram a importância da precipitação como variável necessária ao estudo dos recursos hídricos, ressaltando que para o efetivo monitoramento dessa variável seriam imprescindíveis a instalação, operação e manutenção dos pluviômetros em uma região. Afirmaram ainda que tornar-se-ia fundamental a determinação da precipitação média, e que sua precisão dependeria da existência de uma grande quantidade de pluviômetros, que por razões

econômicas somente são instalados em quantidade limitada. Com o objetivo de estimar valores em locais onde não havia pluviômetros, adotaram a krigagem para que o relacionamento espacial entre os postos pluviométricos pudesse tornar-se mais eficiente quanto à precisão.

O critério utilizado para fixação do tempo de observação hidrológica foi estipulado para as três partes em um mínimo de dez anos consecutivos, perfazendo um total de 27 postos de responsabilidade do DNAEE / SUDENE.

A fim de se conhecer com precisão os valores da precipitação média sobre essas partes, foram utilizados os métodos kriging e Thiessen. O primeiro para suprir os espaços desprovidos de pluviômetros e, através das pluviometrias pontuais, se obter a precipitação média, para então comparar com os resultados do segundo método, verificando as diferenças dos seus valores e os erros percentuais indicados nos dois processos.

Foi possível concluir que a metodologia kriging se mostrou bastante eficiente na determinação pluviométrica média anual, apresentando melhores resultados que o método de Thiessen, principalmente quando a quantidade de postos pluviométricos disponíveis foi pequena, fato este bastante comum na região do Nordeste do Brasil.

OLIVEIRA & CHAUDRHY (1995) abordaram o problema da estimativa de isoietas com base em dados pluviométricos utilizando os métodos geoestatísticos de kriging e Co-kriging. A partir desta abordagem foi possível comparar os métodos adotados considerando o efeito da orografia na precipitação da Bacia do Rio Camanducáia, local onde se desenvolveu o trabalho. A influência orográfica foi detectada através de um estudo preliminar que envolveu a dependência da precipitação em relação às altitudes dos postos selecionados.

Considerou-se que a precipitação, apesar do seu caráter regional, apresenta variações espaciais devido aos efeitos orográficos difíceis de serem conhecidos detalhadamente em virtude da escassez de dados. Os autores afirmaram ainda que os métodos geoestatísticos oferecem a possibilidade de se prever informações no espaço, em pontos não cobertos pela rede pluviométrica e, portanto, permitem uma maior acurácia na obtenção de isoietas, enquanto os métodos convencionais, como a interpolação clássica e o método dos mínimos quadrados, são insuficientes para inferir a

No método co-kriging, a variável de interesse do caso estudado foi a precipitação, e a variável auxiliar, a altitude. Foram selecionados 26 postos pluviométricos, dentro e fora da bacia estudada, esta contendo 904,00km<sup>2</sup>, com as altitudes dos postos entre 570 a 1.080m. A fixação do período de observação hidrológica adotada resultou da tentativa de se obter o maior número possível de postos pluviométricos, exigindo com isso a exclusão de alguns, determinando assim o período que vai de 1971 a 1980, na rede submetida à responsabilidade do DAEE, utilizando o trimestre mais seco, compreendendo os meses de julho à setembro, por conta do período da dependência das variáveis utilizadas.

Após os estudos preliminares dos semivariogramas com amostras disponíveis, foram inseridos 60 pontos adicionais de altitudes, coletados diretamente dos mapas topográficos. Daí, traçado os semivariogramas das variáveis envolvidas foram ajustados ao modelo gaussiano. Como resultado das análises, foi observada a superioridade do método co-kriging sobre o método kriging, pois a definição das isoietas foi significativamente fiel ao efeito orográfico no caso do método co-kriging.

GOMES & SILANS (2000), considerando que a precipitação nas bacias hidrográficas do Nordeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade espacial, investigaram o efeito desta variabilidade sobre o cálculo da precipitação média na Bacia do Rio Gramame, localizada no Litoral paraibano, onde a densidade de pluviômetros é bastante elevada. Foi observado também que o método clássico de Thiessen estima bem a precipitação média. Entretanto, os resultados mostraram que erros significativos podem surgir em algumas sub-bacias. Os autores salientaram a importância do conhecimento da precipitação média para estimativa dos recursos hídricos e a reduzida atenção que foi dada ao assunto no decorrer dos tempos, constatadas as habituais aplicações do método dos polígonos de Thiessen, desde seus estudos em 1911.

Foi destacada que as freqüentes chuvas convectivas que caracterizam o Nordeste do Brasil apresentam uma elevada variabilidade espacial. A bacia estudada possui 15 postos pluviométricos em uma área aproximada de 589,00 km<sup>2</sup>, além da Rede da SUDENE em torno da bacia, tornando-a bastante densa. Os autores tiveram como objetivo comparar o cálculo do valor médio da precipitação com diversos métodos, sendo esses: o método dos polígonos de Thiessen; o método da interpolação pelo inverso do quadrado da distância; o método de Shepard e o método da krigagem ordinária.

Para isso foram escolhidos três anos específicos, respectivamente correspondentes a anos com baixa, média e alta variabilidade espacial, crescentemente ordenados pelos coeficientes de variação da precipitação média, e os meses do período chuvoso do ano de média variabilidade espacial, além de um dia destes meses, de modo aleatório, para assim comparar os resultados da aplicação dos diversos métodos.

Concluiu-se, então que a bacia hidrográfica do Rio Gramame é exemplar por dispor de uma rede pluviométrica bastante densa, fato que não deve ocorrer com outras bacias litorâneas do Nordeste do Brasil. Ainda como conclusão, foi ressaltado que o método de Thiessen, nestas condições, gera excelentes valores, mesmo quando existir uma variabilidade espacial importante. Porém, foi comprovado que erros significativos poderão surgir para algumas bacias ou caso o número de postos for menor. Foi sugerido que estudos fossem realizados para otimização das redes pluviométricas das bacias do Litoral do Nordeste brasileiro.

ALMEIDA *et al.*(2004) ressaltaram que a variabilidade temporal das precipitações no Nordeste do Brasil tem sido muito estudadas devido às características semi-áridas e à susceptibilidade aos

eventos decorrentes das secas. No entanto, foi reconhecida também a necessidade da avaliação espacial da variável pluviométrica. Foi efetuada a análise da variabilidade espacial da precipitação anual média e da precipitação média no trimestre úmido na Bacia do Rio Ipanema, em Pernambuco, utilizando a metodologia geoestatística. Foi incluído também na avaliação, o processo de formação das chuvas através da distribuição espacial de coeficientes de irregularidade.

A bacia hidrográfica estudada tem sua maior parte localizada no Estado de Pernambuco, enquanto a menor parte fica no Estado de Alagoas, ambas perfazendo uma área total aproximadamente igual a 6.245,00 km<sup>2</sup>. Trata-se de uma sub-bacia do Rio São Francisco, a qual representa uma das Unidades de planejamento hídrico do Estado de Pernambuco. Nesta área foram selecionados 16 postos pluviométricos, cujos períodos de observação obedeceram ao intervalo de 1963 a 1990. Os dados foram obtidos no banco de dados da ANA dos postos operados pela SECTMA. Na preparação das séries pluviométricas utilizaram técnicas e *software* específicos com fins de preenchimento das falhas uma vez que se encontraram na condição de dados brutos.

As 16 séries pluviométricas foram submetidas a uma análise estatística clássica, cuja distribuição apresentou-se ajustadas à distribuição normal. O ajuste das variáveis à distribuição normal e log-normal foi aferido visualmente, sendo as precipitações melhor representadas por seus valores normais que os coeficientes de irregularidade.

Após a confirmação da hipótese de normalidade de valores para as variáveis pluviométricas, foram utilizadas as ferramentas de análise geoestatística para interpolação por krigagem ordinária, o qual foi submetido ao teste da validação cruzada sob condições isotrópica e anisotrópica. Com isso foi possível construir mapas de isolinhas de precipitações anuais médias e trimestres mais úmidos, e um mapa de erro produzido na predição dos valores interpolados.

Os coeficientes de irregularidade utilizados foram submetidos à espacialização usando toda a metodologia já descrita, que por sua vez foi mais bem ajustada ao modelo do semivariograma, em condições isotrópicas e aplicação do método de krigagem ordinária, cuja dependência espacial apresentou-se fraca.

Com isso, foi afirmado que a geoestatística se revela uma forte ferramenta de aplicação espacial, que ainda permite a compreensão e distribuição da confiabilidade do processo de espacialização da variável. Foi proposta a utilização do método Co-kriging como ferramenta geoestatística de suporte aos resultados obtidos neste trabalho auxiliando na estimativa de precipitação sob efeito de variável externa como o caso da altitude.

TRARBACH (2004) afirmou que para o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos seria fundamental a utilização de informações hidro-climáticas fornecidas pelas redes de monitoramento, dentre as quais, as redes pluviométricas. Foi destacado ainda que o número e a configuração, esta última entendida como a distribuição das estações, afeta diretamente a precisão da estimativa de

precipitação sobre uma área de interesse. Por este motivo, foi ressaltado que o dimensionamento adequado de rede pluviométrica seria fundamental para obtenção de dados precisos na avaliação da disponibilidade hídrica.

Para avaliar a influência da configuração da rede pluviométrica na precisão da estimativa da precipitação média total anual e sazonal na Bacia do Rio São Mateus e entorno, localizada no Estado do Espírito Santo, foram utilizadas 18 estações pluviométricas, contendo os registros no período de 1970 a 2000, adquiridos no banco de dados da ANA. Através da utilização de *software* específico conseguiu-se avaliar a influência da configuração dessa rede segundo a precisão desejada.

Foi destacado o método proposto pela OMM como sendo um dos mais comumente empregados, além das técnicas estatísticas utilizadas nas análises quantitativas e de distribuição da precipitação, associadas ao dimensionamento de redes pluviométricas como: a correlação, a regressão linear e a análise de variância.

Para avaliar a influência da configuração da rede pluviométrica na precisão da estimativa da média total anual e dos períodos secos e chuvosos, foram realizadas estimativas pontuais, estimativas da média sobre a região de estudo e obtenção da configuração ótima formada por cada subgrupo de estações da região, como também os cálculos da precipitação média e da variância, associada à estimação de todas as combinações possíveis para as configurações da rede pluviométrica.

Os resultados das análises demonstram que através da aplicação da geostatística pode-se obter o número e a locação das estações de uma rede pluviométrica para atender uma precisão de estimativa desejada, e, portanto, auxiliar a tomada de decisão no dimensionamento e revisão de redes pluviométricas.

*CAPÍTULO III*

*ÁREA DE ESTUDO*

### III. 1 – Características gerais da Bacia do Ipojuca

#### III. 1.1 – Localização e divisões especiais

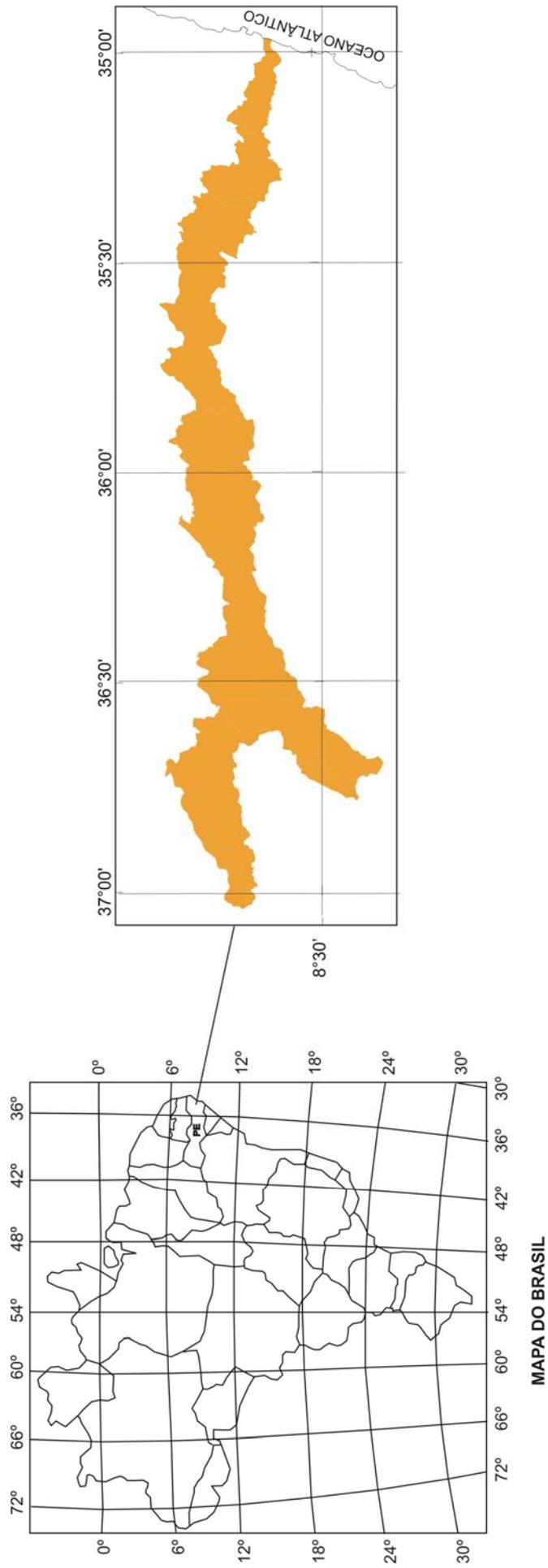
Considerada uma das treze bacias hidrográficas mais importantes do Estado de Pernambuco, sua localização, entre os paralelos 08° 09' 50'' e 08° 40' 50'' de latitude sul e os meridianos 34° 57' 52'' e 37° 02' 48'' de longitude oeste, permite-lhe uma grande extensão no sentido do curso fluvial principal, ou seja, oeste/leste, em relação à largura da sua área de drenagem, cobrindo assim uma superfície total de 3.433,58 km<sup>2</sup>. Sua localização encontra-se ilustrada na Figura III.1.

A divisão político-administrativa consta de 12 municípios com sedes municipais situadas no interior da bacia e mais 12 municípios com sedes nas bacias vizinhas, perfazendo um total de 24 municípios. A Tabela III.1 apresenta as áreas desses municípios e suas partes na bacia. A divisão administrativa pode ser vista no Mapa VIII.3 (anexo).

Tabela III. 1 - Áreas dos municípios da Bacia do Ipojuca (SECTMA, 1998).

MUNICÍPIOS	Áreas dos Municípios			Áreas da bacia ocupadas pelos municípios
	Total	Pertencentes à bacia		
	km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	%	%
1 ALAGOINHA	180,10	54,61	30,32	1,59
2 ALTINHO	452,60	6,70	1,48	0,20
3 AMARAJI	238,80	60,89	25,50	1,77
4 ARCOVERDE	380,60	104,09	27,35	3,03
5 BELO JARDIM *	653,60	230,92	35,33	6,73
6 BEZERROS *	545,70	226,95	41,59	6,61
7 CACHOEIRINHA	183,20	1,81	0,99	0,05
8 CARUARU *	932,00	387,62	41,59	11,29
9 CHÃ GRANDE *	83,70	68,52	81,86	2,00
10 ESCADA *	350,30	203,73	58,16	5,93
11 GRAVATÁ *	491,50	169,03	34,39	4,92
12 IPOJUCA *	514,80	150,84	29,30	4,39
13 PESQUEIRA	1036,00	606,79	58,57	17,67
14 POÇÃO *	212,10	189,62	89,40	5,52
15 POMBOS	236,10	66,51	28,17	1,94
16 PRIMAVERA *	96,50	79,09	81,96	2,30
17 RIACHO DAS ALMAS	313,90	8,19	2,61	0,24
18 SAIRÉ	198,70	75,88	38,19	2,21
19 SANHARÓ *	247,50	235,45	95,13	6,86
20 SÃO BENTO DO UNA	715,90	70,15	9,80	2,04
21 SÃO CAETANO *	373,90	262,37	70,17	7,64
22 TACAIMBÓ *	210,90	131,81	62,50	3,84
23 VENTUROSA	325,10	2,22	0,68	0,06
24 VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	345,70	39,79	11,51	1,16
<b>TOTAL</b>	-	<b>3.433,58</b>	-	<b>100</b>

\* Municípios com sedes municipais localizadas na Bacia do Rio Ipojuca



**Figura III.1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.**

A divisão geográfica estabelecida para o Estado de Pernambuco considera que no sentido leste/oeste, a Bacia do Ipojuca compreende as regiões geográficas do Litoral, Zona da Mata, Agreste, e parte inicial do Sertão. No mesmo sentido, encontram-se inseridas as microrregiões de Recife, Vitória de Santo Antão e Vale do Ipojuca.

Na divisão hidrográfica estabelecida para o Estado de Pernambuco (SECTMA, 1998) a Bacia do Rio Ipojuca constitui a Unidade de planejamento (UP 3). Os limites de vizinhança com as demais bacias hidrográficas do Estado são: ao norte, seu contorno encontra-se ligado à Bacia do Rio Capibaribe (UP2) em sua maior parte, e um Grupo de bacias de pequenos rios litorâneos (GL2); ao sul, ficam as Bacias dos Rios Una (UP 4), Sirinhaem (UP 5) e um Grupo de bacias de pequenos rios litorâneos (GL 3); ao leste, o Oceano Atlântico; e ao oeste, as Bacias dos rios Ipanema (UP7), Moxotó (UP 8) e parte do Estado da Paraíba. A Figura III.2 apresenta a divisão hidrográfica do Estado de Pernambuco.

### III. 1.2 – Aspectos econômicos e sociais

A Bacia do Rio Ipojuca possui uma população estimada de 666.894 habitantes, segundo o somatório das populações dos municípios com sede no interior da bacia (IBGE, 2000). Esta população estimada corresponde à fração de 1/12 da população do Estado e encontra-se distribuída nas zonas rurais e urbanas. O PNUD (2000) divulgou os IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) para os Estado de Pernambuco, conforme a Tabela III.2.

Tabela III. 2 – Índices de Desenvolvimento Humano na Bacia do Rio Ipojuca.

Item	Municípios com sede municipal dentro da bacia	IDH	Item	Municípios co sede municipal fora da bacia	IDH
1	IPOJUCA	0,658	13	PESQUEIRA	0,636
2	ESCADA	0,645	14	ALAGOINHA	0,630
3	PRIMAVERA	0,632	15	POMBOS	0,641
4	CHÁ GRANDE	0,612	16	ALTINHO	0,590
5	GRAVATÁ	0,654	17	RIACHO DAS ALMAS	0,609
6	BEZERROS	0,619	18	SAIRÉ	0,598
7	CARUARU	0,713	19	CACHOEIRINHA	0,642
8	SÃO CAETANO	0,580	20	SÃO BENTO DO UNA	0,623
9	TACAIMBÓ	0,598	21	AMARAJI	0,617
10	BELO JARDIM	0,625	22	ARCOVERDE	0,708
11	SANHARÓ	0,618	23	VENTUROSA	0,650
12	POÇÃO	0,571	24	VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	0,663

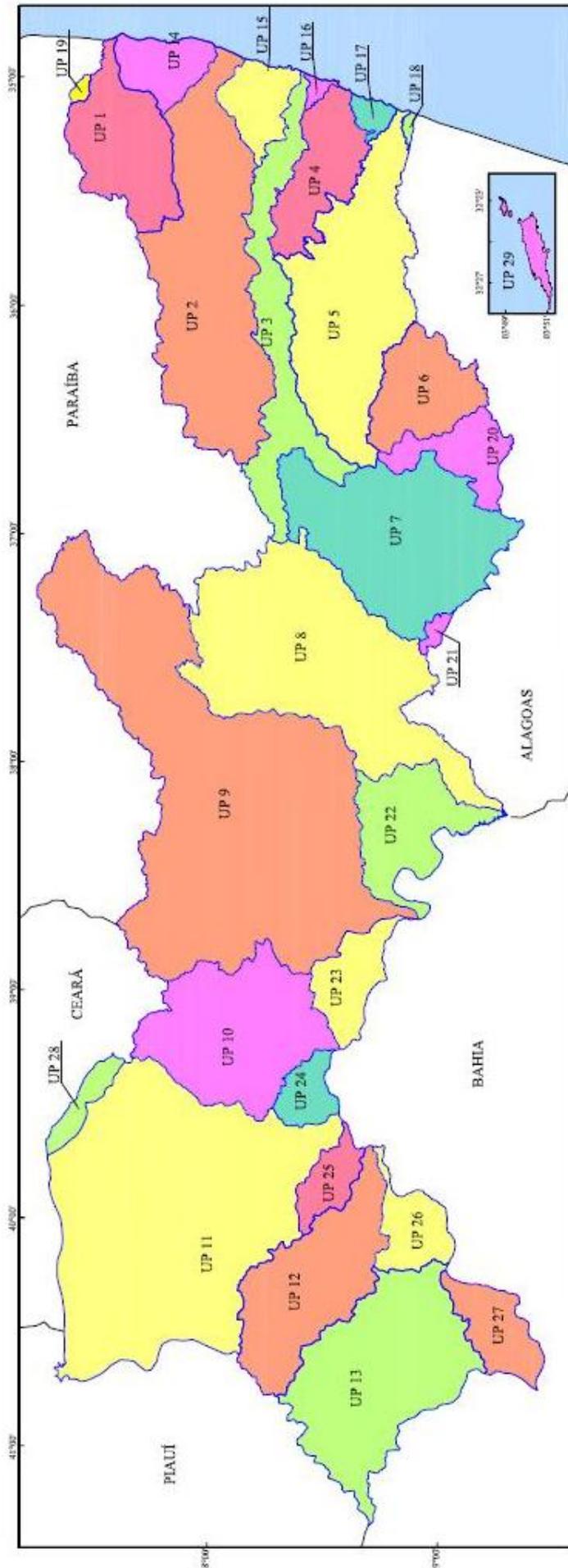


Figura III.2 - Divisão Hidrográfica de Pernambuco em Unidades de Planejamento Hidricos - UP - (SECTMA, 1998).

- |                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| UP 1 - GOIANA      | UP 20 - GI1                 |
| UP 2 - CAPIBARIBE  | UP 21 - GI2                 |
| UP 3 - IFOJUCA     | UP 22 - GI3                 |
| UP 4 - SIRINHAÉM   | UP 23 - GI4                 |
| UP 5 - UNA         | UP 24 - GI5                 |
| UP 6 - MUNDAÚ      | UP 25 - GI6                 |
| UP 7 - IPANEMA     | UP 26 - GI7                 |
| UP 8 - MOXOTÓ      | UP 27 - GI8                 |
| UP 9 - PAJEÚ       | UP 28 - GI9                 |
|                    | UP 29 - FERNANDO DE NORONHA |
| UP 10 - TERRA NOVA |                             |
| UP 11 - BRÍGIDA    |                             |
| UP 12 - GARÇAS     |                             |
| UP 13 - PONTAL     |                             |
| UP 14 - GL1        |                             |
| UP 15 - GL2        |                             |
| UP 16 - GL3        |                             |
| UP 17 - GL4        |                             |
| UP 18 - GL5        |                             |
| UP 19 - GL6        |                             |

O IPEA (2004) confirma que este índice é medido a partir de indicadores de educação (alfabetização e taxa de matrícula), longevidade (esperança de vida ao nascer) e renda (PIB *per capita*). Os índices variam de 0 (nenhum desenvolvimento humano) a 1 (desenvolvimento humano total). Portanto, o desenvolvimento humano na Bacia do Ipojuca pode ser considerado médio por se enquadrar no intervalo entre 0,500 e 0,799 segundo este instituto.

A economia da região da Bacia do Ipojuca é voltada em sua maior parte para a atividade agropecuária e industrial, a qual apesar de gerar empregos, os rendimentos agrícolas podem ser considerados baixos e com ocorrência de produção sazonal por efeito das crises climáticas. As atividades produtivas geralmente se diversificam em função das condições climáticas locais, determinando assim diferentes modalidades de ocupação do solo e definindo, por conseqüência, os patamares econômicos e sociais. O setor industrial apresenta-se mais diversificado, porém as unidades de maior porte estão localizadas nos municípios de Pesqueira, Sanharó, Belo Jardim, Caruaru e no Complexo Portuário de Suape.

Considerando a energia elétrica um insumo fundamental à produção, a Bacia do Ipojuca pode ser considerada como bem atendida, uma vez que todos os núcleos urbanos são beneficiados por esse serviço, inclusive a zona rural, bastante favorecida pela expansão da eletrificação, justificando assim a elevação do consumo e do número de usuários nos últimos anos.

A forma alongada da bacia constitui uma configuração privilegiada por se tornar uma via de comunicação entre o Litoral e o Sertão pernambucano, servindo também de eixo de ligação e transição com a RMR, explicando assim o maior dinamismo econômico do corredor do Ipojuca em relação às bacias vizinhas.

Por este motivo vem se ampliando a atenção dos Governos e Prefeituras locais na busca por maiores investimento em infraestruturas, principalmente obras de engenharia e programas sociais, por conta de alguns municípios já corresponderem, por excelência, a grandes pólos turísticos, comerciais, educacionais e industriais, caracterizando uma região potencialmente promissora ao desenvolvimento do estado. Atualmente, destaca-se a duplicação da Rodovia Federal Luiz Gonzaga BR-232, o Complexo Portuário de Suape e as obras assistenciais de saneamento básico nos maiores centros urbanos. O sistema rodoviário interligando os municípios das bacias vizinhas pode ser visto no Mapa VIII.3 (anexo).

A rodovia duplicada corta grande parte da bacia e serve de interligação entre os portos marítimos de Recife e Suape, ambos na RMR, com as demais regiões do Estado, canalizando traslado opcional e às vezes obrigatório no escoamento da produção, como exemplo: o Pólo gesseiro em Araripina e as atividades de fruticulturas em Petrolina, ambos no Sertão; as indústrias têxteis nos municípios de Caruaru, Toritama e Santa Cruz do Capibaribe no Agreste; as atividades

agropecuárias e de floriculturas também em vários municípios do Agreste; e finalmente, as Usinas de açúcar e Destilarias de álcool na Zona da Mata.

Ainda com relação ao sistema viário, é importante salientar a ferrovia que liga a capital ao município de Salgueiro, também cortando a bacia em sua maior parte, margeando o traçado descrito pela BR – 232. Apesar da mesma se encontrar em estado bastante avariado, a sua recuperação implicará em transporte alternativo, também favorecendo o desenvolvimento econômico da bacia.

Segundo SECTMA (1999), em um plano diretor de bacia hidrográfica os cenários são formulados com base nas constatações sobre os processos e tendências de evolução constatadas na área, bem como as ações planejadas pelos agentes públicos e privados que, quando implementadas, deverão ser capazes de modificar os processos sociais e econômicos em curso, alterando suas tendências históricas. As condições do ambiente externo, estadual, nacional, e mundial também influenciam e condicionam a evolução histórica da economia e das condições sociais da área em foco.

### III. 1.3 – Caracterizações climáticas e meteorológicas

Do ponto de vista geográfico, a Bacia do Rio Ipojuca começa no início do Sertão e tem sua maior parte situada no Agreste, passando pela Zona da Mata e terminando na faixa costeira do Litoral pernambucano, onde encontra o Oceano Atlântico para desaguar. As variações climáticas constatadas são responsáveis pelas modificações paisagísticas, as quais influenciam as diferentes ocorrências demográficas. As intensidades das chuvas decrescem à medida que se adentra no continente, contrastando com os índices evaporimétricos que passam a crescer.

O litoral e a Zona da Mata apresentam maiores índices de umidade relativa do ar, onde se pode constatar a existência de um clima quente e úmido. Na Zona da Mata, a predominância da floresta atlântica como vegetação nativa, encontra neste clima a favorabilidade de que necessita. As chuvas anuais médias são superiores a 1.000 mm na Zona da Mata e 2.000 mm nas áreas litorâneas, ambas com período chuvoso de março a agosto, onde são registrados de 75 a 80% do total anual. Pode-se ai constatar a influência da massa de ar tropical marítima, que em geral é instável e úmida. Além disso, essa região sofre a influência de penetrações de sistemas frontais do sul e perturbações atmosféricas de Leste.

Considerando o Agreste como um trecho intermediário, com totais anuais médios inferiores a 600 mm em alguns municípios, entre a Mata e o Sertão, é nele que se inicia o polígono das secas, principalmente no município de Gravatá, estendendo-se no sentido do Sertão, onde o clima semi-árido é bem caracterizado. É possível também observar a presença de microclimas de altitude em alguns municípios, onde as temperaturas são baixas em determinadas épocas do ano. Observa-se ai uma abundância da vegetação do tipo cactos e caatingas, por suas capacidades de resistirem às

longas estiagens. Na parte mais próxima do Sertão a contribuição da ZCIT é mais efetiva do que dos sistemas de leste, com período mais chuvoso de fevereiro a julho, com ocorrência de 67% da precipitação anual média. Nas áreas mais próximas da Zona da Mata, as contribuições dos sistemas de leste são mais importantes do que a ZCIT, com a estação chuvosa se estendendo de março até junho. A Figura III.3 apresenta o polígono das secas cortando o Estado de Pernambuco nas proximidades do município de Gravatá e sua abrangência na Região Nordeste.

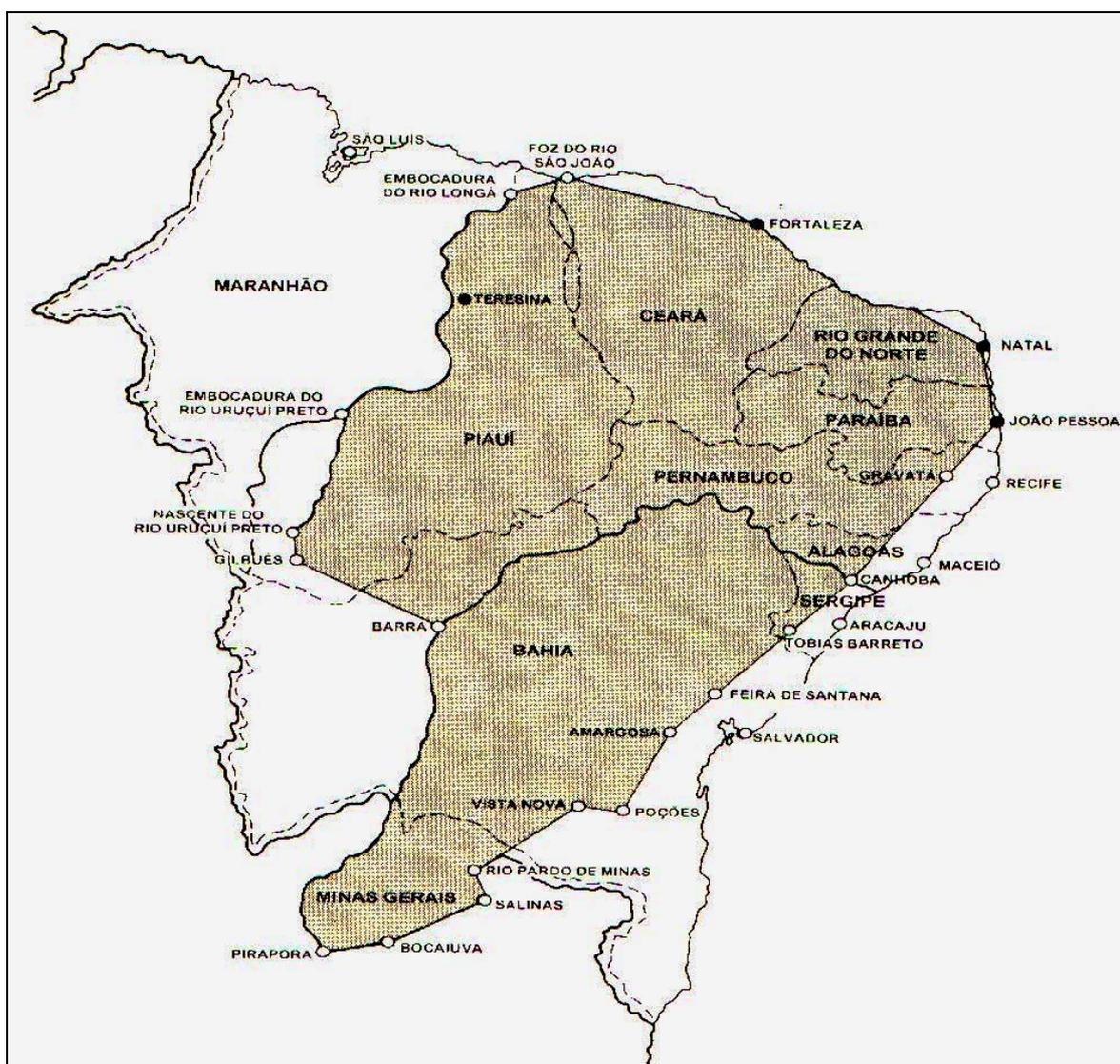


Figura III. 3 – Polígono das secas na Região Nordeste (CPRM, 1998)

O Agreste, por ser considerada uma região intermediária, entre os climas úmidos e secos, pode em algumas vezes assumir essas duas características. Sendo assim, a Bacia do Ipojuca é caracterizada por apresentar suas regiões mais chuvosas localizadas no Litoral e Zona da Mata, por ocasião da incidência direta e sem obstáculos dos sistemas meteorológicos dominantes vindos do oceano. A presença do Planalto da Borborema praticamente define duas regiões climáticas e regimes hidrológicos diferentes, provocados pela perda de umidade decorrente das precipitações precoces, estimuladas pelas altitudes, que se elevam no sentido leste-oeste. Esse fenômeno, conhecido como efeito orográfico da precipitação resulta na determinação de regiões mais secas, as quais caracterizam o Agreste.

Essa modificação climática implica em maiores ocorrências de chuvas frontais no Litoral e Zona da Mata, e convectivas no Agreste, como também determina maiores índices de evaporação no Agreste do que na Mata, e litoral. A constatação da irregularidade na distribuição das precipitações, observadas ao longo dos anos, vem causando à população dos municípios da bacia expectativas quanto à segurança e qualidade de vida, principalmente as localizadas nas margens do rio ou próximas delas, no que diz respeito às longas estiagens ou enchentes inesperadas.

A Figura III.4 mostra a repartição das precipitações anuais médias na Bacia do Ipojuca, do Agreste ao Litoral, tornando possível a observação das suas variações, através das ocorrências registradas ao longo de períodos recentes. A localização dos pontos de registros nos municípios e distritos da bacia estão apresentadas na Figura III.5.

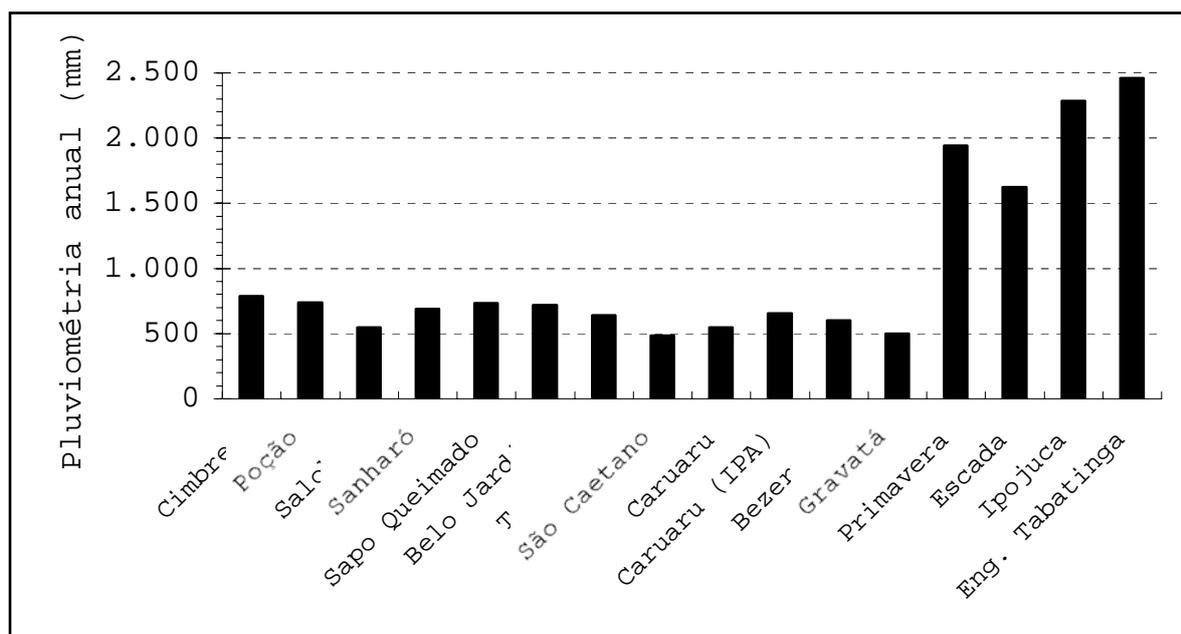


Figura III. 4 - Repartição das precipitações anuais médias na Bacia do Ipojuca (SECTMA, 2000).



Figura III. 5 – Mapa de localização de registros pluviométricos na Bacia do Rio Ipojuca.

### III. 1.4 - Uso do solo e vegetação

Dentre as principais atividades que ocupam o solo da Bacia do Ipojuca, pode-se afirmar que na Zona da Mata observa-se uma predominância da produção canavieira em relação às outras atividades. O pasto ocupa uma posição de destaque nos municípios de Sanharó, São Caetano, Pesqueira e Gravatá. Neste último pratica-se, além da pecuária, a olericultura juntamente com a floricultura e a mandioca. O Norte de Belo Jardim, Sul de São Caetano e Sudoeste de Caruaru, favorecem as hortas e pomares. No trecho entre São Caetano e Gravatá pode-se encontrar a cultura de campineira e hortaliças. Vale salientar que Caruaru é o município que apresenta a maior diversidade de produção no solo da bacia.

Quanto à vegetação nativa, a bacia comporta em sua maior parte a presença de espécies xerófilas, com abundância dos cactos e bromélias, caracterizando assim a região fitogeográfica da caatinga, onde se observa menor umidade.

Nas áreas de maiores elevações, conseqüentemente mais expostas aos ventos, nota-se a ocorrência de ecossistemas diferentes dos encontrados nas áreas mais baixas. Essas áreas de maior elevação são denominadas de brejos de altitude, onde se pode encontrar a presença de florestas serranas.

Nas regiões onde a umidade é mais elevada, pode-se encontrar, mesmo em proporções reduzidas por conta do antropismo, a presença da floresta tropical atlântica, enquanto na planície costeira predomina a vegetação que caracteriza os ecossistemas dos manguezais e restingas.

A SECTMA (1998) investigou através de imagens de satélites, as áreas de ocupação para diferentes classes de uso do solo e da vegetação no espaço interior da bacia, chegando às constatações apresentadas na Tabela III. 3.

Tabela III. 3 - Vegetação e uso do solo (SETCMA, 1998).

<b>USO DO SOLO E VEGETAÇÃO</b>	<b>ÁREA (KM<sup>2</sup>)</b>	<b>PERCENTUAL (%)</b>
Vegetação arbórea fechada	140,54	4,00
Açude	3,81	0,11
Solo exposto	403,90	11,50
Mangue	9,18	0,26
Oceano	0,59	0,02
Vegetação arbustiva arbórea fechada	224,08	6,37
Vegetação arbustiva arbórea aberta	19,19	0,54
Mata atlântica	176,37	5,02
Antropismo	1387,52	39,49
Canas de açúcar	1051,30	29,91
Área urbana	28,79	0,82
Uso não identificado:		
Nuvem	41,32	1,17
Sombra	27,71	0,79

Igualmente a outras bacias hidrográficas do Estado, a Bacia do Rio Ipojuca impõe como desafio um controle da qualidade de suas águas para atendimento aos usos múltiplos. Este fato decorre das más condições em que o solo é ocupado, tanto nas zonas urbanas como nas rurais, ambas apresentando implantação desordenada, acompanhada dos fatores naturais que também influenciam.

### III. 1.5 – Hidrografia e relevo

A ocorrência geológica pode ser considerada predominantemente cristalina por ocupar um percentual de 97% da área da bacia, restando 3% de áreas sedimentares onde dominam os depósitos aluviais. Quanto ao relevo, a Bacia do Ipojuca apresenta características heterogêneas.

Segundo SECTMA (1998), na parte leste da bacia correspondente à planície costeira, as altitudes não ultrapassam 100m, podendo-se observar nas proximidades dos municípios de Chã Grande e Gravatá, onde a bacia é cortada pelo planalto, um conjunto de morros e colinas dispostos sobre o cristalino com elevações perto de 300 m, modificando o relevo para um patamar mais elevado no sentido oeste.

Na parte oeste, localizada entre o planalto e as proximidades do município de Belo Jardim, a bacia apresenta superfícies relativamente planas, com altitudes entre 400 a 700 m. Os municípios de Belo Jardim, Sanharó, Pesqueira e Poção, constituem as mais elevadas superfícies da bacia, com cotas altimétricas que variam entre 800 a 1.100m. Os detalhes altimétricos da bacia estão apresentados no Mapa VIII.4 (anexo).

O Rio Ipojuca percorre uma extensão de 294,00 km, desde sua nascente nas encostas da Serra do Pau D'arco, localizada nas proximidades do município de Arcoverde, a uma altitude cerca de 900 m, até sua foz no Litoral Sul pernambucano, especificamente nas regiões estuarinas do distrito de Suape, pertencente ao município de Ipojuca. Seu principal afluente é o Riacho Liberal, cuja

nascente está localizada nas encostas da Serra do Buco, no município de Venturosa, em uma altitude de aproximadamente 1.000 m, onde começa a drenar uma extensão de 36 km, passando pelos municípios de Alagoinha, Pesqueira e Sanharó, até desaguar no Rio Ipojuca, cerca de 6 km à jusante da sede municipal de Sanharó. A Figura III. 6 mostra o perfil longitudinal do Rio Ipojuca, desde sua nascente até a desembocadura no Oceano Atlântico.

A malha hidrográfica da Bacia do Rio Ipojuca pode ser considerada razoavelmente densa, compreendendo os afluentes pela margem direita: Riacho Liberal, Riacho Papagaio, Riacho Pau Santo e Rio do Mel, e pela margem esquerda: Riacho Ângelo Novo, Riacho da Onça, Riacho dos Mocós, Riacho do Meio e Riacho Pata Choca. O rio principal corta diversas sedes municipais destacando-se: Belo Jardim, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Escada e Ipojuca. O regime fluvial torna-se perene a partir de Caruaru, com vazões mínimas e máximas na ordem de 0,80 e 70,0 m<sup>3</sup>/s nas proximidades de Gravatá. Seu estuário foi bastante alterado nos últimos anos em decorrência da implantação do Complexo Portuário de Suape. A Malha hidrográfica de drenagem superficial está apresentada no Mapa VIII.3 (anexo).

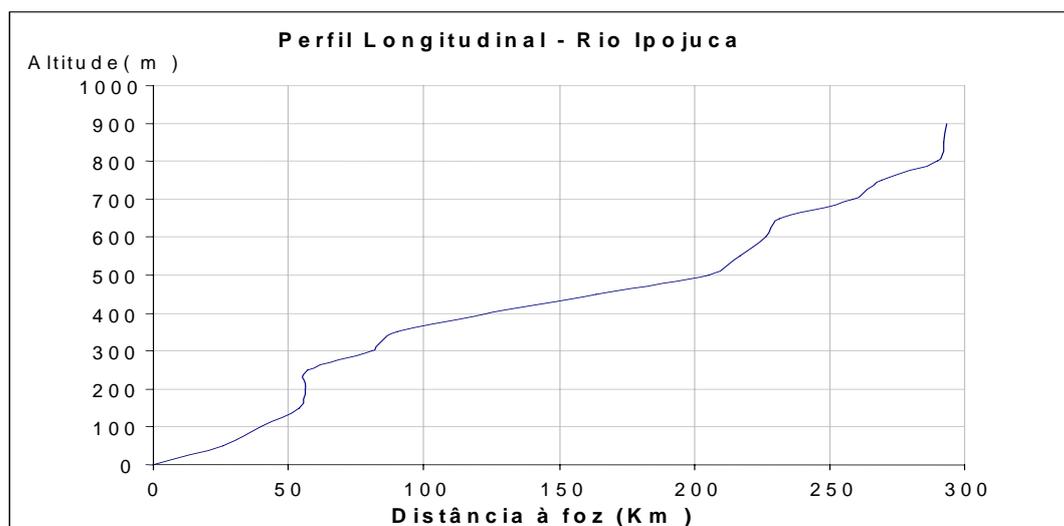


Figura III. 6 - Perfil longitudinal do Rio Ipojuca (CPRM, 2002).

Como característica de bacias hidrográficas alongadas tem-se um baixo valor para seu fator de forma. Essa condição torna a Bacia do Ipojuca menos sujeita à inundações, uma vez que esse fator pode constituir um indicativo da maior ou menor tendência para enchentes em uma bacia. Entretanto, pelo fato de predominar uma formação geológica cristalina, a capacidade de infiltração é reduzida, resultando em maiores vazões superficialmente escoadas, condição que favorece as inundações.

*CAPÍTULO IV*

*MATERIAIS E MÉTODOS*

#### **IV. 1 – Definição de uma rede pluviométrica específica na Bacia do Ipojuca**

Com o objetivo de atender à aplicação dos diversos métodos aqui escolhidos para avaliação da rede pluviométrica e análise da variabilidade espacial da precipitação na Bacia do Ipojuca, foi necessário identificar uma rede que fosse específica à utilização da metodologia definida. Com este propósito achou-se importante conhecer o comportamento passado e atual das práticas de medições de chuvas na bacia, através das investigações que constituíram um diagnóstico, o qual resultou na definição da rede específica desejada. Sendo assim, o conhecimento das dimensões das redes existentes e seus funcionamentos passaram a ser o marco inicial deste trabalho. Com isto, os aspectos históricos, as instituições atualmente responsáveis pelas operações das redes, as configurações espaciais, os tempos de observação e as condições dos dados gerados, constituíram as bases principais para esta investigação.

##### **IV. 1.1 – Diagnóstico pluviométrico**

Para identificação das instituições operadoras de redes pluviométricas na bacia, partiu-se por selecionar os órgãos públicos com atuação em monitoramento hidrológico, segundo alguns critérios adotados, como sendo:

- Ser uma instituição pública de qualquer esfera governamental;
- Apresentar continuidade de operação ao longo do tempo demonstrado através das séries hidrológicas;
- Apresentar qualidade nas informações produzidas;
- Demonstrar participação em projetos, programas e planejamentos, entre outros serviços solicitados pela sociedade de um modo geral, pelos profissionais da área, empresas de engenharia e estabelecimentos de ensino e pesquisas.

Para seleção das instituições foram priorizados os pluviômetros localizados no interior da bacia. Não houve também distinção entre os diferentes tipos utilizados pelas instituições. Sendo assim, os pluviômetros ou pluviógrafos, independentemente das formas convencionais, automáticas ou telemétricas que foram previstos, foram reconhecidos de uma forma geral como estações pluviométricas, uma vez que a maneira pela qual se coleta o dado não influenciará este diagnóstico.

Ao reunir os órgãos selecionados e submetê-los aos critérios adotados foi possível identificar a SECTMA, a CPRM e o IPA como as instituições operadoras que melhor corresponderam. Este levantamento pode ser considerado atualizado, uma vez que foi concluído no ano de 2004. As Figuras IV.1, IV.2 e IV.3 mostram algumas estações em operação na Bacia do Rio Ipojuca. A Tabela IV.1 apresenta a relação dessas estações, todas em operação simultânea no interior da bacia, suas coordenadas geográficas, os municípios de localização e as instituições operadoras. A Figura

IV.4 apresenta o mapa da distribuição espacial das estações e suas respectivas instituições operadoras. As características destas instituições em relação aos serviços prestados à sociedade são:

- **SECTMA** – Secretaria do Governo de Pernambuco, entre outras atribuições, exerce a política de recursos hídricos e meio ambiente, inclusive o serviço meteorológico. Sua rede é baseada na antiga configuração estabelecida pela extinta SUDENE, soma hoje 222 estações pluviométricas convencionais e telemétricas, gerando informações para compor o SIRH-PE. Parte destas estações é pertencente a outros órgãos operadores, cujas localizações correspondem ao seu interesse. A maior parte das observações é realizada diariamente às 6 horas e conta com o apoio da PMPE e CODECIPE.
- **CPRM / SGB** – Empresa pública vinculada ao MME, exerce o Serviço Geológico do Brasil e opera a Rede Hidrometeorológica Básica Nacional, através de convênio de cooperação técnica estabelecido com a ANA. As informações hidrológicas são coletadas, tratadas e enviadas para compor o SINRH, onde são disponibilizadas pela ANA. Em Pernambuco são operadas 40 estações pluviométricas convencionais, cujas leituras são realizadas diariamente às 7 horas através de observadores locais, sem vínculos empregatícios embora sujeitos a gratificações mensais pelos serviços.
- **IPA** – Empresa do Governo de Pernambuco, integra o Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária coordenado pela Embrapa. Tem por missão viabilizar soluções para o desenvolvimento sustentável do agronegócio pernambucano, por meio de geração, adaptação e transferência de conhecimento e tecnologia, em benefício da sociedade. A EBAPE, recentemente extinta, teve sua estrutura física e organizacional incorporada a este instituto, inclusive a sua rede pluviométrica, transferindo 70 pluviômetros, perfazendo agora um total de 82 estações, cujas observações são realizadas diariamente pela manhã pelos funcionários desta empresa. Alguns dos seus espaços físicos receberam instalações de plataforma de coleta de dados instaladas pela SECTMA.

Em 1985 foram operadas 25 estações pluviométricas na Bacia do Ipojuca através da SUDENE, EBAPE e IPA. Nesta época a SUDENE operava 263 estações em todo Estado de Pernambuco, das quais 12 destas pertenciam à Bacia do Ipojuca (SUDENE, 1990).

Através de um convênio de cooperação técnica e por motivo do redimensionamento no seu planejamento, a SUDENE repassou a responsabilidade da maior parte da administração da sua rede para o Governo do Estado de Pernambuco. Indispondo de dotações orçamentárias suficientes para manutenção e operação, principalmente o pagamento dos observadores, este permitiu que muitas estações fossem desativadas e outras deslocadas, para áreas de órgãos do Governo onde as observações pudessem ser realizadas sem ônus. No entanto, tornou-se incontestável o

reconhecimento do seu esforço quanto à continuidade das ações, através da constatação de novas instalações em todo o Estado, inclusive de estações telemétricas.

A CPRM, na época vinculada ao DNAEE, iniciou em 1986 a operação de 3 estações na Bacia do Ipojuca, todas procedentes da rede da SUDENE, que continuam sendo operadas em mesma quantidade, desta vez vinculadas à ANA, desde 2001. O IPA e a EBAPE mantiveram também o mesmo número de estações, porém, a partir de 2003 tiveram seus pluviômetros somados, em consequência da fusão dos órgãos. Neste caso, o IPA recebeu 12 estações da EBAPE perfazendo um total de 13 em operação na bacia.

Antes do repasse das estações da SUDENE para o Governo do Estado, no início da década de 90, já se poderia observar algumas estações desativadas durante a década de 70, como: Xucuru, Tabocas, Ipojuca e duas estações em Caruaru. Uma dessas estações de Caruaru, juntamente com Poção e Sanharó, constaram na relação das estações repassadas para Rede Hidrometeorológica Nacional na década de 80, sendo o DNAEE o órgão receptor das mesmas, cuja operação até hoje vem sendo realizada pela CPRM.

O IPA e o LAMEPE, laboratório meteorológico do ITEP, hoje vinculado à SECTMA, recuperaram algumas estações provenientes da SUDENE, desativadas após o repasse, embora promovendo deslocamentos de localização e interrupções das séries durante o intervalo de reinstalação, sendo elas as seguintes: Gravatá, Bezerras, São Caetano, Tacaimbó e Belo Jardim.

Apesar das estações de Caruaru, Poção e Sanharó terem assegurado a continuidade de operação pela CPRM, também reativaram essas mesmas estações, duplicando o monitoramento, também sujeitas a deslocamentos e interrupções de séries. Todas essas estações reativadas tiveram suas localizações fixadas nos estabelecimentos da CODECIPE, nas áreas urbanas dos municípios, e são até hoje operadas pelos funcionários da PMPE. Este motivo explicou o fato das recuperações das estações terem ocorrido exclusivamente nas áreas urbanas, dentro ou na periferia das sedes municipais. As estações de: Escada e Primavera não foram recuperadas, assim como Salobro e Cimbres, situadas no município de Pesqueira.

Pode-se ainda constatar algumas estações instaladas pela SECTMA, que por diversos motivos não tiveram continuidade nas observações, como: Distrito de Cajazeiras em 2001 (Belo Jardim); Eng. Gercino Pontes – PCD em 2000 (Caruaru); Ipojuca – PCD em 1999 (Ipojuca) e; Mutuca em 2000 (Pesqueira). Outras que foram instaladas e estão em funcionamento: Fazenda Mulungu, Fazenda Quixaba, e Fazenda Curral Velho em 2001 (Arcoverde); Caruaru – PCD em 1999 (Caruaru) e; Chã Grande em 1993 (Chã Grande). Para os serviços meteorológicos em Pernambuco, a SECTMA, através do LAMEPE, utiliza também as observações realizadas em estações de outros órgãos sob forma de consultas. Como exemplo, na Bacia do Ipojuca, pode-se então apontar as

estações de Escada e Caruaru do IPA, Açude Bituri da COMPESA e Primavera da USINA PRIMAVERA.



Figura IV. 1 - Estação pluviométrica com pluviômetro convencional, sem cercado, operado pela SECTMA em 2004, no município de Sanharó



Figura IV. 2 - Estação meteorológica com pluviômetro telemétrico (PCD), operado pela SECTMA em 2004, no município de Caruaru



Figura IV. 3 – Estação Pluviométrica com pluviômetro convencional, com cercado, operado pela CPRM em 2004, no município de Poção.

Tabela IV. 1 - Estações pluviométricas operadas na Bacia do Rio Ipojuca no ano de 2004.

Posição na Figura IV.4	Município	Estação	Coordenadas em UTM		Instituição operadora
			Longitude	Latitude	
1	Ipojuca	Ipojuca	9070880.57	272893.12	IPA
2	Escada	Escada	9074926.27	254049.83	IPA
3	Primavera	Primavera	9088607.21	228712.25	IPA
4	Chã Grande	Chã grande Chã grande	9078075.82 9087994.74	240716.53 229083.48	IPA SECTMA
5	Gravatá	Gravatá Gravatá	9044816.02 9093183.76	230365.07 218332.61	IPA SECTMA
6	Bezerros	Bezerros Bezerros	9092499.87 9087752.77	189636.90 196714.97	IPA SECTMA
7	Caruaru	Est. Experimental Caruaru Caruaru- PCD Caruaru Caruaru	9088189.75 9088218.95 9088178.60 9081846.83 9081377.96	180263.41 811374.42 178731.85 170814.56 830192.71	IPA IPA SECTMA SECTMA CPRM
8	São Caetano	São Caetano São Caetano	9078628.28 9078259.55	815317.99 815284.70	IPA SECTMA
9	Tacaimbó	Tacaimbó Tacaimbó	9079670.28 9080040.02	798329.56 798209.60	IPA SECTMA
10	Belo Jardim	Belo Jardim Belo Jardim	9077921.01 9076721.57	784080.00 784164.01	IPA SECTMA
11	Sanharó	Sanharó Sanharó Sanharó	9074792.83 9074977.82 9074453.22	768446.95 768356.27 768689.74	IPA SECTMA CPRM
12	Poção	Poção Poção Poção	9094248.51 9094648.74 9094035.13	752948.33 752828.12 752640.89	IPA SECTMA CPRM
13	Arcoverde	Faz. Curral Velho Faz. Quixaba Faz. Mulungu	9080679.50 9081408.32 9080910.61	744850.10 729488.16 724741.39	SECTMA SECTMA SECTMA

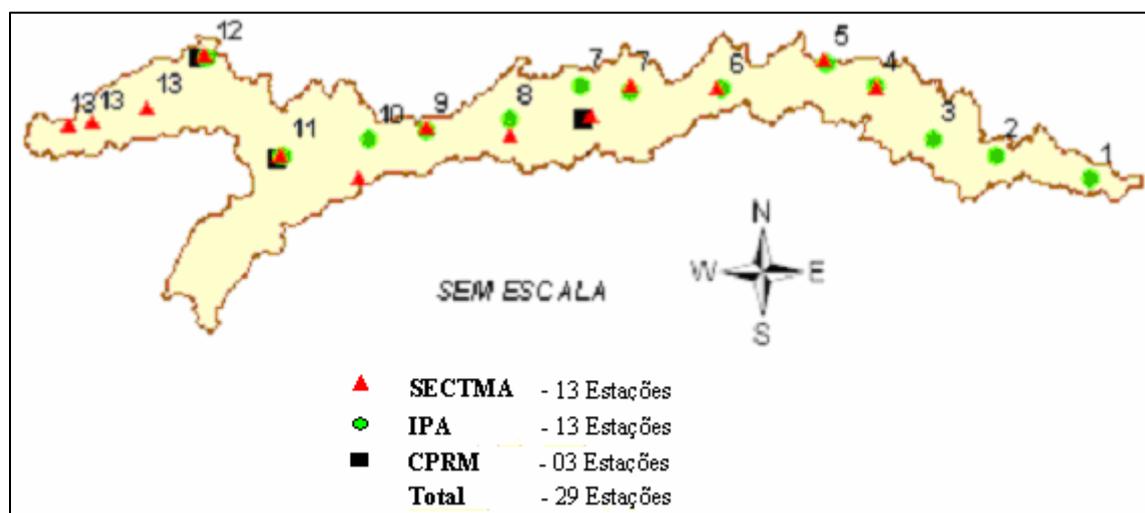


Figura IV. 4 – Rede pluviométrica operada na Bacia do Ipojuca em 2004.

Constata-se então uma distribuição espacial bastante irregular. A falta de uniformidade nas distâncias entre as estações, não só pelas grandes distâncias, mas pelas concentrações de pluviômetros, na maioria das vezes pertencentes a duas ou três instituições diferentes, revela a falta de integração entre as instituições nas ações inseridas no contexto da gestão dos recursos hídricos. Tais concentrações, por terem ocorrido em áreas urbanas ou nas periferias delas, poderiam ser vistas como uma condição tecnicamente correta, como suporte ao desenvolvimento urbano, caso suas distâncias tivessem sido planejadas. Na verdade, o que se nota é o descaso por parte das instituições quanto ao planejamento das redes. O que acontece é que as instituições operam independentemente, sem que haja pelo menos por parte de cada uma, consultas prévias às demais, no ato de alguma eventual ampliação de rede.

Os problemas incorrem, principalmente, na produção de dados muito próximos em detrimento às áreas conseqüentemente desprovidas de cobertura pluviométrica, e em seguida, nos desperdícios financeiros, quanto à instalação, manutenção e operação dos equipamentos, que exigem custos previstos nos orçamentos, resultando, na maioria das vezes, em geração de dados com valores iguais ou muito parecidos. Tais fatos se devem à imprevidência por parte das instituições quanto à obediência à Lei federal nº 9.433/97 e Estadual nº 11.426/97.

A ANA (2002) destacou: “É certo que algumas entidades não tomaram ciência do novo enfoque que foi dado ao monitoramento dos recursos hídricos após a Lei 9.433/97. Essas entidades realizam o monitoramento como ação individualizada, e por vezes secreta, onde o acesso às informações é dado como impossível. A esta deve ser dado um especial tratamento para que haja a conscientização de que a gestão deve ser feita de maneira compartilhada como é citada na Lei”.

Outras deficiências estão na falta de coordenada geográfica obtida por meio de instrumento preciso, como o GPS, além da utilização de equipamento de medição de pouca precisão fabricado em material plástico por parte da EBAPE. Para locação dessas estações neste trabalho foi necessário considerar as coordenadas das sedes municipais onde estão localizadas.

Ainda sobre o aspecto qualitativo pode-se atribuir a SECTMA uma perda da confiabilidade nas anotações dos boletins pluviométricos pelos profissionais dos outros órgãos do Estado. Observa-se também que o IPA só dispôs de uma estação, uma vez que o repasse efetuado pela EBAPE apresentou séries inconsistentes e localizações imprecisas. A CPRM apresentou uma quantidade insuficiente de estações e a SECTMA curtos períodos de observação.

#### **IV. 1.2 – Escolha da instituição operadora**

Considerando os requisitos exigidos pela metodologia constatou-se que as redes das instituições escolhidas no diagnóstico para representar a bacia, ainda não correspondiam às condições

tecnicamente necessárias à aplicação dos métodos. Esta decisão decorreu durante a verificação de alguns requisitos fundamentais, tais como:

- Os números de estações operadas por cada instituição;
- As qualidades das séries estatísticas e a facilidade de acessá-las;
- Os tamanhos e as simultaneidades nos períodos de observação em cada estação;
- As regularidades nas configurações espaciais;
- As localizações geográficas através de coordenadas precisas.

Verificado estes requisitos e visando a necessidade de se estabelecer a rede específica, decidiu-se por definir a Rede Hidroclimática da SUDENE como a rede desejada, desde que sujeita às alterações necessárias a sua adaptação. Observou-se então que as décadas de 1960 a 1990 foram os períodos em que a SUDENE mais se destacou na formação de séries de dados hidrológicos necessárias ao desenvolvimento desta pesquisa. Além das estações escolhidas dentro da bacia, consideraram-se agora aquelas mais próximas, cujo critério viessem a se correlacionarem com as demais, aumentando assim o número de pontos para aplicação da metodologia.

#### **IV. 1.3 – Seleção das estações e formação do banco de dados pluviométricos**

Visando a melhor adaptação da Rede da SUDENE aos requisitos verificados, priorizou-se a maximização do aproveitamento das estações através de uma seleção minuciosa. Para isto foi necessária considerar algumas estações que funcionaram no passado, admitindo-as hipoteticamente ativadas, como também o não aproveitamento de outras, que por sua vez, apresentaram pouco tempo de funcionamento. Este procedimento se assemelhou ao estudo de PAIVA (2001), que ao avaliar a estrutura espacial da rede pluviométrica da Bacia do Rio Ibicui, considerou as séries históricas das estações que haviam sido desativadas e tinham períodos de observação suficientes para a análise.

Com o intuito de constituir normais climatológicas para as estações escolhidas, os períodos foram fixados em 30 anos de observação. Este procedimento resultou na seleção de 24 estações, as quais compuseram a rede específica, sendo 13 ocorridas dentro da bacia e 11 nas suas proximidades. A Figura IV.6 mostra os períodos considerados para as 24 estações escolhidas.

As séries hidrológicas mensais foram adquiridas através da CPRM / SGB, as quais serviram ao projeto de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 39 – Bacias Litorâneas de Pernambuco e Alagoas. Para o estabelecimento dos padrões desejáveis, essa Companhia utilizou um *software* específico do Programa de Homogeneização de dados – PROHD, denominado HIDRO-PLU, o qual tratou do preenchimento das falhas e consistência dos dados através do método de regressão linear (HOLANDA & OLIVEIRA, 1979). Esses dados puderam assim constituir normais climatológicas entre as décadas de 1960 à 1990. Considerando as variáveis hidrológicas que serão analisadas na

bacia, foi necessário reunir as informações requerentes e organizá-las sob forma de banco de dados, conforme a Tabela IV.2. A Figura IV.5 apresenta o mapa da distribuição espacial da rede específica

Tabela IV. 2 - Banco de dados hidrológicos.

Posições na Figura IV. 5	Estação	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Precipitação anual média (mm)	Coefficientes de Irregularidade
1	Ipojuca	-35,070	-8,400	30,00	2311,36	1,93
2	Escada	-35,233	-8,367	93,00	1753,56	2,55
3	Primavera	-35,350	-8,350	156,00	2082,49	1,81
4	Pombos	-35,383	-8,150	290,00	923,75	3,77
5	Amaraji	-35,450	-8,383	295,00	2065,80	1,91
6	Russinha	-35,467	-8,167	390,00	824,06	3,57
7	Gravatá	-35,567	-8,217	447,00	662,64	3,07
8	Bezerros	-35,750	-8,233	471,00	589,93	2,96
9	Barriguda	-35,867	-8,100	400,00	511,24	4,80
10	São Joaquim	-35,850	-8,417	501,00	967,92	2,38
11	Caruaru	-35,933	-8,283	545,00	638,55	5,21
12	Caropótós	-36,067	-8,133	501,00	453,14	4,63
13	São Caetano	-36,150	-8,317	552,00	490,62	2,51
14	Tacaimbó	-36,300	-8,317	570,00	656,13	7,02
15	Serra do Vento	-36,367	-8,233	684,00	740,10	4,44
16	Belo Jardim	-36,450	-8,333	616,00	745,03	3,43
17	Sanharó	-36,567	-8,367	653,00	629,14	4,73
18	Lagoa do Felix	-36,567	-8,167	770,00	473,78	4,99
19	Salobro	-36,700	-8,617	793,00	548,84	3,63
20	Pesqueira	-36,700	-8,400	650,00	715,41	4,32
21	Poção	-36,700	-8,183	1.035,00	752,23	3,62
22	Alagoinha	-36,817	-8,483	762,00	596,38	3,31
23	Cimbres	-36,850	-8,340	850,00	803,03	5,36
24	Arcoverde	-37,067	-8,433	663,00	723,87	3,06

#### IV. 1.4 – Configuração da rede específica

Com o banco de dados constituído foi possível elaborar o mapa da distribuição espacial das estações escolhidas para compor a rede específica, com o auxílio do programa ArcGis.

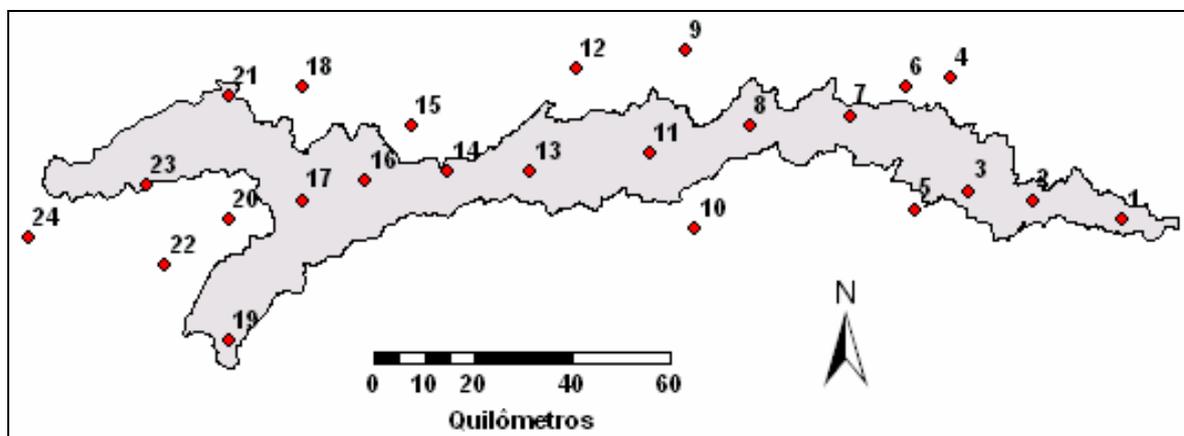


Figura IV. 5 – Rede pluviométrica específica.



**IV. 1.5 – Determinação dos parâmetros estatísticos e análise de freqüências**

Os valores estatísticos foram determinados a partir das séries históricas das variáveis utilizadas. As precipitações anuais médias resultaram da média aritmética dos totais anuais para cada série de dados observados em cada estação. A Figura IV.7 mostra o comportamento das precipitações máximas anuais médias, médias anuais médias e mínimas anuais médias. Os coeficientes de irregularidade decorreram das razões matemáticas entre os valores das precipitações máximas e mínimas em cada estação, enquanto as altitudes foram fornecidas por SUDENE (1990). Ainda com base nessas séries foi possível determinar os parâmetros estatísticos importantes para as análises desejadas.

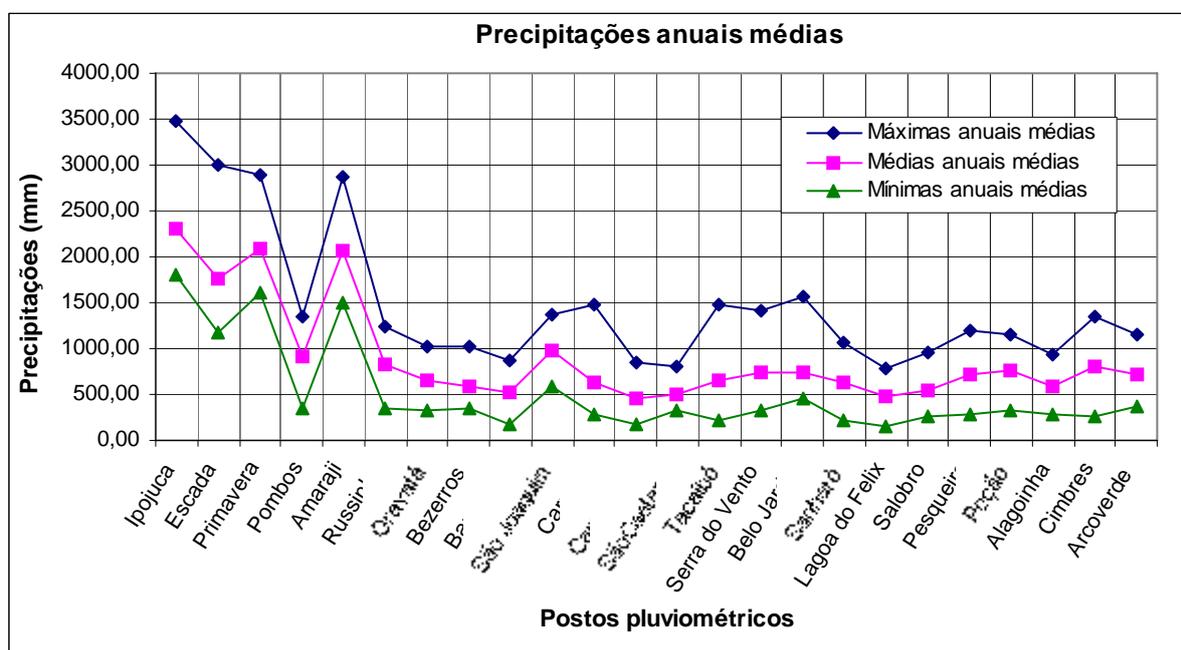


Figura IV. 7 – Gráfico das precipitações máximas, médias e mínimas das séries anuais médias em cada estação.

Para avaliar o comportamento pluviométrico com base na estatística, considerando as estações escolhidas para compor a rede, foi necessário analisar a distribuição das freqüências dessas variáveis, através das dispersões observadas nos gráficos de distribuição. Com os gráficos elaborados, foi possível testar os ajustes necessários à distribuição normal e log-normal, sendo a seleção do melhor ajuste feita por análise visual.

Esse teste do ajuste à distribuição normal, ou sua transformação logarítmica, é necessário quando se pretende aplicar metodologia geoestatística. Testes estatísticos também poderiam ser realizados para esse fim. No entanto, optou-se por uma avaliação simplificada, a qual resultou na transformação log-normal para as precipitações anuais médias e coeficientes de irregularidade, enquanto as altitudes tiveram a distribuição normal como melhor alternativa.

Johnston *et al.* (2001) destacaram que certos métodos geostatísticos funcionam melhor se os dados forem aproximadamente normalmente distribuídos. Dentre eles o kriging ordinário assume que os dados vêm de uma distribuição normal. O método de kriging também se baseia na hipótese de estacionaridade. Essa hipótese requer, em parte, que todos os valores da variável pertençam a distribuições que têm a mesma variabilidade. Os autores destacam ainda que freqüentemente se observa na natureza, que quando os valores de uma variável crescem também são notadas variâncias mais elevadas. Por isso, pode ser necessário promover transformações nos dados de modo que se aproxime mais da distribuição normal. Essa mesma transformação muito provavelmente produzirá variância constante na área em estudo.

Para as análises visuais da normalidade utilizaram-se como elementos as flutuações dos pontos que caracterizaram as representações lineares. Os parâmetros estatísticos calculados, principalmente as aproximações dos valores das médias e medianas, também contribuíram. A Tabela IV.3 apresenta os parâmetros estatísticos para as distribuições normal e log-normal das variáveis. As Figuras IV.8 a IV.13 apresentam os gráficos das distribuições normal e log-normal para todas as variáveis.

Tabela IV. 3 – Estatísticas obtidas na Distribuição normal e log-normal das variáveis.

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DE FREQUÊNCIAS	VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS					
	PRECIPITAÇÃO ANUAL MÉDIA (mm)		COEFICIENTE DE IRREGULARIDADE		ALTITUDE (m)	
	Normal	Log-normal	Normal	Log-normal	Normal	Log-normal
Nº pontos medidos	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00	24,00
Máxima	2311,40	7,74	7,02	1,9	1035,00	6,94
Média	902,42	6,68	3,70	1,25	529,88	6,08
Mínima	453,14	6,12	1,81	0,59	30,00	3,40
Desvio padrão	547,90	0,47	1,28	0,35	243,25	0,78
Variância	300194,41	0,22	1,64	0,13	5917,56	0,61
Mediana	719,64	6,58	3,95	1,28	548,50	6,31
Curtose	4,24	3,29	3,03	2,35	2,77	7,16
Assimetria	1,66	1,17	0,53	0,22	-0,23	-2,06

Considerando que a estatística auxilia a compreensão dos fenômenos naturais, observou-se nos gráficos referentes às precipitações, que as dispersões se concentraram em grupos setorizados, possibilitando a identificação das sub-regiões geográficas da bacia, comprovando assim a existência da sua irregularidade hidrológica.

A desuniformidade pluviométrica constatada nessas sub-regiões, identificando diferentes caracterizações climáticas, motivou a divisão da bacia em duas partes, com o intuito de torná-las mais homogêneas e assim minimizar os desvios observados, principalmente no lado do Litoral e Zona da Mata, tomando como referencial o polígono das secas. Porém, a insuficiência de informações pluviométricas no Litoral e Zona da Mata não permitiu a adoção dessa abordagem.

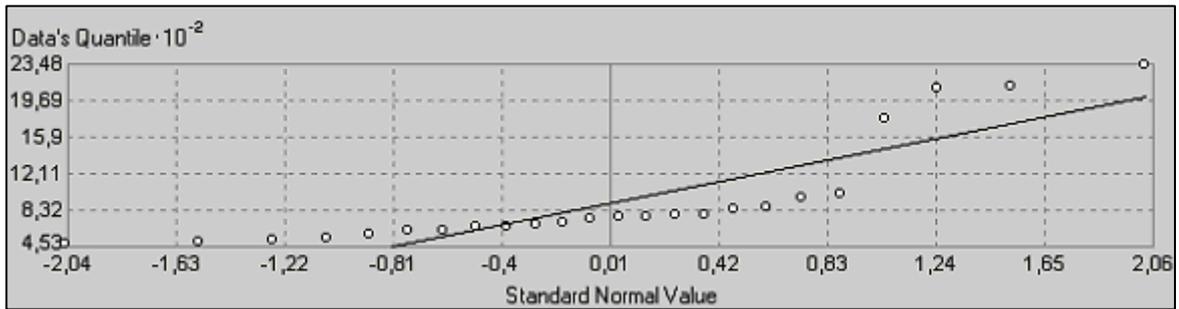


Figura IV. 8 – Distribuição normal das precipitações anuais médias.

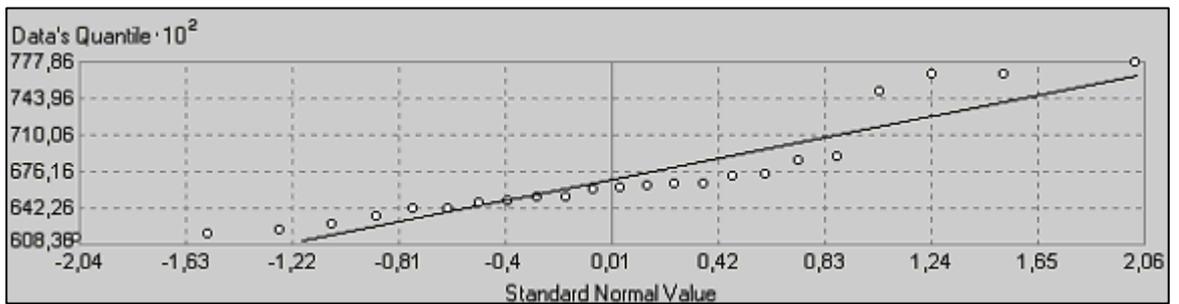


Figura IV. 9 – Distribuição log-normal das precipitações anuais médias.

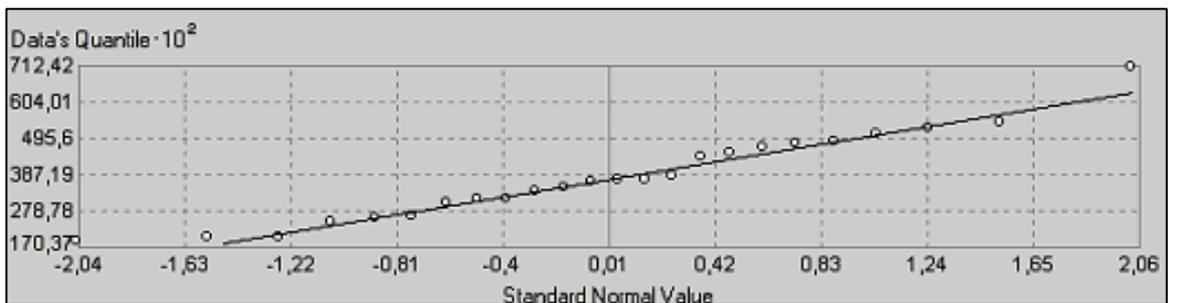


Figura IV. 10 – Distribuição normal dos coeficientes de irregularidade.

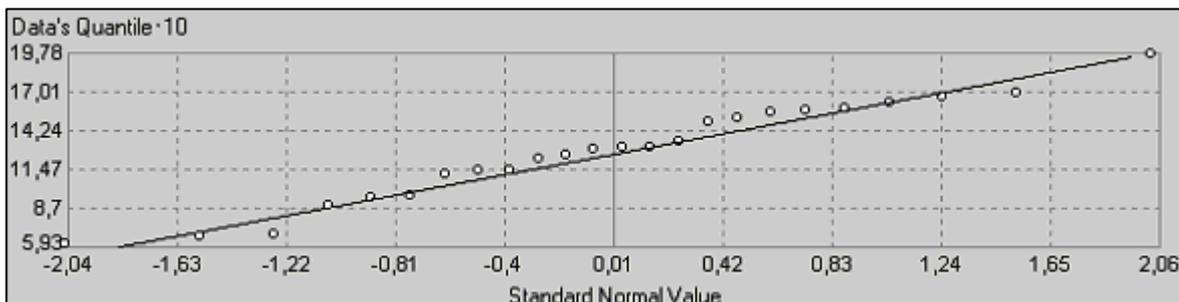


Figura IV. 11 – Distribuição log-normal dos coeficientes de irregularidade.

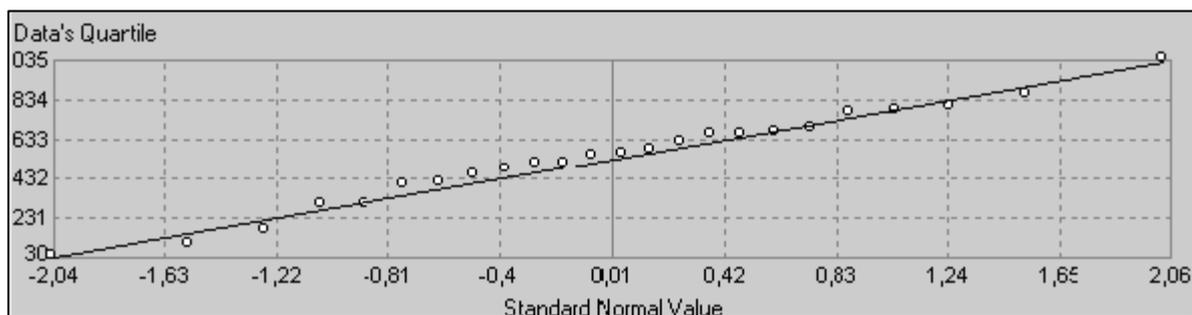


Figura IV. 12 – Distribuição normal das altitudes.

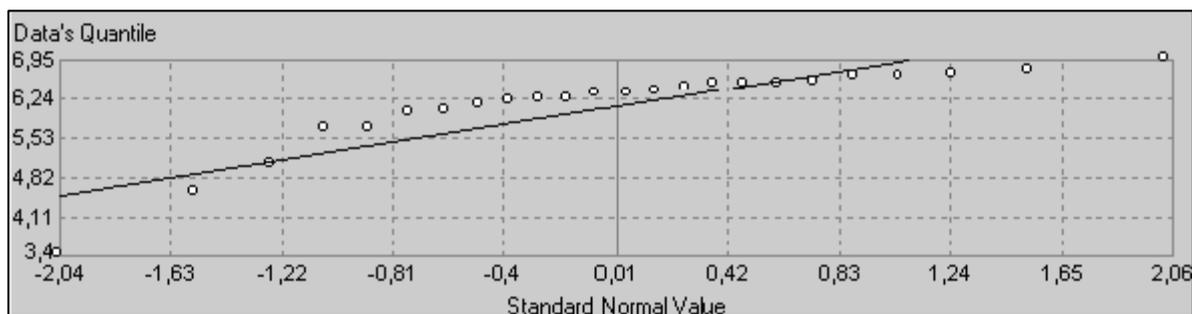


Figura IV. 13 – Distribuição log-normal das altitudes.

#### IV. 1.6 – Determinação dos coeficientes de variação espacial e temporal

De um modo geral, os fenômenos hidrológicos são considerados aleatórios no tempo e no espaço. Com isto a previsão de suas ocorrências não pode ser considerada um fator determinístico. A Engenharia de recursos hídricos utiliza as estatísticas dos seus registros como ferramenta específica para, além de outras finalidades, conhecer as variabilidades espaciais e temporais desses fenômenos. Para isto devem ser conhecidos os valores dos coeficientes de variação, os quais pode ser resultante da razão matemática entre o desvio padrão e a média das precipitações em cada estação pluviométrica e cada ano de observação.

Considerando as normais climatológicas entre as décadas de 1960 a 1990, que resultou na formação do banco de dados, foi possível observar que das 24 estações selecionadas, 20 tiveram suas instalações em 1963 e 4 em 1967. Por este motivo considerou-se para esta análise o período de 26 anos, entre 1967 e 1992, com fins de se estabelecer um período comum entre as séries. Com isto foi possível calcular os coeficientes de variação espacial e temporal da precipitação para cada estação pluviométrica em todos os anos do período estabelecido. A Tabela VIII.1 (ANEXO) apresenta os coeficientes de variação espacial e temporal.

Conhecidos os valores dos coeficientes de variação espacial constatou-se que na bacia há anos com maior e outros com menor variabilidade espacial para todo o período. Com isto identificaram-se os anos com máxima variação espacial, média e mínima, segundo os coeficientes de 81,8% para a máxima, 64,1% para a média e de 45,6% para a mínima, correspondentes aos anos de 1982, 1968

e 1985. Quanto à variabilidade temporal observou-se no mesmo período que os coeficientes de variação temporal variaram de 15%, 29% e 40%, para baixa, média e alta variabilidade temporal.

## **IV. 2 – Metodologias mais utilizadas para avaliação de redes pluviométricas e análise da variabilidade espacial da precipitação**

### **IV. 2.1 – Recomendações da Organização Mundial de Meteorologia**

Com o objetivo de avaliar a densidade pluviométrica da rede sobre a área da bacia estudada, foram efetuadas três diferentes aplicações dos modelos publicados pela OMM. A primeira e a segunda referiram-se às publicações nº 168, enquanto a terceira à publicação nº 15.

1) *Recomendações nº 168 da OMM* (procedimento original) WMO (1984) - Baseada nos limites de densidades para uma rede mínima recomendados em três categorias regionais diferentes, a Bacia do Ipojuca se enquadrou na primeira divisão, considerando-se uma região plana de zona temperada, mediterrânea e tropical. Para esta categoria foi recomendado como limite superior para uma rede mínima, o intervalo de 600 a 900 km<sup>2</sup> para cada estação pluviométrica. Conhecido o valor da área da bacia e o total das estações, foi possível determinar a densidade pluviométrica e compará-la aos limites recomendados.

2) *Recomendações nº 168 da OMM* (procedimento revisado) WMO (1994) - Visando melhorar a precisão dos limites de densidades pluviométricas para uma rede mínima, a OMM elaborou um novo procedimento, constando agora de sete unidades fisiográficas diferentes. Para aplicação do modelo citado, observou-se a necessidade de dividir a bacia em partes, para melhor compatibilizar as características da bacia com as unidades fisiográficas que compõe o modelo.

Considerando as variáveis que compõem a fisiografia da Bacia do Ipojuca e a necessidade de adequá-las às características oferecidas pela publicação, decidiu-se dividi-la em duas partes, uma vez que ambas apresentam tais características bem definidas. As unidades fisiográficas costeiras e planas / interiores, constantes nessa publicação, enquadraram essas duas partes segundo os intervalos mínimos permitidos, correspondentes a 900 e 575 km<sup>2</sup> por estação.

Para determinação da linha divisória, por ocasião da divisão da bacia em duas partes, observou-se a necessidade de encontrar um referencial que caracterizasse: de um lado a zona *costeira* e do outro a *plana/interior*. Para esta questão considerou-se a utilização da linha divisória do polígono das secas, que atravessa o Estado de Pernambuco e conseqüentemente a Bacia do Ipojuca, próximo ao município de Gravatá. De certa forma, além das características climáticas, esta alternativa também proporcionou à bacia, uma divisão populacional em dois blocos de densidades demográficas bastante definidas.

Estas partes passarão a ser denominadas de: parte Leste, para representar a unidade fisiográfica *costeira* no lado adjacente ao Oceano Atlântico e, parte Oeste, localizada no interior do continente, a qual representará a unidade fisiográfica *plana/interior*. A Figura IV.14 apresenta a Bacia do Ipojuca dividida pela linha do polígono da seca, definindo as partes Leste e Oeste em questão.



Figura IV. 14 – Divisão da Bacia do Ipojuca segundo a divisão do polígono das secas.

A divisão da bacia decorreu também na divisão do total de estações pluviométricas, ficando 6 estações para a parte Leste e 18 para parte Oeste. A estação de Gravatá, localizada no município onde ocorreu a divisão, foi considerada pertinente à parte Oeste, por este município apresentar características climáticas mais semelhantes à essa parte. Com o objetivo de conhecer as áreas das partes Leste e Oeste, requisitos necessário para determinação das suas densidades pluviométricas, foi necessário considerar as áreas de cada município que constitui a bacia, envolvidas no seu interior, cujos valores foram calculado pela SECTMA (1999) utilizando específicos. A Tabela IV.4 apresenta o total das áreas das partes divididas.

Tabela IV. 4 – Determinação das áreas das partes Leste e Oeste.

MUNICÍPIOS	PARTES (KM <sup>2</sup> )	
	LESTE	OESTE
1 Alagoíinha	-	54,61
2 Altinho	-	6,70
3 Amaraji	60,89	-
4 Arcoverde	-	104,09
5 Belo Jardim	-	230,92
6 Bezerros	-	226,95
7 Cachoeirinha	-	1,81
8 Caruaru	-	387,62
9 Chã Grande	68,52	-
10 Escada	203,73	-
11 Gravatá	84,52	84,52
12 Ipojuca	150,84	-
13 Pesqueira	-	606,79
14 Poção	-	189,62
15 Pombos	66,51	-
16 Primavera	79,09	-
17 Riacho das Almas	-	8,19
18 Sairé	-	75,88
19 Sanharó	-	235,45
20 São Bento do Una	-	70,15
21 São Caetano	-	262,37
22 Tacaimbó	-	131,81
23 Venturosa	-	2,22
24 Vitória de santo antão	39,79	-
<b>TOTAL</b>	<b>753,89</b>	<b>2.679,70</b>

Conhecidos os valores das áreas das partes Leste e Oeste e o número de estações instaladas nessas partes, novamente foi aplicado o conceito de densidade de rede, cujos resultados deverão ser comparados aos recomendados pela OMM, para as regiões *costeiras* e *planas/interiores*.

3) *Recomendações nº 15 da OMM* (estudos de Langbein), encontrado em WMO (1965) segundo LLAMAS (1993) - Visando à adaptação deste modelo para avaliar a rede definida na Bacia do Ipojuca, verificou-se a necessidade de quantificar as densidades demográficas das partes Leste e Oeste, recorrendo-se às divulgações das populações dos municípios envolvidos, através do (IBGE, 2000).

Pelo fato das linhas da divisão político-administrativa que separam os municípios, nem sempre coincidirem com os divisores d'água da bacia hidrográfica, utilizou-se o somatório das populações dos municípios com sede no interior da bacia. A Tabela IV.5 apresenta os valores obtidos para as populações das partes Leste e Oeste. De posse dos valores das áreas e agora das populações das partes Leste e Oeste, foi possível determinar as suas densidades demográficas, conforme a Tabela IV.6.

Tabela IV. 5 – Determinação das populações das partes Leste e Oeste.

ITEM	MUNICÍPIOS COM SEDE NA BACIA	POPULAÇÃO DAS PARTES (hab.)	
		LESTE	OESTE
01	Belo Jardim	-	68.698
02	Bezerros	-	57.370
03	Caruaru	-	253.634
04	Chã grande	18.407	-
05	Escada	57.341	-
06	Gravatá	33.637	33.637
07	Ipojuca	59.281	-
08	Poção	-	11.178
09	Primavera	11.477	-
10	Sanharó	-	15.879
11	São Caetano	-	33.426
12	Tacaimbó	-	12.929
<b>TOTAL</b>		<b>180.143</b>	<b>486.751</b>

Tabela IV. 6 – Determinação das densidades demográficas das partes Leste e Oeste.

Partes	Área (km <sup>2</sup> )	População (hab.)	Densidade demográfica (hab. / km <sup>2</sup> )
Leste	753,89	180.143	238,95
Oeste	2.679,70	486.751	181,64
Total	3.433,58	666.894	194,23

Segundo este, o eixo das abscissas ficou reservado para representar as densidades demográficas obtidas para as partes Leste e Oeste, enquanto o eixo das ordenadas, os números de estações dessas partes, calculados para representarem áreas de 1.000 km<sup>2</sup>. Esses valores, uma vez combinados com as respectivas densidades demográficas, identificaram suas densidades relativas, de acordo com a posição de cada ocorrência nos intervalos de confiança estabelecidos pelo modelo.

Para determinação das coordenadas considerou-se os 6 estações instaladas na parte Leste em uma área de 753,89 km<sup>2</sup>, ou 7,96 estações/1.000 km<sup>2</sup>, que aproximadamente será tratado daqui para frente como 8 estações/1.000 km<sup>2</sup> para uma densidade demográfica de 238,95 hab/km<sup>2</sup>. Na parte Oeste, as 18 estações instaladas em uma área de 2.679,70 km<sup>2</sup>, ou 6,72 estações/1.000 km<sup>2</sup>, que aproximadamente será tratado adiante como 7 estações/1.000 km<sup>2</sup> para uma densidade demográfica de 181,64 hab/km<sup>2</sup>.

Com base nesses valores foi possível organizar os pares ordenados e plotá-los no gráfico, para que as suas ocorrências permitissem uma avaliação da dimensão da rede pluviométrica existente em conformidade com o seu desenvolvimento social e econômico, interpretado graficamente para as partes Leste e Oeste da bacia.

#### **IV. 2.2 – Critério da precisão desejada segundo os objetivos principais**

Na estimativa do número de pluviômetros ideal para bacia, previsto para uma precisão de 5% a 10% segundo o critério de LLAMAS (1993), foram testados todos os números inteiros pertencentes a este intervalo. Para isto utilizou-se o programa *Excel*, partindo do conhecimento da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação espacial das estações. Foi então calculado o número de pluviômetros para cada erro admissível do intervalo e suas respectivas diferenças em relação às 24 estações dimensionadas para a rede específica. Essas diferenças foram também apresentadas em forma de percentuais. Em seguida as novas densidades pluviométricas foram determinadas, as quais foram comparadas à densidade recomendada pela OMM para a bacia.

#### **IV. 2.3 – Método dos polígonos de Thiessen**

Mesmo conhecendo a existência da heterogeneidade altimétrica que caracteriza a Bacia do Ipojuca e a relativa imprecisão que consiste este método, por não considerar a influência do relevo, foi possível estimar a precipitação média na bacia. Para este cálculo foi utilizado o *software ArcView 3.2 A*, o qual resultou na elaboração do mapa dos polígonos de Thiessen, contendo as identificações das áreas de influências de cada estação, dentro e próxima à bacia, escolhidas para compor a rede em estudo. Os parâmetros utilizados e obtidos no processo do cálculo da precipitação média foram reunidos e apresentadas em uma planilha específica como mostra a Tabela IV.7

Tabela IV. 7 – Precipitação anual média e áreas de influência segundo Thiessen.

Posição na Figura IV.11	Estação	Área de Influência (km <sup>2</sup> )	Contribuição na bacia (mm)	Posição na Figura IV. 11	Estação	Áreas de Influência (km <sup>2</sup> )	Contribuição na bacia (mm)
1	Ipojuca	114,17	76,97	14	Tacaimbó	161,40	30,84
2	Escada	155,23	79,26	15	S. do Vento	15,99	3,48
3	Primavera	214,93	130,36	16	Belo Jardim	264,07	57,29
4	Pombos	25,88	3,93	17	Sanharó	341,32	62,54
5	Amaraji	64,16	38,63	18	Lagoa do Felix	28,96	3,98
6	Russinha	80,07	19,20	29	Salobro	182,62	29,20
7	Gravatá	210,18	40,55	20	Pesqueira	113,32	23,61
8	Bezerros	226,67	38,94	21	Poção	205,13	44,98
9	Barriguda	3,62	0,56	22	Alagoinha	13,38	2,32
10	São Joaquim	15,77	4,45	23	Cimbres	256,29	59,99
11	Caruaru	363,40	67,62	24	Arcoverde	40,41	8,54
12	Caropatós	30,74	4,08	<b>TOTAL</b>		3.433,03	874,84
13	São Caetano	304,37	43,52				

O *software ArcVIEW* foi criado pela empresa americana *ESRI* no início da década de 90. Nessa época, o surgimento de computadores pessoais de baixo custo e com capacidade de processamento de dados gráficos, permitiu uma nova geração de softwares para SIG.

#### IV. 2.4 – Método do Inverso do quadrado da distância

Considerado um interpolador determinístico, se caracteriza por estabelecer uma média ponderada das séries estatísticas em cada ponto, associadas aos pesos correspondentes aos valores dos inversos das distâncias desses pontos aos pontos circunvizinhos mais próximos. A sua aplicação foi efetuada com o auxílio do *software ArcGIS 8.3*.

Esse software pode ser considerado poderoso pela qualidade que as superfícies apresentam nos mapas, criados sob a técnica de interpolação, utilizando métodos determinísticos ou probabilísticos, através de uma extensão chamada *ArcMAP*.

Essa extensão contém excelentes ferramentas para análises estruturais de dados espaciais estatisticamente validados, podendo ser integrado ao *GIS*. A Figura IV.15 apresenta um exemplo da tela desse programa mostrando a estrutura circular da vizinhança, para estimativa de um ponto qualquer da superfície segundo o inverso do quadrado da distância.

As variáveis utilizadas na análise da distribuição espacial da precipitação anual média foram as médias dos totais anuais precipitados e os coeficientes de irregularidade meteorológica, ambas extraídas do banco de dados. Os parâmetros que constituíram os mapas tiveram seus acervos em forma de relatórios. Nestes relatórios foram apresentadas as estimativas para os Erros médios e os Erros médios quadráticos.

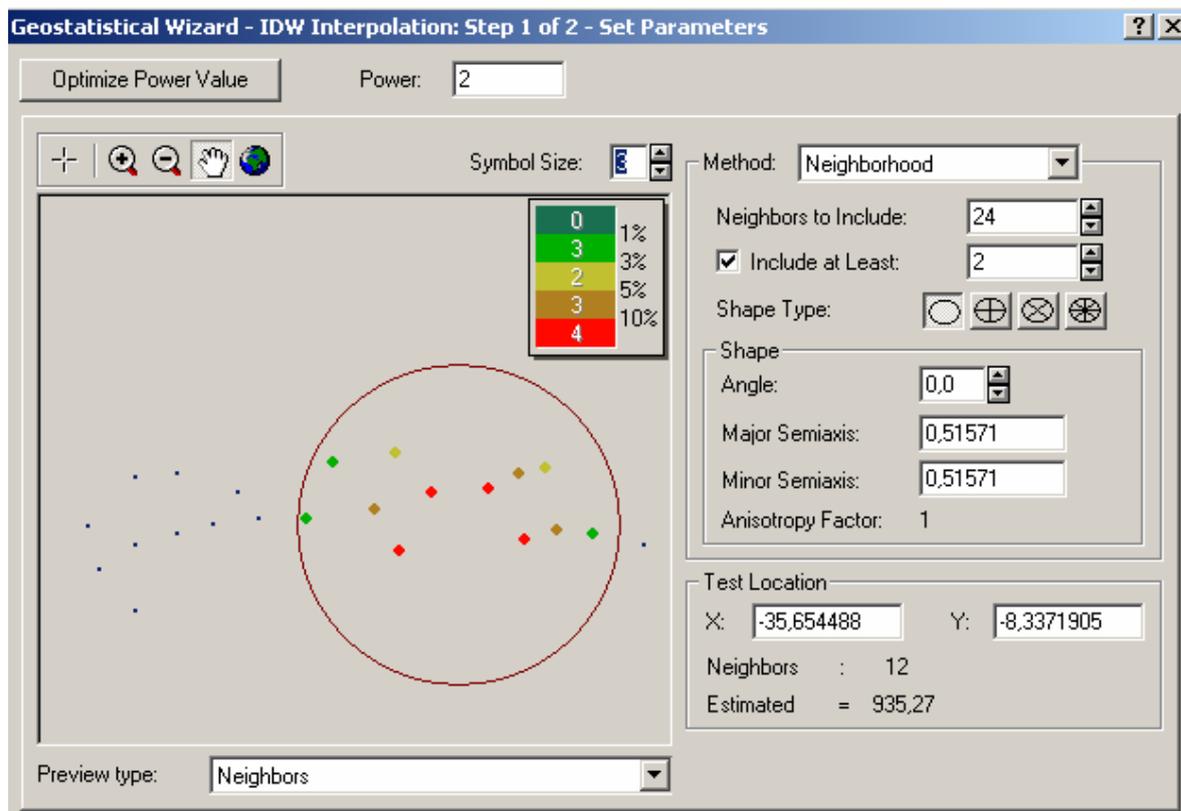


Figura IV. 15 – Estimativa de um ponto no ArcGIS segundo o inverso do quadrado da distância.

Com o intuito de melhor estimar a precipitação anual média na bacia, a partir da inferência de sua estrutura de correlação espacial analisada pelo método do inverso do quadrado da distância, adicionou-se ao conjunto das 24 estações, mais 40 pontos com precipitação estimada pelo interpolador, perfazendo um total de 64. Em seguida foram testados 112 pontos estimados somando-se desta vez 136. Em ambos os casos esses pontos adicionais foram distribuídos em forma de malha. Essa ação foi possível com auxílio do *software* utilizado, uma vez que fornece a estimativa e a localização das simulações.

Conhecidos esses valores, a precipitação anual média na bacia foi estimada para as duas situações, segundo as médias aritméticas dos pontos medidos e estimados. Os resultados dessas estimativas serão comparados aos resultados dos outros métodos que serão aplicados. Essa ampliação permite a comparação com o método kriging em condições idênticas de aplicação. A Figura IV.16 apresenta a malha da rede para estimativa da precipitação anual média na bacia com 112 pontos adicionais.

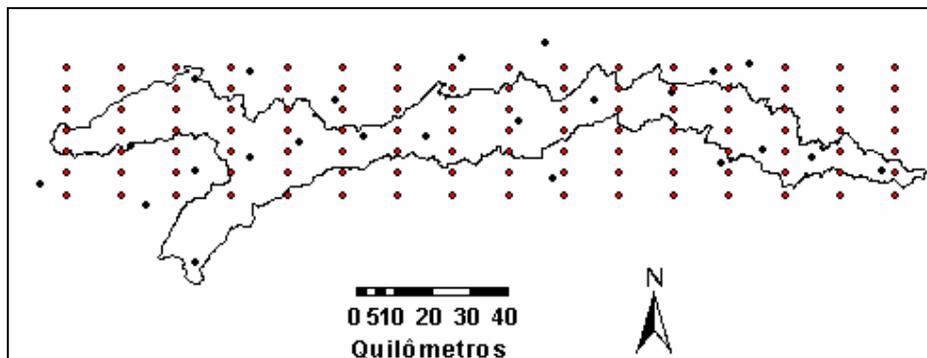


Figura IV. 16 – Malha de pontos para estimativa da precipitação média com o inverso do quadrado da distância.

#### IV. 2.5 – Métodos geoestatísticos

As informações que subsidiaram as aplicações dos métodos geoestatísticos foram extraídas do banco de dados e processadas através do *software ArcGIS* em todas as variáveis estudadas.

Mesmo reconhecendo a sugestão dada por JOURNAL & HUIJBREGTS (1978), citado por MONTENEGRO *et al.* (1999), não foi possível aplicar o método geoestatístico com um número de pares de pontos maior ou igual a 30. O motivo decorreu do fato em que a região Nordeste do Brasil, principalmente seu litoral, apresentar baixa densidade pluviométrica e não dispor de pontos suficientes para compor as séries normais climatológicas adotadas como critério.

Por já existir trabalhos realizados nesta região utilizando este método, com número de pares de pontos superior, inferior ou igual a 30, cujos resultados apresentaram valiosas contribuições, tomou-se como desafio o prosseguimento deste estudo.

Entre outros trabalhos, pode ser observado o estudo de MONTENEGRO *et al.* (1999) sobre a “Caracterização da variabilidade espacial de parâmetros hidráulico em solos aluviais no Estado de Pernambuco”, onde os autores calcularam os variogramas experimentais considerando um arranjo dos dados, de tal forma que o número de pares de pontos fosse maior ou igual a 30 para cada classe de distância. Como também a análise de RODRIGUES & SILANS (2002) na “variabilidade espacial da precipitação no Litoral do Nordeste brasileiro”, o qual não apresentou bons ajustamentos dos seus semivariogramas experimentais, para 17 postos pluviométricos da SUDENE e 15 instalados na bacia do Rio Gramame, o que se pode explicar o reduzido número de postos pluviométricos, onde o ideal deveria ser sempre superior a 30 ou mesmo 50, segundo os autores.

Os erros decorrentes das interpolações foram exibidos por estação em dois gráficos distintos, atendendo a todos os métodos e variáveis utilizadas. Um sob forma de regressão linear para os

valores medidos e estimados e outro através de um ajuste linear entre os erros normalizados e valores normais.

Dispondo dos recursos oferecidos pelo *software*, foi analisado o ajuste da distribuição de frequências das variáveis à distribuição normal e log-normal. A Figura IV.17 mostra um exemplo da tela do *ArcGis* que permite esta transformação.

Este *software* permite optar pela condição anisotrópica ou isotrópica, podendo o usuário experimentar outras direções diferentes ou utilizar o ângulo otimizado fornecido por esse software. A Figura IV.18 apresenta um exemplo da tela do programa para opção da anisotropia mostrando os pontos da vizinhança correlacionados em um espaço elíptico.

Por conta do formato alongado da bacia assumir uma extensão considerável em relação à sua largura, foi considerada a anisotropia em todos os processos referentes à precipitação anual média, para assim investigar as direções dos movimentos de circulação meteorológica que adentram à bacia pelo Litoral e sofre influências orográficas nas proximidades do município de Gravatá. Cada processo identificou um ângulo otimizado referente aos maiores semi-eixos das elipses. Esta condição não foi imposta para a análise dos coeficientes de irregularidade, podendo estes ser analisado conforme o melhor resultado da validação cruzada.

As funções espaciais das variáveis apresentaram tendências de segundo grau conforme a Figura IV.19. A necessidade da remoção dessas tendências foi então confirmada segundo os resultados das análises das validações cruzada permitida pelo software. A Figura IV.17 pode-se visualizar a tela do programa usada para opção de remoção de tendência.

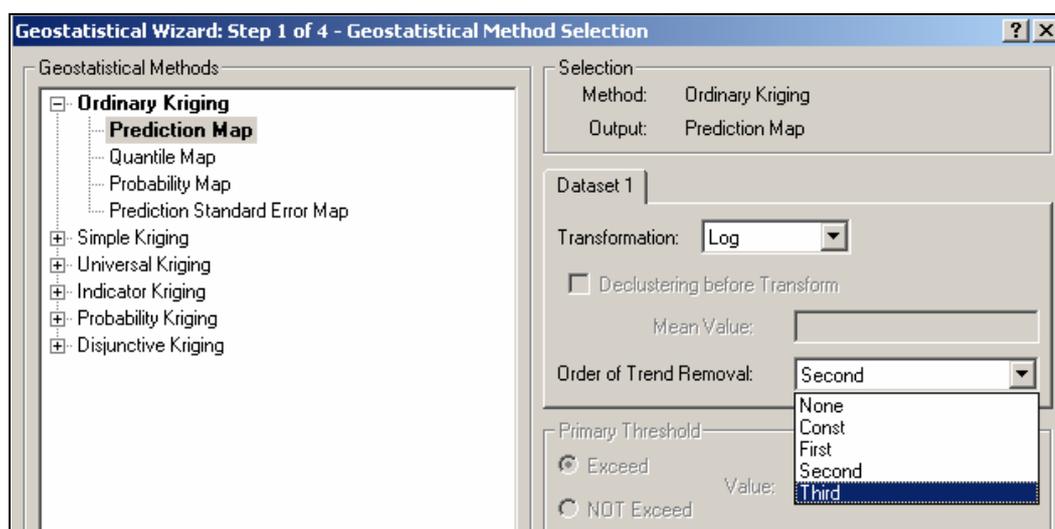


Figura IV. 17 – Transformação estatística e remoção de tendência no ArcGIS.

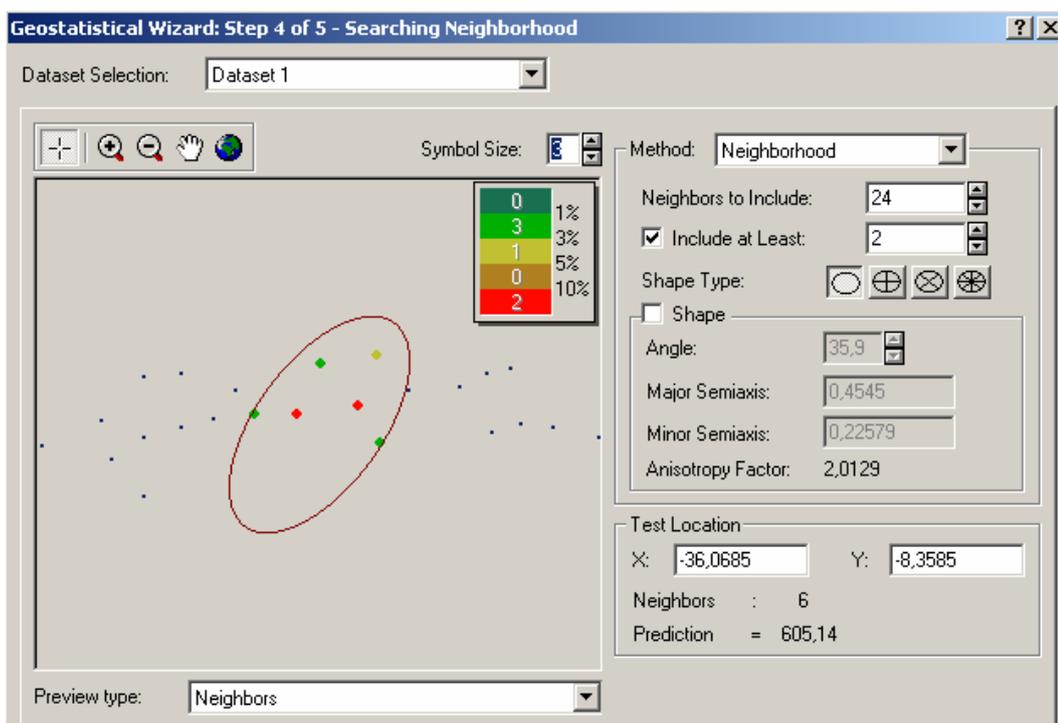


Figura IV. 18 – Estimativa de pontos no ArcGIS utilizando a anisotropia.

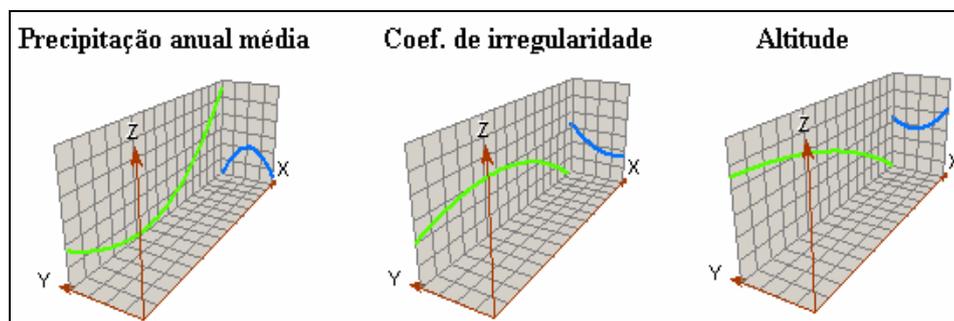


Figura IV. 19 – Comportamento espacial das variáveis.

Para os ajustes dos semivariogramas experimentais aos modelos teóricos, foram testados os três modelos mais comuns com patamares, ou sejam, o esférico, o exponencial e o gaussiano. As escolhas dos modelos com melhores ajustes aos experimentais decorreram das análises dos resultados das validações cruzadas apresentadas pelo software, os quais serão exibidas nos relatório dos parâmetros. A Tabela IV.8 apresenta os elementos analisados na validação cruzada para validação dos semivariogramas teóricos.

Tabela IV. 8 – Determinação do semivariograma teórico através da validação cruzada.

<b>Estimativas de erros</b>	<b>Valores ideais</b>
Erro médio	Valores pequenos
Erro médio quadrático	Valores pequenos e próximos entre si
Erro padrão médio	
Erro médio normalizado	Valores próximos de 0 (zero)
Erro médio quadrático normalizado	Valores próximos de 1 (um)

O sumário das estatísticas apresentado na Tabela IV.8 para avaliação dos erros de predição através do processo de validação cruzada, se baseia nos seguintes princípios (JONHSTON *et al.*, 2001):

- Os erros da estimativa não devem ser sistemáticos (superestimativa ou subestimativa), ou seja, esses erros devem seguir uma distribuição normal. Assim, a média dos erros de estimativa deve se aproximar de zero. No entanto, esses valores dependem da escala dos dados. Assim é necessário trabalhar com os valores normalizados, ou seja, analisar os erros da estimativa divididos pelos seus erros padrão. O erro normalizado deve aproximar de 1.
- As estimativas devem se aproximar dos valores medidos. O erro médio quadrático médio é calculado como a raiz quadrada do quadrado das distâncias entre valores medidos e estimados. Quanto menor o erro quadrático médio, melhor as estimativas.
- É necessário garantir que a avaliação da incerteza dos erros da estimativa seja válida. Cada um dos métodos kriging produz a estimativa de erros de predição. Além de fazer predição, estima-se a variabilidade das predições em relação aos valores medidos. É, portanto, importante observar a variabilidade correta. Se os erros padrão médio são próximos dos erros quadráticos médios então a estimativa da variabilidade está correta. Se os erros padrões médios são maiores do que os erros quadráticos médios, então a variabilidade das estimativas está sendo superestimada. Se os erros padrões médios são menores do que os erros quadráticos médios então está ocorrendo subestimativa da variabilidade das estimativas. Outra maneira de se observar é dividir cada erro de predição pelo seu estimado erro padrão. Eles devem ser semelhantes, na média, e então o erro quadrático médio normalizado deve ser próximo de 1.

Para a visualização gráfica da estimativa dos erros para cada estação foram constituídos dois tipos de gráficos: um contendo a regressão linear entre os valores medidos e estimados outro comparando a distribuição dos dados com a distribuição dos valores normalizados.

Para os interpoladores geoestatísticos utilizados e as respectivas variáveis foi possível elaborar os mapas das variações espaciais dessas variáveis segundo as interpolações realizadas. Além disso, foram também elaborados os mapas das estimativas dos erros.

Os semivariogramas teóricos escolhidos para cada interpolador, além de compor os relatórios de parâmetros, tiveram suas constituições gráficas apresentadas para cada variável em estudo. Nesses mesmos relatórios constaram os resultados das análises dos graus de dependência espacial de cada variável, analisados segundo CAMBARDELLA *et al.* (1994).

#### IV. 2.5.1 – Método Kriging

O interpolador kriging foi escolhido para analisar a distribuição espacial da precipitação anual média, o comportamento da variabilidade espacial da precipitação e seus padrões de ocorrência na bacia. As variáveis utilizadas foram as precipitações anuais médias, a precipitação em anos selecionados de acordo com o coeficiente de variação e os coeficientes de irregularidade meteorológicas, fundamentados no critério das características meteorológicas dominantes. Para isto foram utilizadas as informações contidas no banco de dados e aplicado o *software ArcGIS*.

Em todas as aplicações do método foram testados os modelos teóricos dos semivariogramas nos ajustes dos modelos experimentais referentes às duas variáveis analisadas. Ao determinar os parâmetros estatísticos percebeu-se a necessidade do ajuste da distribuição normal à log-normal para as duas variáveis analisadas, ou seja, precipitações anuais médias e coeficientes de irregularidade, como também as suas tendências de segunda ordem foram removidas.

Para estimar a precipitação anual média pelo método kriging, a partir da inferência de sua estrutura de correlação espacial, utilizou-se os mesmos procedimentos aplicados no método do inverso do quadrado da distância, adicionando-se pontos estimados às estações, espaçados em forma de malha, perfazendo um total de 64 no primeiro caso e 136 no segundo, mostrados na Figura IV.16. Com esses valores medidos e estimados foi possível calcular a precipitação anual média com maior precisão segundo as médias aritméticas desses valores. Os resultados serão comparados aos resultados de outros métodos.

Na análise da variabilidade espacial da precipitação os anos identificados para o médio, maior e menor coeficiente de variação espacial, tiveram seus comportamentos analisados separadamente, segundo os relatórios dos parâmetros e mapas das interpolações. Os coeficientes iguais a 64,1%, 81,8% e 45,6 corresponderam aos anos de 1968, 1982 e 1985, identificando os anos de média, alta e baixa variabilidade espacial no período estabelecido para bacia. A Tabela VIII.1 (anexo) apresenta todos os coeficientes de variação espacial e temporal calculados. Os coeficientes selecionados foram comparados aos da Bacia do Rio Gramame, localizada no litoral da Paraíba, identificados por

GOMES & SILANS (2000) em estudos realizados para os anos de média, alta e baixa variabilidade espacial.

Os resultados obtidos foram apresentados sob forma de semivariogramas, relatórios de parâmetros e validações cruzadas, regressões lineares entre os valores medidos e estimados e mapas contendo as interpolações e estimativas de erros.

A krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. Além disto, quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de parcela deste erro associada à dependência espacial, afirma VIEIRA (2000).

#### **IV. 2.5.2 – Método Co-kriging**

A justificativa da sua utilização é que este método dispõe de uma propriedade que lhe permite analisar simultaneamente duas ou mais variáveis que tenham dependência espacial entre si. A vantagem é utilizar uma variável mais densamente amostrada para estimar a outra. Sendo assim resolveu-se analisar a distribuição espacial da precipitação anual média em combinação com as altitudes. A escolha da variável secundária decorreu do conhecimento das irregularidades altimétricas que caracteriza a Bacia do Ipojuca e a influência que a mesma variável exerce sobre o comportamento do fenômeno natural analisado. Para isto foram utilizadas as informações contidas no banco de dados hidrológico e o *software ArcGis*.

Para a análise da distribuição espacial da precipitação com este método foram testados os modelos teóricos dos semivariogramas segundo validações cruzadas, para ajuste do modelo experimental. Ao determinar os parâmetros estatísticos percebeu-se a necessidade do ajuste da distribuição normal à log-normal para a precipitação anual média, não ocorrendo o mesmo com a altitude. Desta vez não foram removidas as tendências de segunda ordem das variáveis, considerando que parte da variável resultante do cruzamento é referente ao relevo da bacia, ou seja, a altitude, cuja tendência é pertinente as suas características fisiográficas próprias, não devendo ser alterada.

Os resultados obtidos constaram dos semivariogramas, relatórios de parâmetros e validações cruzadas, regressões lineares entre os valores medidos e estimados e mapas contendo as interpolações e estimativas de erros.

*CAPÍTULO V*

***RESULTADOS E DISCUSSÕES***

## V. 1 – Avaliação da eficácia da rede pluviométrica específica

### V. 1.1 – Densidades pluviométricas segundo as recomendações da OMM

Na aplicação das *Recomendações da OMM nº 168*, WMO (1984), o resultado da densidade obtido foi igual a 143,07 km<sup>2</sup>/estação, totalmente inserido no intervalo de 600 a 900 km<sup>2</sup>/estação, onde a OMM permitiu encaixar este valor, segundo as características fisiográficas pertinentes à área total da Bacia do Ipojuca, conforme a Tabela V.1. Observou-se, então, um enquadramento perfeito, com uma folga considerável, podendo a mesma ser classificada como um bom resultado. Porém foi possível perceber a inexistência de cobertura pluviométrica em determinados locais, deixada por conta da escassez de estações que atendessem às exigências dos critérios na composição da rede específica,

A explicação deve-se ao fato do modelo da OMM não considerar as distâncias entre as estações, envolvendo como parâmetros somente o número de estações e a área da bacia, de modo a promover uma avaliação generalizada, mesmo considerando as regiões fisiográficas e os seus limites de densidades, como intenção de se aproximar da condição ideal. Tudo isto justifica uma relativa incerteza quanto ao grau de precisão que é obtido na aplicação do método, uma vez que a distância entre as estações é preponderante para determinação das correlações, das interpolações para regionalização em locais com baixa densidade pluviométrica e comparações entre regiões de pluviosidades heterogêneas.

Sabe-se que alguns tipos de chuvas acontecem em pequenas áreas, como exemplo, as chuvas convectivas de ocorrências comuns na Região Nordeste. Mesmo assim, não se pode afirmar que o modelo seja totalmente impreciso ou superado, mas que deve ser utilizado conforme o tipo de análise que se deseja realizar, podendo os resultados satisfazer ou não o grau de investigação do interesse do pesquisador.

A própria OMM, reconhecendo a necessidade de avançar na precisão dos intervalos recomendados, desmembrou a divisão fisiográfica para um número maior de opções de enquadramento, de modo que os resultados das avaliações respondessem com mais fidelidade e proporcionassem melhores prognósticos para o melhoramento das redes. Essas recomendações são utilizadas no mundo e freqüentemente no Brasil por diversos órgãos e instituições de ensino e pesquisas.

Para a aplicação das *Recomendações da OMM nº 168*, WMO (1994), as densidades pluviométricas assumiram os seguintes valores: 125,65 km<sup>2</sup>/estação para parte Leste e 148,87 km<sup>2</sup>/estação para parte Oeste, conforme a Tabela V.1. Observou-se que ambas não excederam os limites de 900 e 575 km<sup>2</sup>/estação, recomendados pela OMM, e que ficaram longe de se aproximarem destes, considerando-se também como bons resultados segundo o método.

Igualmente à análise anterior, apesar também da excelência dos resultados, pôde-se observar determinadas áreas desprovidas de medições, pelo mesmo motivo, salientando que a mesma deficiência também ignora situações que possam apresentar concentrações de pluviômetros localizados. Sendo assim, o método pode não garantir com certa segurança a eficiência de uma rede, tendo a necessidade de regularidade na distribuição espacial como indicador.

Também desconsiderando as distâncias entre as estações, esta versão mostrou ser mais aperfeiçoada por permitir um número maior de opções de enquadramento, tornando as regiões mais individualizadas e respeitando mais as suas caracterizações fisiográficas peculiares, convergindo para uma aproximação da melhor condição que se poderia determinar para o número de pontos de medição necessário. Daí a sua maior adequação em relação à versão anterior, está no aumento da atenção às diferenças regionais.

No caso da Bacia do Ipojuca, esse efeito contemplou as duas regiões bastante definidas em seu território, com a determinação das densidades pluviométricas para as partes Leste e Oeste. A primeira caracterizada pela maior concentração populacional, baixa altitude e maior umidade, e a segunda com menor concentração populacional, maior altitude e mais seca.

Tabela V. 1 – Quantidades de pluviômetros e densidades pluviométricas das partes Leste e Oeste.

<b>Partes</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nº de medidores</b>	<b>Densidades pluviométricas (km<sup>2</sup> / estação)</b>
Leste	753,89	06	125,65
Oeste	2.679,70	18	148,87
Área total	3.433,58	24	143,07

Na aplicação das *Recomendações da OMM nº 15*, encontrado em (WMO, 1965) segundo LLAMAS (1993), praticamente o objetivo foi avaliar a eficiência da rede específica, definida para Bacia do Ipojuca, em consonância com o crescimento populacional da bacia, e conseqüentemente sua compatibilidade com o desenvolvimento econômico e social. A Figura V.1 apresenta o gráfico de Langbein e as densidades relativas para as partes Leste e Oeste.

Esses pontos, quando submetidos à plotagem, determinaram as densidades relativas das partes Leste e Oeste da bacia, e ocuparam no gráfico um campo de ocorrência considerado razoável, ou seja, acima do limite recomendável. Observou-se ainda que os mesmos ocorreram entre as linhas que delimitam as densidades relativas de 10% e 50%, no primeiro intervalo de confiança do modelo. Estes resultados poderiam ser melhores se caso ocorressem no segundo intervalo, isto é, de 50% e 90%. Mesmo assim pode-se afirmar que são bons. Para isso foram utilizadas as seguintes

coordenadas: 8 e 7 pluviômetros/1.000 km<sup>2</sup> para o eixo vertical e 238,95 e 181,64 hab/km<sup>2</sup> para o eixo horizontal.

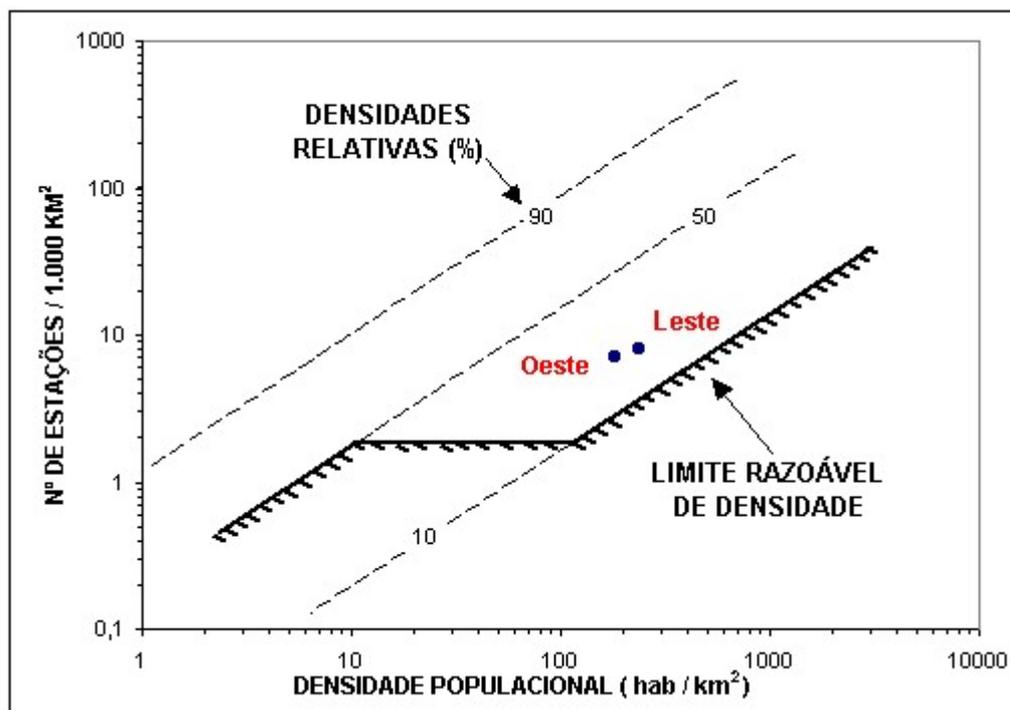


Figura V. 1 - Densidades relativas da rede pluviométrica nas partes Leste e Oeste.

É importante lembrar que o crescimento populacional no Brasil, acompanhado pelo IBGE, nem sempre conduz à certeza de que houve um desenvolvimento sócio-econômico compatível, principalmente pelas freqüentes migrações populacionais para os centros mais desenvolvidos, em busca de qualidade de vida, e por sua vez desacompanhadas de infraestruturas que comportem os excessos com padrões mínimos dessa qualidade. Sendo assim, aumenta a importância deste tipo de análise, uma vez que um desenvolvimento socioeconômico compatível com o aumento populacional requer informações hidrológicas para criação de infraestruturas, como exemplo, o planejamento dos recursos hídricos.

Especificamente no caso dos recursos hídricos, segundo SECTMA (1999) a evolução da demanda é função, por um lado, do crescimento econômico e demográfico, e por outro, da eficácia do gerenciamento do uso e controle deste recurso. Em qualquer que seja o caso, percebe-se a necessidade cada vez maior da obtenção de informações hidrológicas como ferramenta de auxílio ao planejamento, concluindo-se que a densidade demográfica pode ser um indicador que justifique uma rede hidrométrica mais ou menos densa. Seria dizer que uma determinada população exigiria uma rede pluviométrica compatível com a sua dimensão, para assim gerar uma quantidade de

informações hidrológicas suficientes e garantir o bem estar de que necessita, através de um desenvolvimento adequado.

### V. 1.2 – Número de pluviômetros segundo a precisão desejada

Considerando as 24 estações previstas na rede específica e as precisões desejadas segundo os erros percentuais admissíveis, contidos no intervalo de 5% a 10%, puderam-se então estimar os parâmetros apresentados na Tabela V.2 para todos os números inteiros pertinentes ao intervalo.

Tabela V. 2 – Determinação de parâmetros segundo a precisão desejada.

Precisões desejadas	%	5	6	7	8	9	10
Nº de pluviômetros correspondentes	Unidade	147	102	75	58	46	37
Nº de instalações necessárias	Unidade	123	78	51	34	22	13
Densidades pluviométricas resultantes	km <sup>2</sup> /est	23,36	33,66	45,78	59,20	74,64	92,80

Tomando a alternativa menos satisfatória quanto à precisão, ou seja, 37 pluviômetros para o maior erro admissível, observa-se que seria necessário ser adicionado 13 pluviômetros. Neste caso a densidade pluviométrica apresentaria uma variação de 143,07 para 92,80 km<sup>2</sup>/pluviômetro. Sendo assim, o método dos polígonos de Thiessen estimaria a precipitação média com mais precisão. Porém, O incremento no número de pluviômetros seguindo esta análise pode conduzir a custos inviáveis com instalações, operações e manutenções desses equipamentos.

## V. 2 – Análise da variabilidade espacial, estimativa e padrões da precipitação anual média

### V. 2.1 – O método dos polígonos de Thiessen

A aplicação desse método resultou no valor de 874,84 mm para o cálculo da precipitação anual média na Bacia do Ipojuca. Além disso, o método permitiu uma visão da distribuição espacial das áreas de influências pluviométricas em cada estação, considerando-se um instrumento de análise de redes pluviométricas, que embora parta de valores medidos em cada posto, a formação dos polígonos seja totalmente geométrica não levando em conta qualquer correlação estatística entre as estações. A Figura V.2 mostra os polígonos de Thiessen para a rede em estudo na Bacia do Ipojuca e Tabela V.3 identifica os municípios correspondentes.

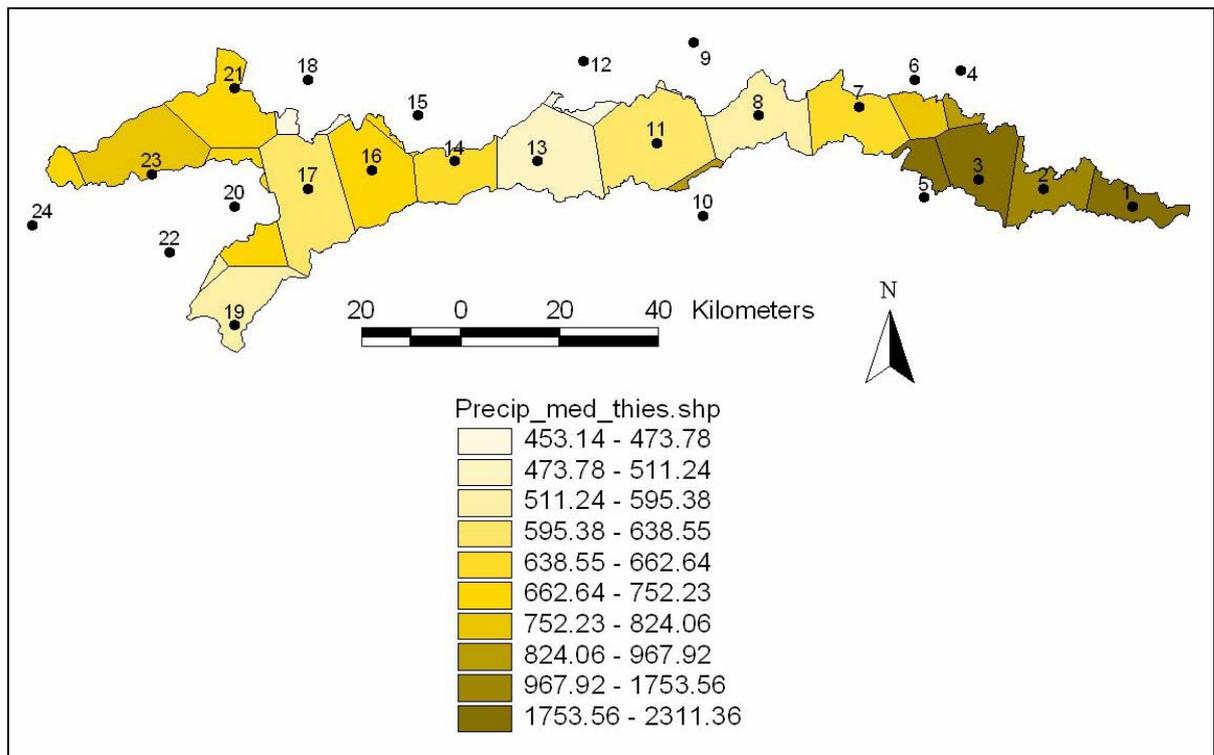


Figura V. 2 – Polígonos de Thiessen da rede específica na Bacia do Ipojuca.

Tabela V.3 – Identificação das estações nos polígonos de Thiessen na Bacia do Ipojuca.

Posição na Figura V.2	Estações	Posição na Figura V.2	Estações
1	Ipojuca	13	São Caetano
2	Escada	14	Tacaimbó
3	Primavera	15	Serra do Vento
4	Pombos	16	Belo Jardim
5	Amaraji	17	Sanharó
6	Russinha	18	Lagoa do Félix
7	Gravatá	19	Salobro
8	Bezerros	20	Pesqueira
9	Barriguda	21	Poção
10	São Joaquim	22	Alagoinha
11	Caruaru	23	Cimbres
12	Caropotós	24	Arcoverde

As estações: 9, 10, 13, 15, 18 e 22, apesar de apresentarem áreas de influência pouco significantes, contribuíram para aumentar o número de pontos e assim melhorar as análises geoestatística, tendo as mesmas atendido aos requisitos estabelecidos na constituição da rede específica.

Sabe-se que um dos motivos de imprecisão do método dos polígonos de Thiessen para avaliação da precipitação média decorre do mesmo não considerar o relevo da região, bastante expressivo na Bacia do Ipojuca, e de um modo geral totalmente interveniente no gradiente da precipitação. Entretanto, tal precisão pôde ser questionada por GOMES & SILANS (2000) comparando métodos para estimativa da precipitação média na Bacia do Rio Gramame, os quais concluíram que o método dos polígonos de Thiessen fornece resultados muito próximos da krigagem ordinária e do inverso do quadrado da distância.

## **V. 2.2 – O método do Inverso do quadrado da distância**

Para aplicação deste método foi possível constituir os elementos necessários à análise da distribuição espacial da precipitação, a estimativa da precipitação média e os padrões de ocorrência da precipitação anual média na Bacia do Ipojuca. Os mapas das interpolações das variáveis, os relatórios dos parâmetros utilizados, os gráficos contendo regressões lineares constituíram esses elementos, os quais serão apresentados separadamente para cada variável analisada. Para facilidade das análises, as legendas dos mapas conservaram os valores normalmente medidos e contidos no banco de dados.

### **V.2.2.1 – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média**

Como resultado identificou-se no mapa das superfícies interpoladas uma maior ocorrência de precipitação no Litoral e Zona da Mata em relação ao Agreste da bacia. Entre essas regiões observou-se uma mudança brusca das faixas úmidas para as faixas secas no sentido oeste, que serviram para comprovar os efeitos orográficos causados pela obstrução topográfica do Planalto da Borborema.

Nada se pode afirmar a respeito das direções em que os fenômenos naturais estudados acontecem, visto que este método não permite a consideração anisotrópica. Os semi-eixos são iguais, em um determinado círculo, na vizinhança dos pontos selecionados para ponderar a estimativa.

A Tabela V.4 mostra um relatório contendo os principais parâmetros utilizados. Neste mesmo relatório encontram-se os erros médios e os erros médios quadráticos. Na Figura V.3 é apresentado uma regressão linear entre os valores medidos e estimados. As superfícies interpoladas poderão ser vistas no mapa da Figura V.4.

Tabela V.4 - Relatório dos parâmetros para as precipitações anuais médias com o inverso do quadrado da distância.

<b>Método</b>	Inverso do quadrado da distância
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Precipitação anual média
<b>Expoente</b>	2,00
<b>Número de pontos</b>	24,00
<b>Semi-eixos</b>	51,571 km
<b>Estimativa de erros:</b>	
<b>Erro médio</b>	-11,13 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	247,30 mm

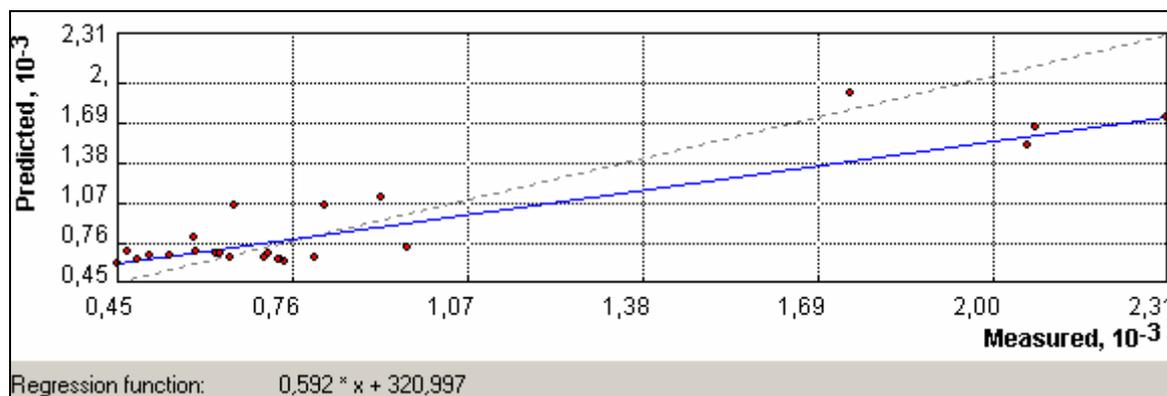


Figura V.3 – Regressão linear dos valores medidos e estimados para as precipitações anuais médias com o inverso do quadrado da distância.

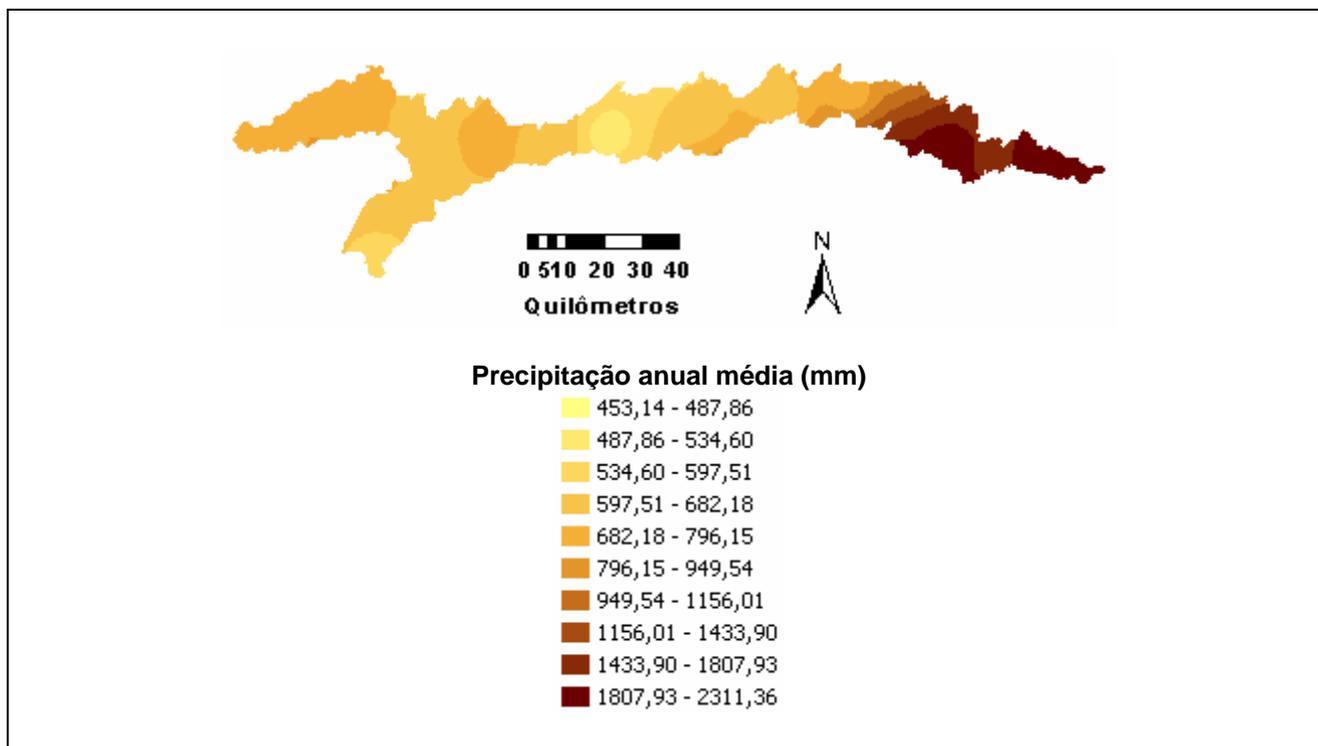


Figura V.4 – Mapa das precipitações anuais médias com inverso do quadro da distância.

### V. 2.2.2 – Estimativa da precipitação anual média na bacia

Os resultados obtidos no cálculo da precipitação anual média na bacia segundo o método do inverso do quadrado da distância, foi 953,81mm para a adição de 40 pontos na primeira alternativa, e 964,09mm para 112 pontos adicionais na segunda. Com os resultados das duas alternativas foi possível observar que a variação era pequena em relação ao aumento do número de pontos, resultando na não necessidade de prolongar a operação. Observou-se, com isto, que estes valores excederam o valor obtido pelo método de Thiessen.

### V. 2.2.3 – Análise dos padrões de precipitação

A irregularidade meteorológica apresentou-se também bem definida onde as precipitações médias comprovaram o conhecimento hidrológico da bacia. No Litoral e Zona da Mata, onde predomina os sistemas meteorológicos vindos do Oceano Atlântico, ocorreram os menores coeficientes de irregularidade, caracterizando maiores ocorrências de chuvas frontais. No Agreste, onde o ZCIT é mais freqüente, ocorreram os maiores coeficientes de irregularidade, caracterizando maiores evidências de chuvas convectivas. Constatou-se com isso que os coeficientes de irregularidade acima de três, considerados altos por LLAMAS (1993), representaram em sua maior parte o Agreste da bacia.

Na Tabela V.5 é mostrado um relatório contendo os principais parâmetros utilizados. Neste mesmo relatório encontram-se os erros médios e os erros médios quadráticos. Na Figura V.5 é apresentado uma regressão linear entre os valores medidos e estimados. As superfícies interpoladas poderão ser vistas no mapa da Figura V.6.

DIRKS *et al.* (1998) trabalharam com alguns interpoladores espaciais para chuvas na Ilha de Norfolk na Nova Zelândia e concluíram que os métodos de krigagem e inverso do quadrado da distância sobressaíram em relação ao polígono de Thiessen e inverso da distância com expoentes 1, 3 e 4. Contudo os autores não estabeleceram qual dos dois métodos citados poderiam produzir maior precisão, afirma MELLO *et al.* (2003).

Tabela V 5 – Relatório dos parâmetros para os coeficientes de irregularidade com o inverso do quadrado da distância.

<b>Método</b>	Inverso do quadrado da distância
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Coefficiente de irregularidade
<b>Expoente</b>	2,00
<b>Número de pontos</b>	24,00
<b>Semi-eixos</b>	51,571 km
<b>Estimativa de erros:</b>	
<b>Erro médio</b>	0,09976 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	1,214 mm

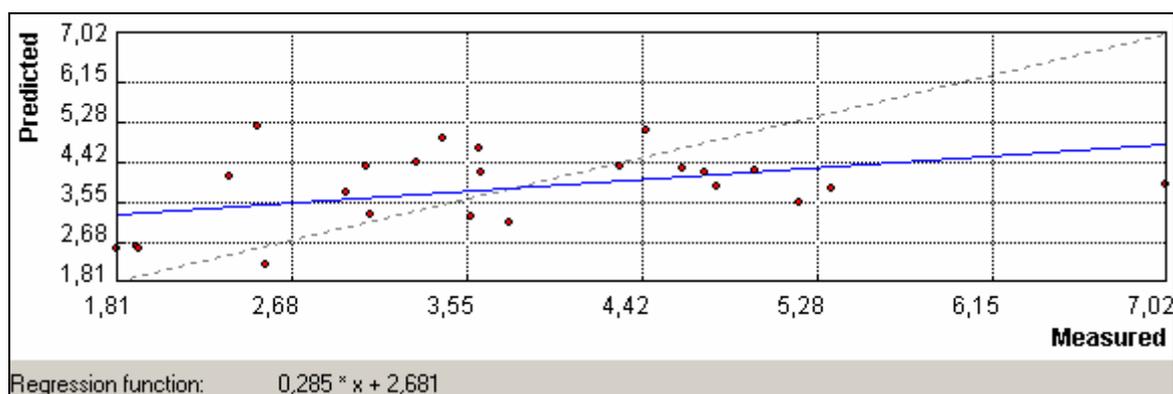


Figura V. 5 – Regressão linear dos valores medidos e estimados para os coeficientes de irregularidade com o inverso do quadrado da distância.

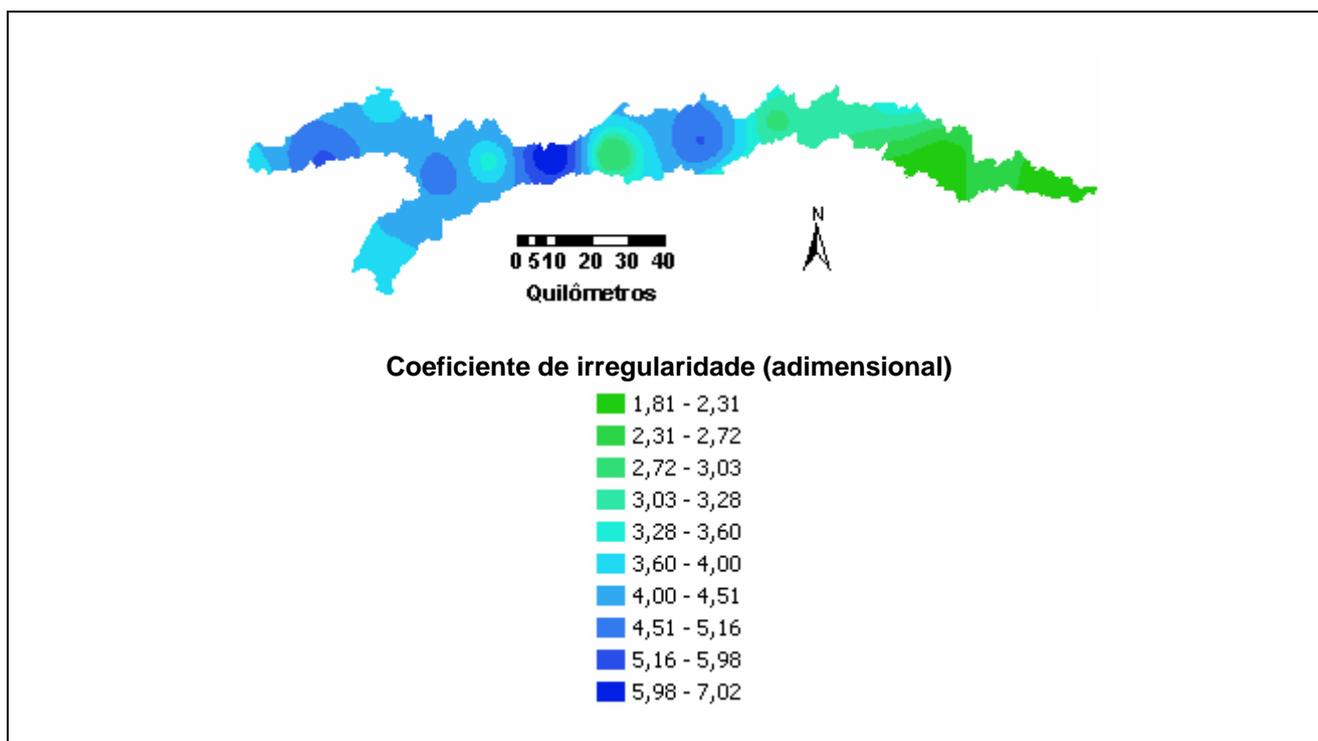


Figura V. 6 – Mapa dos coeficientes de irregularidade com inverso do quadro da distância.

### V. 2.3 – Krigagem

Com as informações contidas no banco de dados foi possível avaliar a distribuição espacial, estimar a precipitação anual média, analisar a variabilidade espacial e os padrões de ocorrência da precipitação na Bacia do Ipojuca, segundo a rede específica definida. Os resultados comprovaram as características hidrológicas da bacia através dos elementos expressos separadamente para cada

variável analisada. Estes resultados constaram de mapas de interpolação e de estimativas de erros, relatórios dos parâmetros utilizados, semivariogramas e gráficos de erros.

### V. 2.3.1 – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média

Na utilização da krigagem para análise da variabilidade espacial através da precipitação anual média, o modelo do semivariograma que melhor se ajustou ao semivariograma experimental foi o esférico, segundo as estimativas de erros resultantes da validação cruzada conforme a Figura V.7. Na vizinhança da origem esta função se apresentou regular, contínua e sem efeito pepita. Segundo CAMBARDELLA *et al.* (1994), o semivariograma mostrou uma forte estrutura de correlação espacial.

Considerando a condição anisotrópica utilizada, a direção fornecida pelo programa constatou que o fenômeno natural está dirigido a  $54,1^\circ$  no quadrante nordeste se considerar o leste como referência, uma vez que o programa considera o norte em  $0^\circ$ . O relatório de parâmetros exibido na Tabela V.6 mostra o resumo de todos os valores processados. Os erros entre os valores medidos e estimados podem ser avaliados através dos gráficos das Figuras V.8 e V.9.

Semelhante aos resultados obtidos na aplicação do método do inverso do quadrado da distância, as superfícies mapeadas pelo método kriging comprovaram a maior ocorrência de precipitação no Litoral e Zona da Mata em relação ao Agreste, e os efeitos orográficos causados pelo Planalto da Borborema. As superfícies interpoladas e suas estimativas de erros poderão ser vistas nos mapas das Figuras V.10 e V.11.

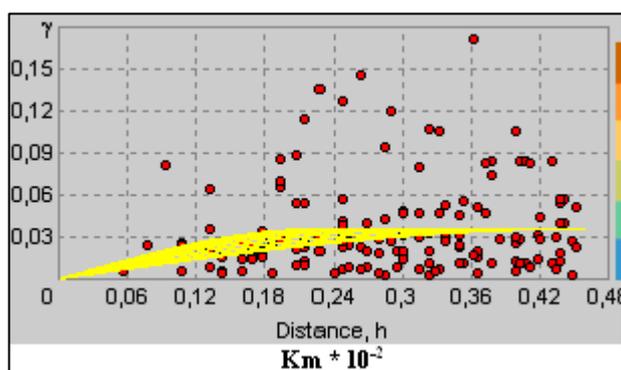


Figura V. 7. – Semivariograma esférico ajustado para precipitação anual média com kriging.

Tabela V.6 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média com kriging.

<b>Método</b>	Kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Precipitação anual média
<b>Transformação estatística</b>	Log-normal
<b>Remoção da tendência</b>	2º grau
<b>Direção</b>	Anisotrópica – 35,9º
<b>Modelos do semivariograma teórico</b>	Esférico
<b>Alcance Máximo (a)</b>	45,45 km
<b>Alcance Mínimo (a)</b>	22,579 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	0,035755 mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	0,0 mm <sup>2</sup>
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100%</b>	0,0 % (forte)
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	50,88 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	291,50 mm
<b>Erro médio padrão</b>	238,60 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	-0,003332 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	0,9707 mm

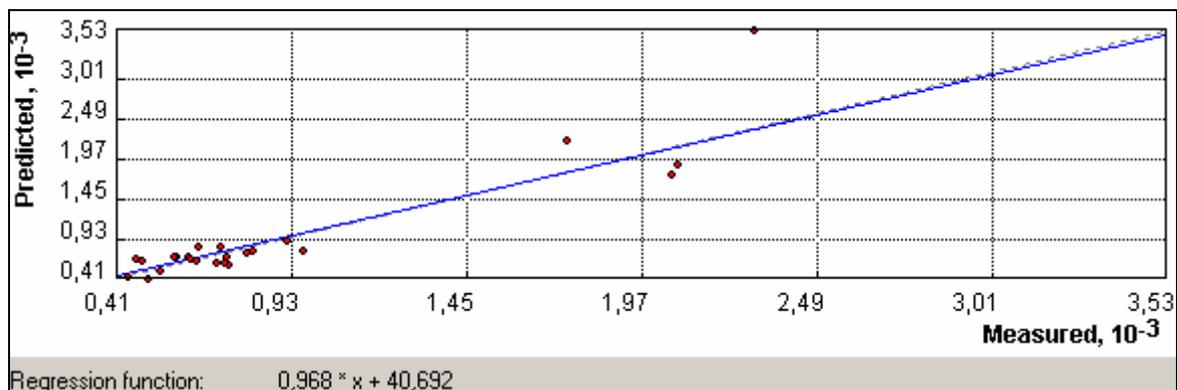


Figura V. 8 – Regressão linear dos valores medidos e estimados para a precipitação anual média com kriging.

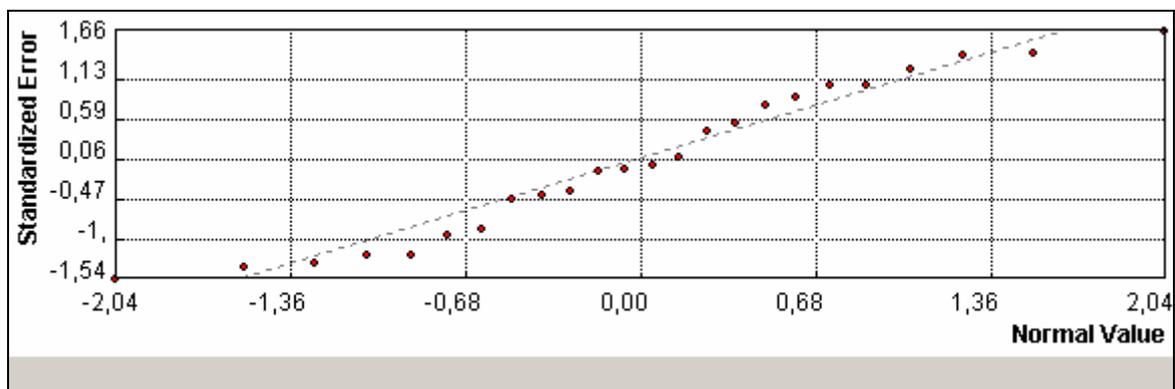


Figura V. 9 – Erros normalizados e valores normais na precipitação anual média com kriging.

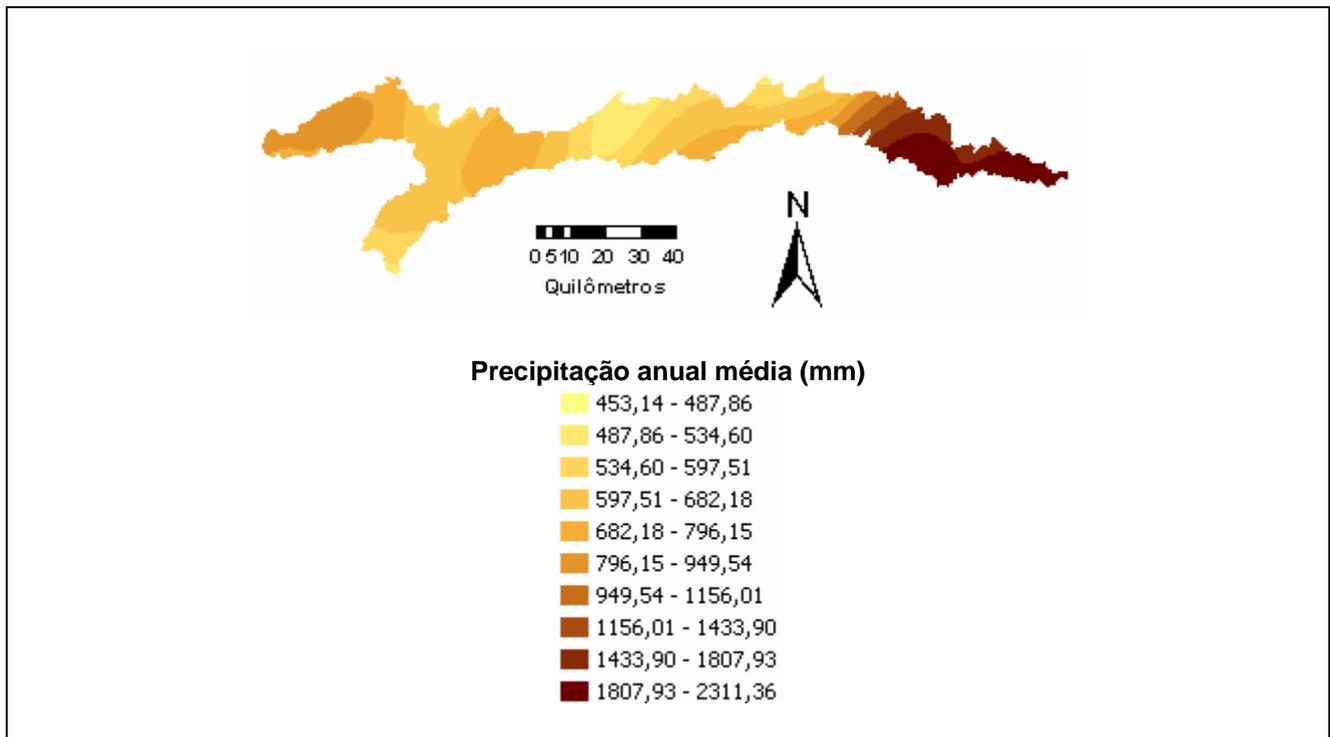


Figura V. 10 – Mapa da precipitação anual média com kriging.

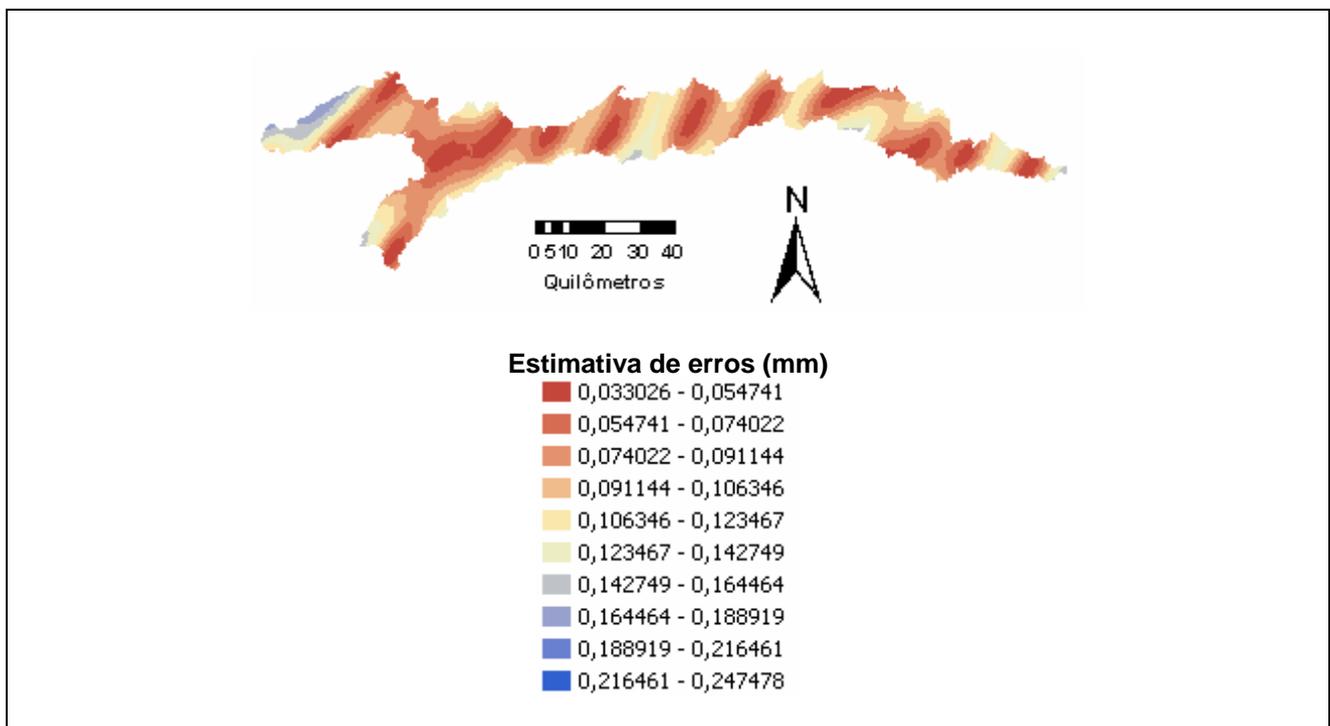


Figura V. 11 – Mapa das estimativas de erros da precipitação anual média com kriging.

### V. 2.3.2 – Estimativa da precipitação anual média na bacia

Para calcular a precipitação anual média na bacia segundo método kriging, considerou-se o mesmo critério usado no método do inverso do quadrado da distância, com vista a intensificar a precisão do resultado obtido.

Os resultados obtidos no cálculo foram 957,15mm para a adição de 40 pontos na primeira alternativa, e 964,21mm para 112 pontos adicionais na segunda. Com os resultados das duas alternativas foi possível observar que também a variação era pequena em relação ao aumento do número de pontos, resultando na não necessidade de prolongar a operação.

Constatou-se então que estes valores aproximaram-se bastante dos valores obtidos pelo método do inverso do quadrado da distância e distanciaram-se um pouco mais do valor obtido pelo método de Thiessen. A Tabela V.7 apresenta um quadro comparativo dos resultados dos cálculos das precipitações anuais médias segundo os métodos utilizados.

*Tabela V. 7 – Comparação de métodos no cálculo da precipitação anual média.*

Item	Métodos	Nº de pontos adicionais	Precipitação anual média (mm)
01	Thiessen	Nenhum	874,84
02	Inverso do quadrado da distância	40	953,81
		112	964,09
03	Kriging	40	957,15
		112	964,21

### V. 2.3.3 – Análise da variabilidade espacial da precipitação

Na análise da variabilidade espacial da precipitação observou-se forte correlação espacial para todos os semivariogramas teóricos ajustados, como também, os ângulos otimizados pelo software apontaram o quadrante nordeste como direção anisotrópica dos fenômenos naturais responsáveis pela precipitação na bacia. No ano de maior variabilidade espacial detectou-se a presença de efeito pepita na vizinhança da origem, motivo que não impediu de afirmar que a variabilidade espacial apresentou-se semelhantes nas três situações consideradas, ou seja, em anos com média, alta e baixa variabilidade espacial, embora diferentes em magnitude de variação.

GOMES & SILANS (2000) observaram a variação espacial da precipitação na Bacia do Rio Gramame, localizada no litoral do Estado da Paraíba, e destacaram anos com baixa, média e alta variabilidade espacial na área, cujos coeficientes corresponderam a 18,0%, 28,7% e 37,4%, respectivamente. Com isso, a variabilidade espacial da Bacia do Rio Gramame, foi comparada à da Bacia do Ipojuca durante a metodologia. Concluiu-se que a Bacia do Gramame, por estar localizada no litoral, explica a baixa variabilidade espacial apresentada em relação à Bacia do Ipojuca. O formato alongado que caracteriza a Bacia do Ipojuca, se estendendo do início do Sertão até o

Litoral, comporta ocorrências climáticas e topográficas diferentes das planícies litorâneas onde esta localizada a Bacia do Gramame.

Serão então apresentados os mapas das superfícies interpoladas e os relatórios contendo os parâmetros utilizados e validação cruzada, para os três anos analisados. As Figuras V.12, V.13 e V.14 mostram os mapas das superfícies e as Tabelas V.8, V.9 e V.10 mostram os relatórios de parâmetros e validação cruzada para os anos escolhidos.

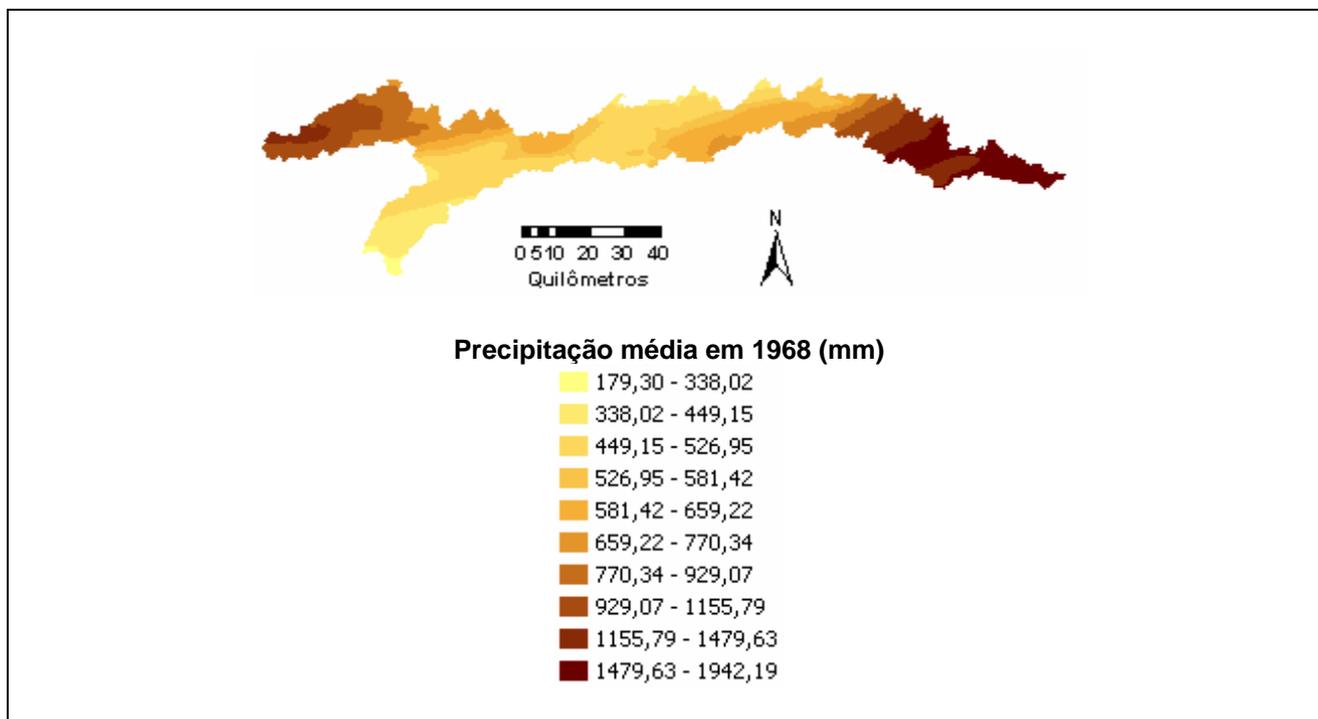


Figura V. 12 – Mapa da precipitação anual média no ano de média variabilidade espacial com kriging.

Tabela V. 8 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de média variabilidade espacial com kriging.

<b>Método</b>	Kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Precipitação anual média no ano de média variabilidade espacial
<b>Transformação estatística</b>	Log-normal
<b>Remoção da tendência</b>	2º grau
<b>Direção</b>	Anisotrópica – 81,0°
<b>Modelos do semivariograma teórico</b>	Exponencial
<b>Alcance Máximo (a)</b>	33,35 km
<b>Alcance Mínimo (a)</b>	9,791 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	0,15273mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	0,0 mm <sup>2</sup>
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100%</b>	0,0 % (forte)
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	70,21 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	483,3 mm
<b>Erro médio padrão</b>	488,1 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	0,2647 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	1,57 mm

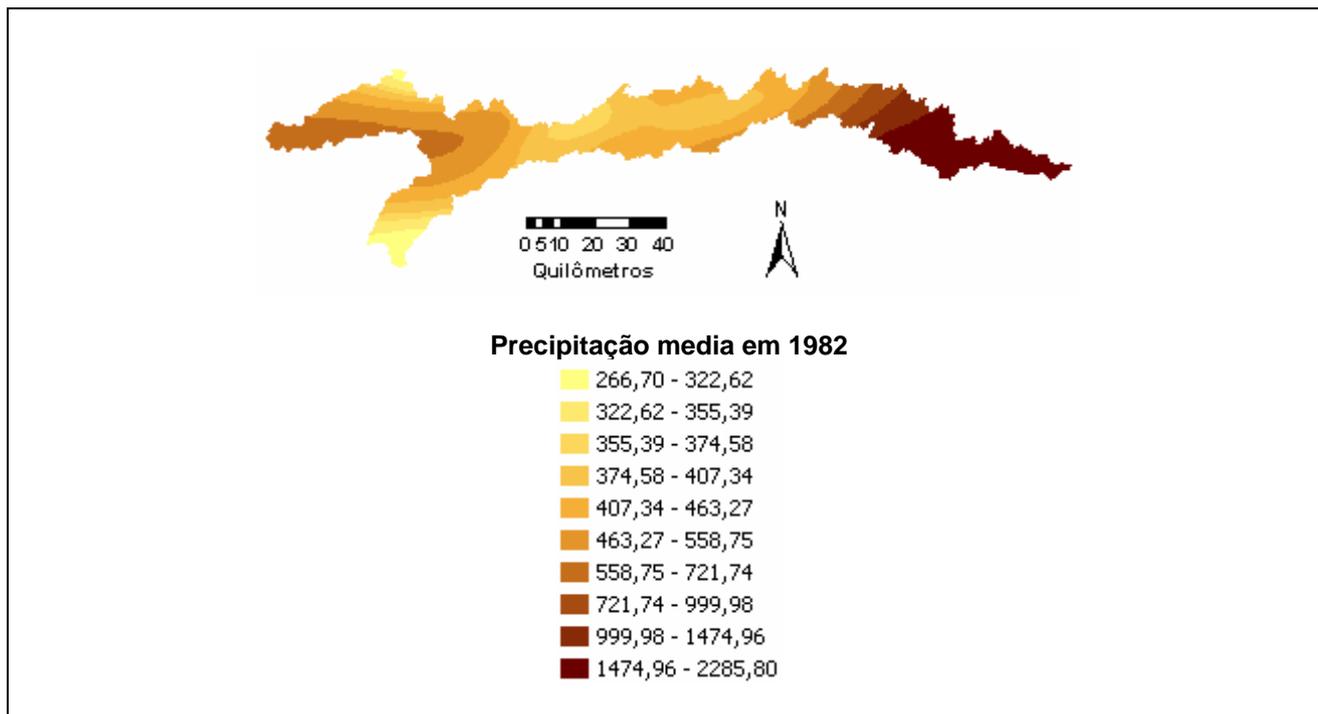


Figura V. 13 – Mapa da precipitação anual média no ano de maior variabilidade espacial com kriging.

Tabela V. 9 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de máxima variabilidade espacial com kriging.

<b>Método</b>	Kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Precipitação anual média no ano de maior variabilidade espacial
<b>Transformação estatística</b>	Log-normal
<b>Remoção da tendência</b>	2º grau
<b>Direção</b>	Anisotrópica – 72,1º
<b>Modelos do semivariograma teórico</b>	Gaussiano
<b>Alcance Máximo (a)</b>	45,328 km
<b>Alcance Mínimo (a)</b>	16,796 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	0,060774 mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	0,010254 mm <sup>2</sup>
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100%</b>	16,8% (forte)
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	55,33 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	294,4 mm
<b>Erro médio padrão</b>	269,9 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	0,04971 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	1,034 mm

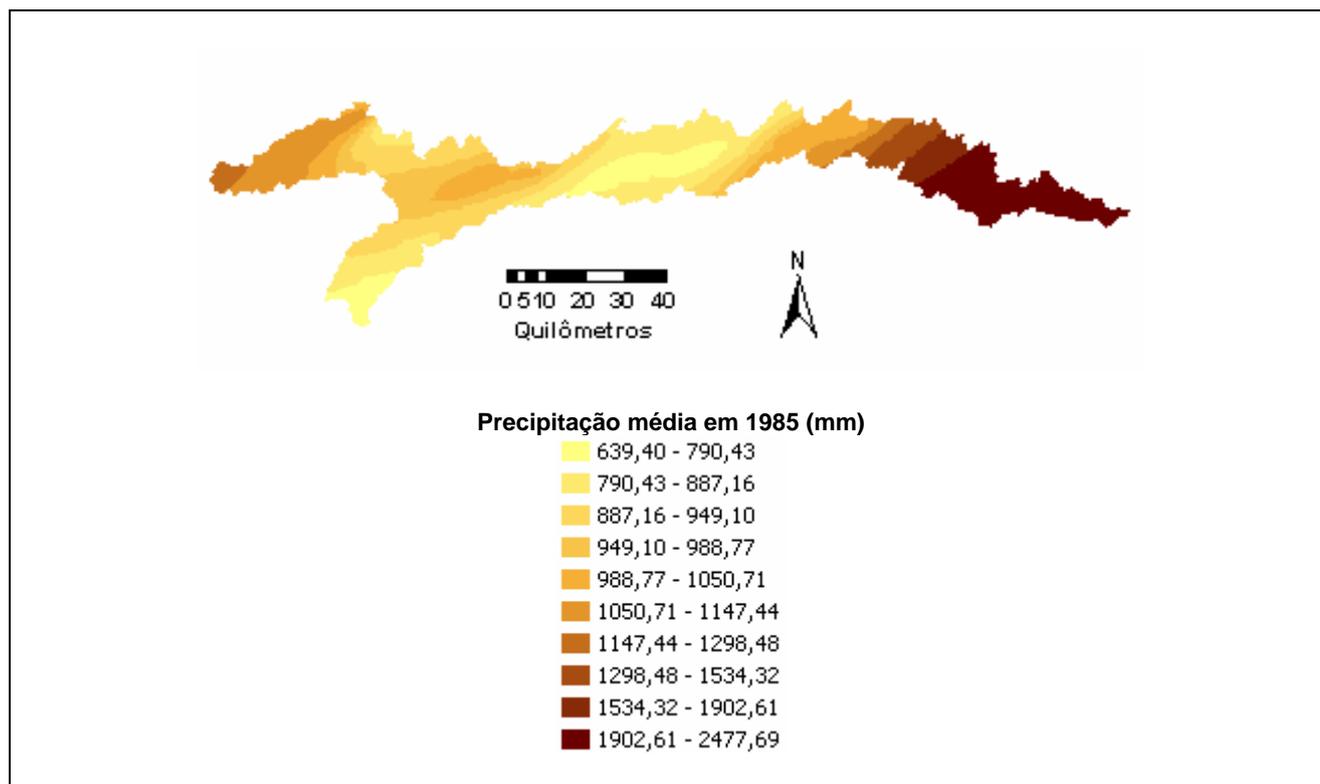


Figura V. 14 – Mapa da precipitação anual média no ano de menor variabilidade espacial com kriging.

Tabela V. 10 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média no ano de mínima variabilidade espacial com kriging.

<b>Método</b>	Kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Precipitação anual média no ano de menor variabilidade espacial
<b>Transformação estatística</b>	Log-normal
<b>Remoção da tendência</b>	2º grau
<b>Direção</b>	Anisotrópica – 62,9°
<b>Modelo do semivariograma teórico</b>	Exponencial
<b>Alcance Máximo (a)</b>	45,244 km
<b>Alcance Mínimo (a)</b>	11,752 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	0,029358 mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	0,0 mm <sup>2</sup>
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100%</b>	0,0 % (forte)
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	53,4 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	304,1 mm
<b>Erro médio padrão</b>	252,2 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	0,04594 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	1,09 mm

### V. 2.3.4 – Análise dos padrões de precipitação

Na aplicação do método kriging para análise dos padrões de precipitação foi utilizado os coeficientes de irregularidade de precipitação como variável. Os modelos dos semivariogramas teóricos foram ajustados ao modelo experimental segundo as estimativas de erros resultantes da validação cruzada conforme a Figura V.15.

Na vizinhança da origem esta função apresentou um comportamento descontínuo devido ao efeito pepita identificado. A estrutura da correlação espacial apresentou-se inferior a das precipitações anuais médias e por este motivo foi considerada moderada por CAMBARDELLA *et al.* (1994). A condição anisotrópica não foi utilizada para essa variável por motivo das estimativas de erros resultantes da validação cruzada não terem sido satisfatórias. Pelo mesmo motivo não foi removida a tendência da variável. O relatório de parâmetros exibido na Tabela V.11 mostra o resumo de todos os valores utilizados no processo. Os erros entre os valores medidos e estimados podem ser avaliados nos gráficos das Figuras V.16 e V.17.

Com a interpolação dos coeficientes de irregularidade pelo método kriging, a superfície mapeada apresentou características semelhantes ao método do inverso de quadrado da distância, quando aplicado à mesma variável. As ocorrências nas sub-regiões da bacia, mostrou que o Litoral e a Zona da Mata identificaram as maiores ocorrências de chuvas frontais, local onde predomina as circulações meteorológicas vindas do Oceano Atlântico, enquanto o Agreste foi caracterizado pelas maiores ocorrências convectivas, onde o ZCIT é mais freqüente.

Constatou-se também que os coeficientes de irregularidade acima de três, considerado alto por LLAMAS (1993), apresentaram-se maiores no Agreste da bacia. As superfícies interpoladas e suas estimativas de erros poderão ser vistas nos mapas da Figuras V.18 e V.19.

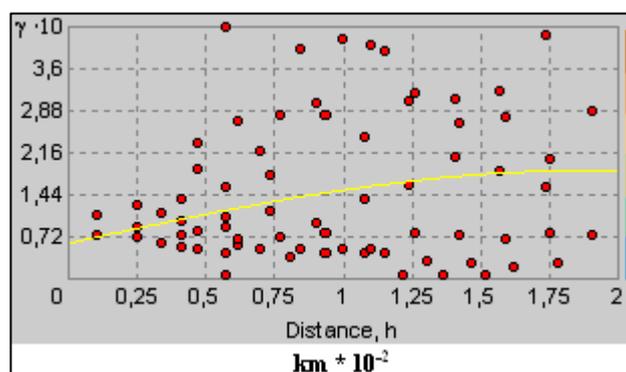


Figura V. 15 – Semivariograma esférico ajustado para os coeficientes de irregularidade com kriging.

Tabela V. 11 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para os coeficientes de irregularidade com kriging.

<b>Método</b>	Kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variável</b>	Coef. de irregularidade
<b>Transformação estatística</b>	Log-normal
<b>Remoção da tendência</b>	Nenhuma
<b>Direção</b>	Isotrópica – 00,0°
<b>Modelo do semivariograma teórico</b>	Esférico
<b>Alcance (a)</b>	183,79 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	0,12396 mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	0,061084
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100</b>	49,3% (moderada)
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	0,03769 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	1,131 mm
<b>Erro medio padrão</b>	1,126 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	0,01276 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	1,025 mm

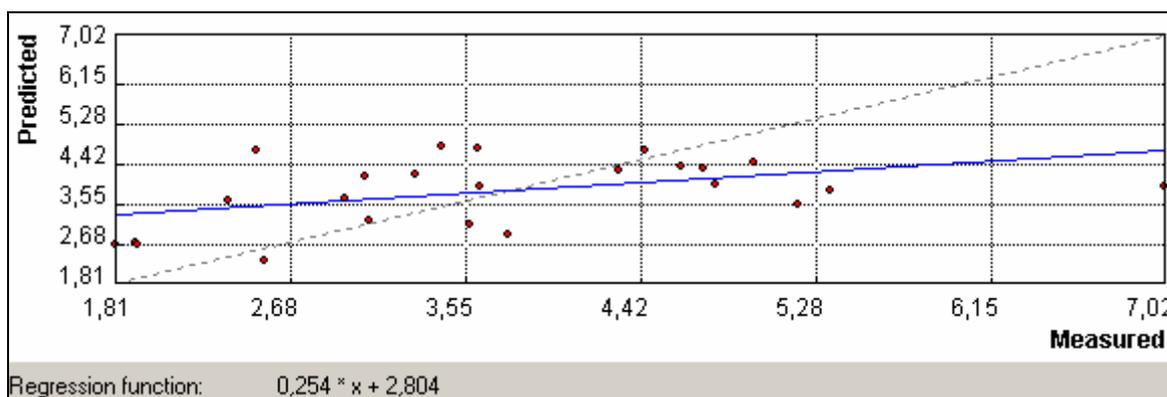


Figura V. 16 – Regressão linear dos valores medidos e estimados para os coeficientes de irregularidade com kriging.

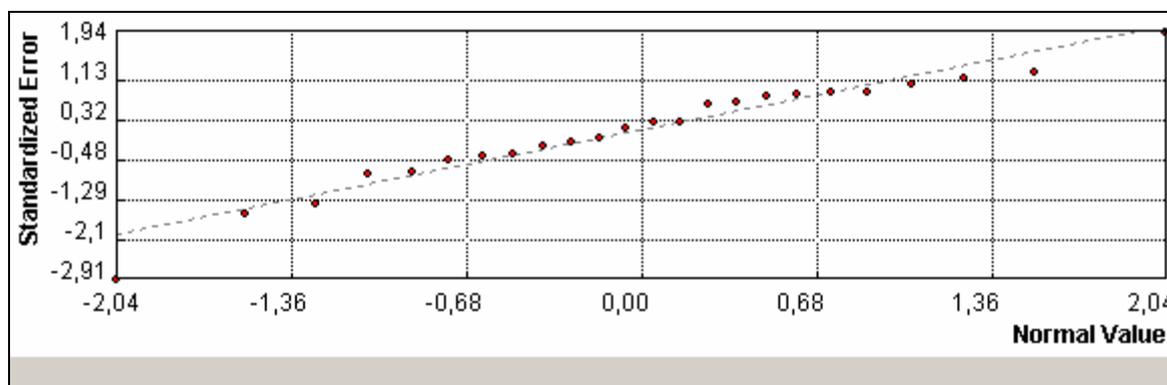


Figura V. 17 – Erros normalizados e valores normais nos coeficientes de irregularidade com kriging.

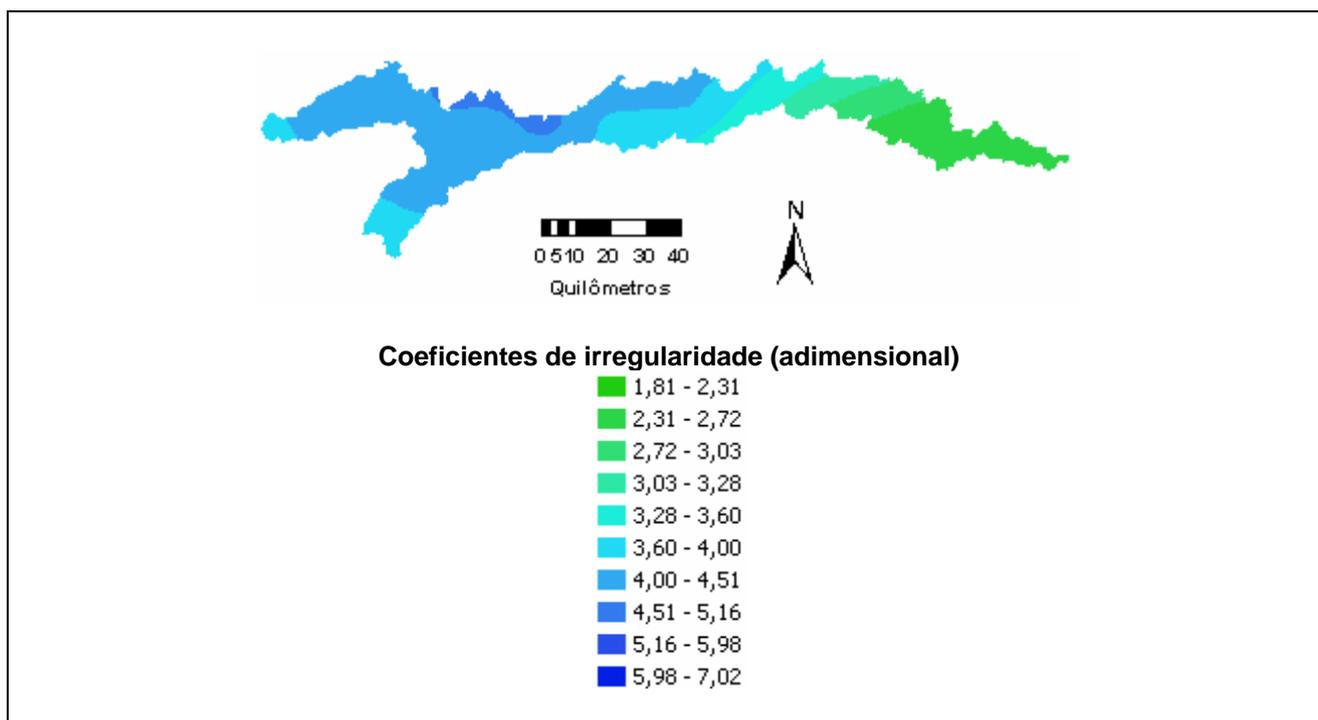


Figura V. 18 – Mapa dos coeficientes de irregularidade com kriging.

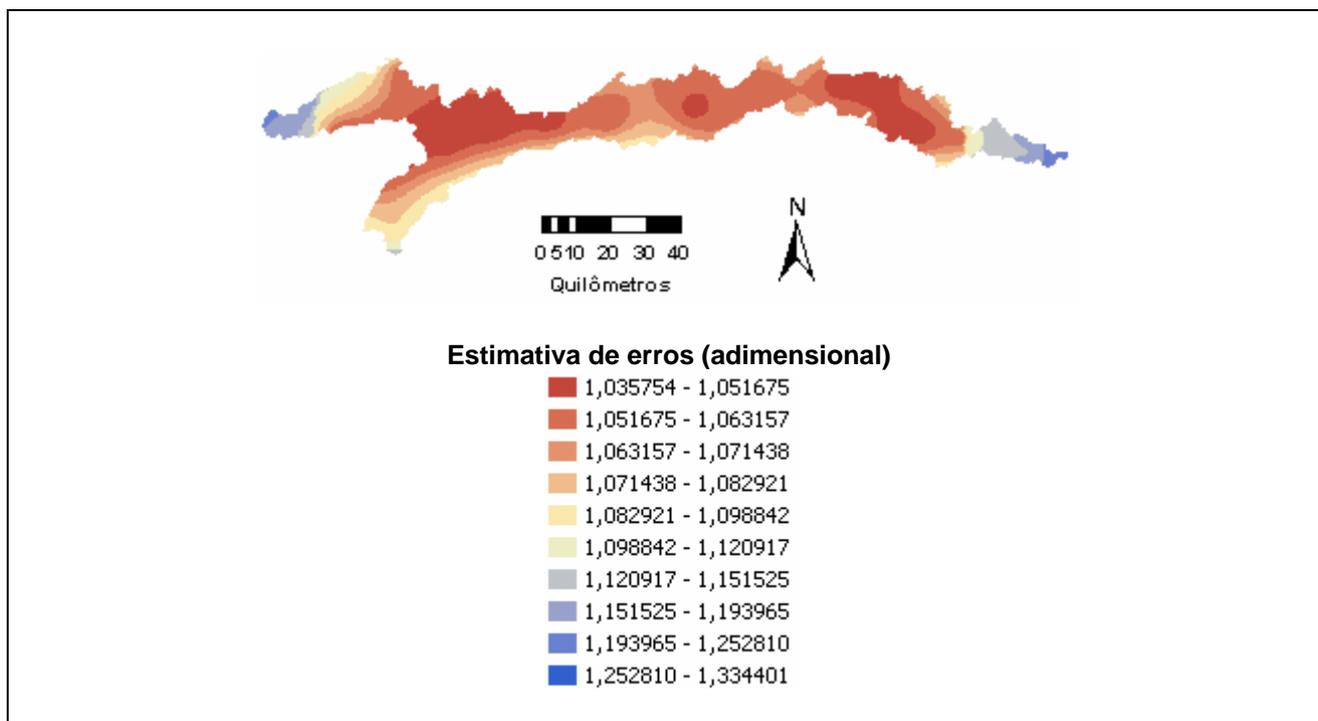


Figura V. 19 – Mapa das estimativas de erros dos coeficientes de irregularidade com kriging.

### V. 2.4 – Co-krigagem

Na aplicação do método foram utilizadas as informações contidas no banco de dados e o software *ArcGIS* para analisar as precipitações anuais médias combinadas com as altitudes. As precipitações anuais médias tiveram seus valores estatísticos transformados em log-normal e as

tendências de segunda ordem não foram removidas em ambas as variáveis. Os resultados foram apresentados sob forma de mapas de interpolação e de estimativas de erros, relatórios dos parâmetros, semivariogramas e gráficos de erros.

#### V. 2.4.1 – Análise da distribuição espacial da precipitação anual média

Os modelos dos semivariogramas teóricos adotados foram testados, porém nenhum se apresentou ideal quanto ao seu ajuste ao modelo experimental. O modelo gaussiano foi escolhido por apresentar uma pequena vantagem na validação cruzada em relação aos demais.

Na análise do comportamento na origem quando ajustado ao modelo gaussiano, foi possível identificar a ocorrência do efeito pepita. Porém, não se pôde conhecer numericamente o valor deste parâmetro. Verificou-se também que o patamar identificado no semivariograma não correspondia a uma localização acima da origem, cujo valor foi representado por um número negativo. Com isto não se pôde conhecer a estrutura de correlação espacial das variáveis combinadas, quando testadas conforme CAMBARDELLA *et al.* (1994).

Nas aplicações utilizando o método kriging foram identificados dois casos de ocorrência do mesmo efeito. O primeiro na análise da variabilidade espacial da precipitação para o ano de máxima variabilidade e o segundo na análise dos padrões de precipitação com os coeficientes de irregularidade. O segundo teve sua estrutura de dependência espacial testada, cujo resultado mostrou-se moderada. Este conhecimento só foi possível por dispor dos elementos necessários ao cálculo, como o valor do patamar e do efeito pepita.

A Figura V.20 mostra o do ajuste do semivariograma experimental ao modelo gaussiano. Os parâmetros utilizados no processo e os resultados das estimativas de erros resultantes da validação cruzada serão apresentados no relatório de parâmetros da Tabela V.12. Os gráficos das Figuras V.21 e V.22 permitem uma avaliação dos erros entre os valores medidos e estimados nas estações. A Figura V.23 apresenta o mapa da distribuição espacial da precipitação anual média e a Figura V.24 o mapa das estimativas de erros. Os erros de estimativas verificados no mapa podem ser considerados muitos elevados se comparados aos erros constatados na aplicação do método kriging.

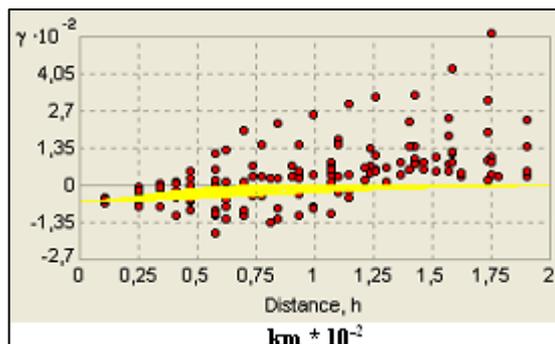


Figura V. 20 – Ajuste do semivariograma gaussiano na precipitação anual média e altitude com co-kriging.

Tabela V. 12 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada para a precipitação anual média e altitude com co-kriging.

<b>Método</b>	Co-kriging
<b>Programa</b>	ArcGIS
<b>Variáveis:</b>	
<b>Precipitação anual média</b>	Distribuição log-normal
	Sem remoção de tendência
<b>Altitudes</b>	Distribuição normal
	Sem remoção de tendência
<b>Direção</b>	Anisotrópico – 46,3°
<b>Modelo do semivariograma teórico</b>	Gaussiano
<b>Alcance Máximo (a)</b>	191,56 km
<b>Alcance Mínimo (a)</b>	66,824 km
<b>Patamar (C + C<sub>0</sub>)</b>	-59,573 mm <sup>2</sup>
<b>Efeito Pepita (C<sub>0</sub>)</b>	Valor não identificado
<b>Dependência espacial [C<sub>0</sub> / (C + C<sub>0</sub>)] x 100</b>	Matematicamente não existe
<b>Validação cruzada:</b>	
<b>Erro médio</b>	-10,81 mm
<b>Erro médio quadrático</b>	241,6 mm
<b>Erro medio padrão</b>	240,4 mm
<b>Erro médio normalizado</b>	-0,01863 mm
<b>Erro médio quadrático normalizado</b>	0,9075 mm

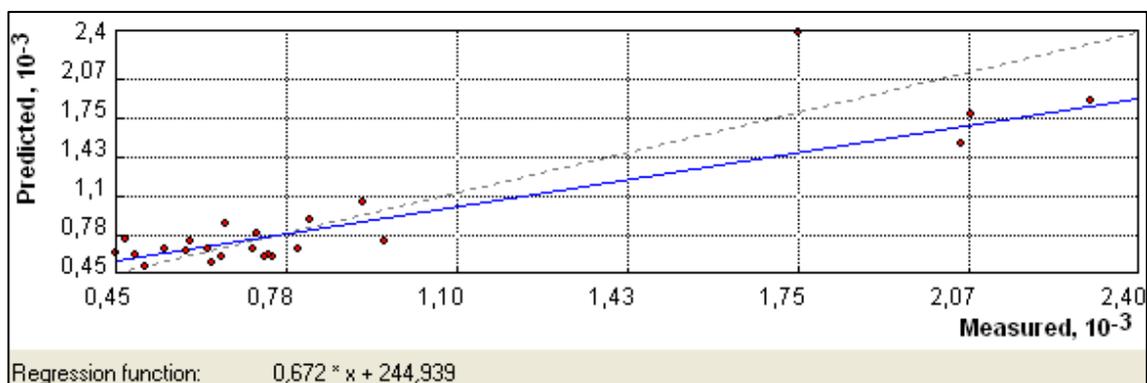


Figura V. 21 – Regressão linear dos valores medidos e estimados para a precipitação anual média e altitude com co-kriging.

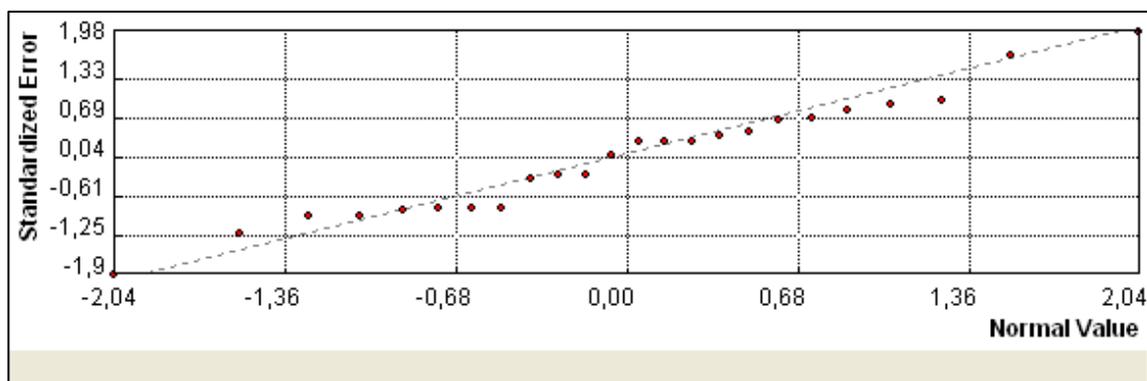


Figura V. 22 – Erros normalizados e valores normais para precipitação anual média e altitude com co-kriging.

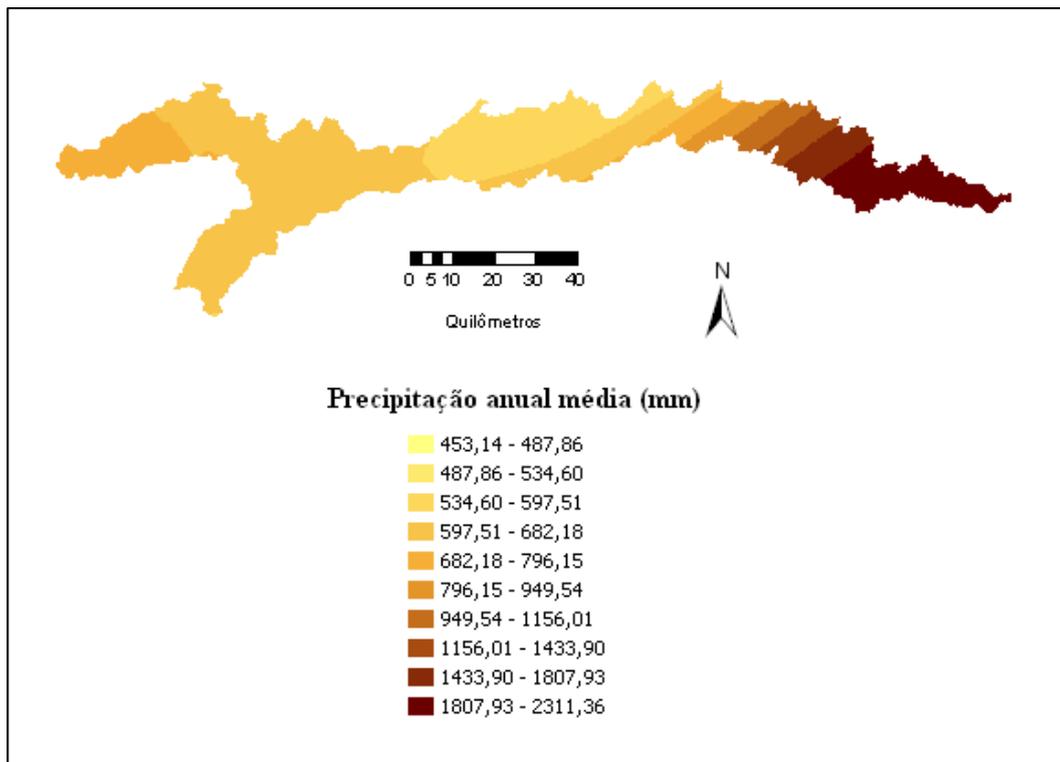


Figura V. 23 – Mapa da precipitação anual média e altitude com co-kriging.

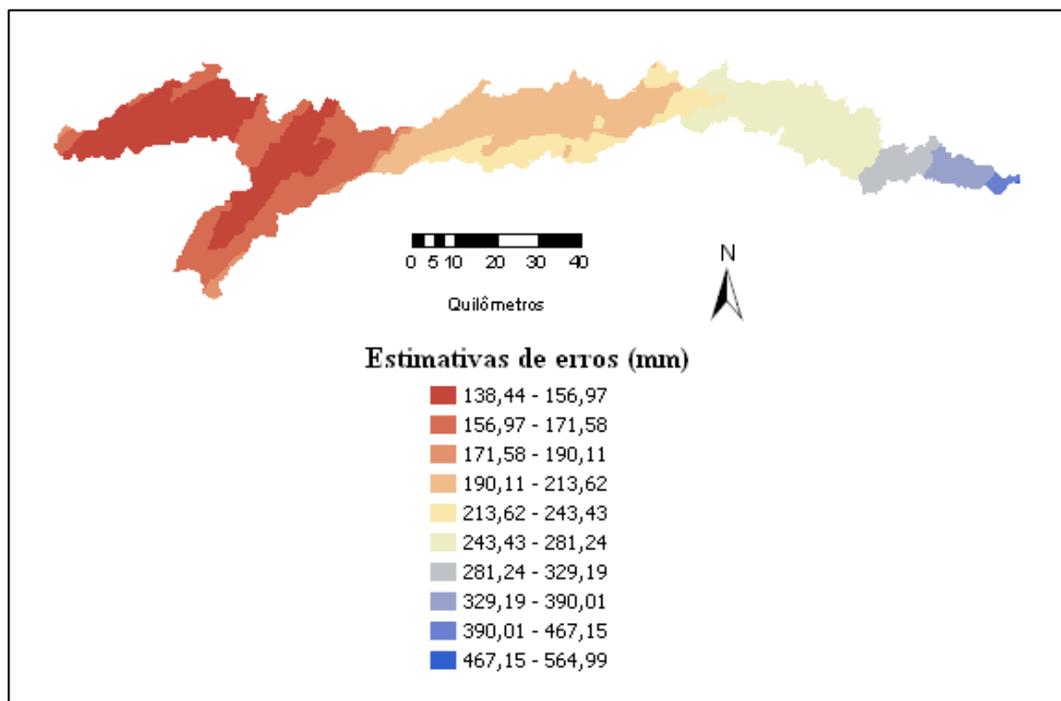


Figura V.24 – Mapa das estimativas de erros da precipitação anual média e altitude com co-kriging.

### V. 2.4.2 – Discussões sobre a aplicação do método co-kriging na Bacia do Ipojuca

A precipitação anual média quando analisada pelo método kriging apresentou na maioria das vezes forte estrutura de correlação espacial. A investigação com o método co-kriging teve como objetivo melhorar a estimativa da precipitação anual média pela inclusão de uma outra variável correlacionada, ou seja, a altitude.

Segundo a fundamentação teórica que rege a geoestatística, o efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Esta descontinuidade pode ser atribuída a erros de medição ou a variabilidade em uma escala menor do que aquela amostrada. Quando o caso é extremo, caracterizando o efeito pepita puro, diz-se que se trata de um caso completamente aleatório onde deve haver independência entre os pontos amostrados, cuja atribuição se deve à ausência total de correlação espacial entre os pontos das variáveis combinadas. Neste caso a geoestatística transforma-se na Estatística clássica, onde se admite a independência entre os acontecimentos. A Figura V.25 explica as variações segundo o comportamento das tendências da precipitação em relação à altitude.

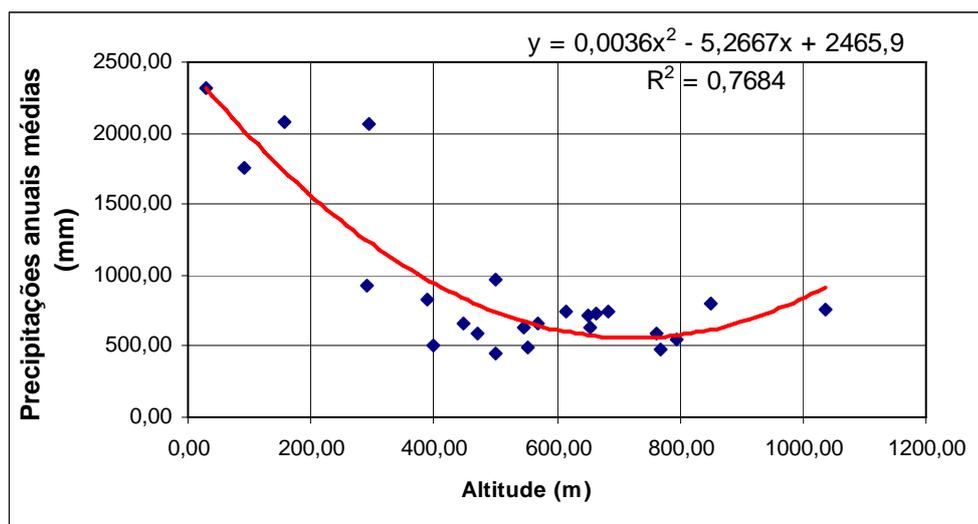


Figura V. 25 – Comparação de tendências entre a precipitação anual média e altitude na Bacia do Ipojuca.

Analisando a Figura V.25 e considerando as sub-regiões da bacia, pode-se observar que na Bacia do Ipojuca as maiores precipitações ocorrem nas regiões de menores altitudes, ou seja, no Litoral e Zona da Mata e as menores precipitações em regiões mais elevadas como o Agreste. O intervalo entre as duas concentrações aponta a área íngreme do Planalto da Borborema, onde os efeitos orográficos definem duas regiões de diferentes regimes hidrológicos.

Estudos mais aprofundados, sobre a aplicabilidade do método co-kriging na Bacia do Ipojuca envolvendo a relação entre as precipitações e as altitudes, deverão ser realizados para maiores esclarecimentos e melhor uso da ferramenta.

*CAPÍTULO VI*

*CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES*

**VI. 1 – Conclusões**

- Sob o aspecto comparativo dos métodos utilizados, para avaliação de padrões espaciais de precipitação comprovou-se que os métodos geoestatísticos dispõem de ferramentas menos limitadas, mais seguras e mais precisas em relação aos métodos usualmente utilizados. Esses últimos deverão ser complementados ou substituídos, permitindo a utilização mais freqüente de métodos geoestatísticos como interpoladores, para estimativa de precipitação média, associada a intervalos de tempo diversos, e avaliação de eficiência de redes pluviométricas.
- O resultado da aplicação das recomendações da OMM para densidades mínimas pode ser considerado incompatível com a determinação do número de pluviômetros obtidos através do critério LLAMAS, na precisão desejada segundo os objetivos principais;
- O valor médio da precipitação anual média obtido pelos métodos do inverso do quadrado da distância e kriging são equivalentes. Porém, supera o valor obtido pelo polígono de Thiessen;
- As características climáticas conhecidas nas diferentes sub-regiões da Bacia do Ipojuca foram comprovadas, desta vez com métodos mais seguros como os geoestatísticos. Para isso foram conhecidas as margens de erros.
- Os mapas das superfícies interpoladas nas análises dos coeficientes de irregularidade meteorológica mostraram que estes constituem excelentes instrumentos para o planejamento e avaliação de redes pluviométricas, por serem indicadores de áreas associadas a maiores ou menores densidades, conforme os padrões de precipitação identificados;
- O resultado da aplicação dos métodos geoestatísticos deve ser tanto melhor quanto maior for a homogeneidade hidrológica da região ou bacia hidrológica. No caso da Bacia do Ipojuca, a sua divisão poderá apresentar resultados mais consistentes, deste que no futuro venha a ter mais disponibilidade de pontos com séries adequadas, principalmente no Litoral;
- O uso do interpolador co-kriging na Bacia do Ipojuca com a precipitação anual média associada à altitude não apresentou resultados satisfatórios, em razão de ter produzido erros de maior magnitude em relação ao interpolador kriging, apesar da comprovada correlação entre as variáveis. São necessárias investigações adicionais sobre a consideração das altitudes na estimativa da precipitação através da geoestatística;
- Considerando a forma alongada da bacia, os sistemas de circulação meteorológica e as obstruções topográficas, como influências direcionais, os ângulos obtidos pela otimização para caracterização da anisotropia, nos diversos ajustes de semivariogramas e validação cruzada, revelaram sempre o sentido nordeste/sudoeste;

- De um modo geral o estudo mostrou que a precipitação na Bacia do Ipojuca apresenta uma forte dependência espacial;
- A Bacia do Ipojuca possui baixa variabilidade temporal da precipitação em relação à variabilidade espacial, demonstrada para análise dos anos de média, alta e baixa variabilidade;
- O inverso do quadrado da distância pode ser considerado um bom interpolador, embora a superfície mapeada não demonstre a mesma qualidade apresentada pelo método kriging e a estimativa dos erros normalizados não seja conhecida;
- Os métodos geoestatísticos apresentam as estimativas dos resíduos das interpolações e a suas respectivas localizações, tornando-os instrumentos apropriados para reestruturação das redes pluviométricas através da análise da distribuição espacial da precipitação. Pode-se então se aproximar da melhor configuração através de testes de simulações e validações cruzadas, para assim recomendar prováveis deslocamentos, desativações, reativações e instalações de novas estações, visando à eficácia do rendimento.

## VI. 2 – Recomendações

- Para que se efetive o uso sistemático dos métodos geoestatísticos na análise da variabilidade espacial da precipitação, torna-se imprescindível que as instituições que mantêm e operam redes pluviométricas realizem avaliações periódicas quanto à eficiência dessas redes, com fins de produzirem dados com qualidade e suficiência.
- A Bacia do Ipojuca é caracterizada por um regime hidrológico irregular e um relevo com elevações variadas. Em se tratando de área de pesquisa, estas considerações destacam essa bacia em relação às outras de Pernambuco, pelo seu relativo nível de complexidade. É preciso salientar que estudos mais avançados deverão ser realizados na bacia, pelo fato da sua reconhecida importância para o desenvolvimento de Pernambuco. Com isto, os resultados provenientes deste trabalho estarão disponíveis às instituições ou pesquisadores interessados.

*CAPÍTULO VII*

*REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

**VII. 1 – Referências bibliográficas**

ACQUAAH, F.A.A. & DANKWA, J.B. (1965). **Ghana Meteorological Networks**. In: Symposium Desing of Hydrological networks – Planification des Réseaux Hidrologiques, Quebec – Canadá, p158 – 161.

AGENDA 21 (1996). **Programa de Suporte Técnico à Gestão de Recursos Hídricos**, In: Encontro Nacional: Recursos hídricos e Desenvolvimento Sustentável, ABEAS, Brasília – DF, CAP.18, p29-36.

ALMEIDA, T. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A.A.A.; OLIVEIRA, O. F. (2004). **Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação na Bacia do Rio Ipanema, Pernambuco**, CD-ROM do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis - MA.

ALVES, A.V.; SOUZA, I. A.; LACERDA, F.F.; SOUZA, W.M.; CORREIA, A. M.; FERREIRA, M. A. F. (2002). **Análise Preliminar da Rede Pluviométrica de Pernambuco**. CD-ROM do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu – PR.

ANA (2002). **Diagnóstico e Planejamento da Rede Hidrometeorológica Básica Nacional**. Partes: Bacia do Rio São Francisco, Estado da Bahia e Estado da Paraíba, Brasília - DF.

ANA (2004). **Agência Nacional de águas**. Disponível on-line em: <http://www.ana.gov.br>, 25/02/2004.

BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. (1993). **Precipitação**. In. TUCCI, C. E. M. Org. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, UFRGS, ABRH, Porto Alegre-RS, Cap 5, p177-200.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F., KORNOPKA, A. E. (1994). **Fieldscale Variability of Soils Properties in Central Iowa Soils**. Soil. Sci. Soc. Am. J., V.58, p1501 – 1511.

CPRM (1998). Companhia de Pesquisa de recursos Minerais, **Alternativas para a Seca no Nordeste** - A água em Revista, canal de informação, ano VI, Nº 10, Rio de Janeiro-RJ, p82-87.

CPRM (2004). **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais**. Disponível on-line em: <http://www.cprm.gov.br>, 25/02/2004.

CPRM & ANEEL (2000). **Regionalização de Vazões da Sub-bacia 39 – Bacias Litorâneas de Pernambuco e Alagoas**, Brasília – DF, Anexo A1 p4.

DAEE (2003). **Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo**. Disponível on-line em: <http://www.dae.sp.gov.br>, 03/09/2003.

EMATER (2003). **Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Pernambuco**. Disponível on-line em: <http://www.emater.pe.gov.br> – 18/09/2003

EMBRAPA (2002). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, **Comparação de Interpoladores Espaciais Univariados para Precipitação Pluvial Anual no Estado de São Paulo**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Comunicado Técnico 33, Campinas – SP, 6p.

FERREIRA FILHO, W. M.; NOGUEIRA, L. A. A.; BEMFEITO, C. J. S. (2000). **Aplicação da Metodologia Kriging à Pluviometria do Estado do Ceará**. CD-ROM do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Natal – RN.

FREITAS, M. A V. & SANTOS. A H. M. (2000). **Perspectivas de Gestão e da Informação de Recursos Hídricos**. In: **O Estado das Águas no Brasil**, ANEEL –, Brasília – DF, Parte 1.

GOMES, R. S. & SILANS, A. M. B. P. (2000). **Comparação de Diversos Métodos de Cálculo da Precipitação Média sobre uma Bacia Hidrográfica**. CD-ROM do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Natal - RN.

HOLANDA, C.V.M. & OLIVEIRA, E. (1979). **Programa para Homogeneização de Dados – PROHD**. In: Anais do III Simpósio de Hidrologia, ABRH, Porto Alegre – RS, p810 – 845.

IBGE (2003). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível on-line em: <http://www.ibge.gov.br>, 25/05/2003.

INMET (2003). **Instituto Nacional de Meteorologia**, Disponível on-line em: <http://www.inmet.gov.br>, 30/08/2003.

IPA (2003). **Instituto de Pesquisa Agropecuária**, Disponível on-line em: <http://www.ipa.gov.br> – 18/09/2003.

IPEA (2004). **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Disponível on-line em: <http://www.ipea.gov.br>, 06/10/2004.

- JOHNSTON, K.; VER HOEF, J. M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. (2001). **Using ArcGis Geostatistical Analyst**. Esri New York – USA, 300p.
- KELMAN, J. (2001). **Missões, Ações e Desafios**, ANA, Brasília – DF, 18p.
- KISHI, R.T. & CENTENO, J.A.S. (1992). **Avaliação da Rede Coletora de Dados Pluviométricos no Estado de Alagoas**. In: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Recife – PE, p211-215.
- LANDIM, P. M. B. (1998). **Análise Estatística de Dados Geológicos**. UNESP, Rio Claro – SP, 226p.
- LANNA, A. E (1993). **Gestão dos Recursos Hídricos**. In: TUCCI, C. E. M. Org. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, UFRGS, ABRH, Porto Alegre-RS, Cap 19, p727-728,.
- LLAMAS, J. (1993). **Curso-Seminário sobre el Manejo de Datos Hidrológicos para Redes y Diseños**. Université de Laval, Québec – Canadá, p1-4.
- MAIA NETO, R. F. (1997). **Água para o Desenvolvimento Sustentável**. In: A água em Revista, Ensaios e Dissertações, CPRM, ano V, Nº 9. Rio de Janeiro-RJ, p21-23
- MAKSOUH, H. (1961). **O Estado Atual dos Conhecimentos sobre os Recursos de Água no Nordeste**. In: Revista Brasileira de Geografia, ano XXIII, Nº 1, p14-20.
- MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M.; OLIVEIRA, M. S. (2003). **Krigagem e Inverso da Distância para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas**. In: Revista Brasileira de Ciências do Solo, V27, Nº 5, Viçosa – MG, p925-933.
- MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A. & MACKAY, R. (1999). **Caracterização da Variabilidade Espacial de Parâmetros Hidráulicos em Solos Aluviais no Estado de Pernambuco**. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, V4, Nº 2, Porto Alegre – RS, p5-17.
- MOTA, S. (1997). **Introdução à Engenharia Ambiental**. ABES, Rio de Janeiro – RJ, 277p.
- MUNIZ, J. N. & RIBEIRO, C. A. A. S. (2000). **Interdisciplinaridade: A Metodologia Integrada na Elaboração de Planos Diretores de Recursos Hídricos**. In: SILVA, D. D. &

PRUSKI, F. F. Orgs. **Gestão de Recursos Hídricos**. UFV, ABRH, Brasília, DF, Caps.3, p413-434.

OLIVEIRA, J. N. & CHAUDRHY, F. H. (1995). **Uso de Métodos Geoestatísticos na Determinação de Isoietas a partir de Dados Pluviométricos**. In: XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, São Paulo – SP, p091 – 097.

PAIVA, E. M. C. D. (2001). **Rede de Monitoramento Hidrológico**. In: PAIVA, J. B. D. & E. M. C. D. Orgs. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. USP, ABRH, Porto Alegre – RS, Cap.17, p493-506.

PNUD (2004). **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento**. Disponível on-line em: <http://www.pnud.org.br/atlas/>, 05/10/2004.

PROENSINO (2000). **Medições Hidrológicas**. CD-ROM do Grupo de Recursos Hídricos, Departamento de Hidráulica, UFPE, Recife - PE.

RODRIGUES, A. A. & SILANS A. M. B. P. (2000). **Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação no Litoral do Nordeste Brasileiro**. CD-ROM do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Maceió - Al.

SALGUEIRO, J. H. P. B. & MONTENEGRO, M. G. L. (2004). **Geoestatística Aplicada à Variabilidade Espacial e Padrões de Precipitação na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco**. CD ROM do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis - MA.

SANTOS, D. G. (2000). **A Experiência Brasileira na Elaboração de Planos Diretores como Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos**. In: SILVA, D. D. & PRUSKI, F. F. Orgs. **Gestão de Recursos Hídricos**. UFV, ABRH, Brasília, DF, Cap.4, p413-434.

SANTOS, I, FILL, H. D., SUGAI, M. R. V. B., BUBA, H., KISHI, R. T., MARONE, E., & LAUTERT, L. F. C. (2001). Org. **Hidrometria Aplicada**. ABRH, Curitiba – PR, Caps. 1 e 2, p21-55.

SCHEFFER, S.; DOHERTY, F. R.; FERREIRA, N. S.; FILHO, P. F. A. (1994). **Análise da Rede Pluviométrica do Estado de Pernambuco**. In: II Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, – 310, Fortaleza – CE, p302.

SECTMA (1998). **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco**. Recife – PE, V1 p74-82 e V2 p46-59.

SECTMA (1999). **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Ipojuca**. Recife - PE, Tomo 1 p1-62, V1/3 94p, V2/3 p1-206, V3/3 p1-110, Tomo II p1-40, Tomo III 45p.

SECTMA (2000). **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca: Riscos de degradação por Disposição Inadequada de Resíduos Sólidos**. Recife - PE, 82p.

SECTMA (2003). **Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio ambiente**. Disponível on-line em: <http://www.sectma.pe.gov.br> – 18/09/2003

SECTMA & PROÁGUA (1997). **Recursos Hídricos - Leis e Decretos, Lei Federal nº 9.433 de 08/01/1997 e Lei Estadual nº 11.426 de 17/01/1997**, Recife – PE, p6-78.

SILVA, R. P.; GALVÃO, C. O.; COSTA, I. C.; MISHINA, A.K.V. (1992). **Diagnóstico da Rede Pluviométrica da Paraíba: Avaliação preliminar**. In: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Recife – PE, p237 – 239.

SPERLING, M. V. (1995). **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. Vº 1, UFMG, Belo Horizonte - MG, p11-16.

SPIEGEL, M.R. (1972). **Estatística**. Coleção Schaum, São Paulo – SP e Rio de Janeiro – RJ, 571p.

SUDENE (1990). **Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste - Estado de Pernambuco – Séries Pluviométricas Nº 6**. Recife – PE, 363p.

SUDENE (2003). **Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste**. Disponível on-line em: <http://www.sudene.gov.br>, 26/11/2003.

SUDENE (2003). **Rede Hidrométrica Básica do Nordeste**. Recife – PE, 3p.

TRARBACH, J. (2004). **Aplicação do Método Geoestatístico para Avaliação da Precisão de Redes Pluviométricas na Estimativa de Precipitação Média Total, Anual e Sazonal, Numa Área**. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória – ES, 103p.

VALENTE, J. M. G. P. (1982). **Geomatemática: Lições de Geoestatística**, Ouro Preto – MG, VI. p15-16 e V.III p565-569.

VIEIRA, S. R. (2000). Geoestatística em Estudo de Variabilidade Espacial do Solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R., eds. **Tópicos em Ciências do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa-MG, V 1, p1-54.

VILLELA, S. M. & MATTOS, A. (1975). **Hidrologia Aplicada**. São Paulo – SP, p1-137.

WMO (1982). **Concepts and Techniques in Hydrological Network Design**. Nº 580, Geneva – Suíça, p16 – 24.

WMO (1984). **Guia de Practicas Hidrológicas**. V1, Aquisicion y Proceso de Datos, 4º edição, Nº 168, Genebra – Suíça, V1 p3-1, p3-20.

WMO (1994). **Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, forecasting and other Applications**. 5º edicion, Nº 168, Geneva – Suíça, Cap. 20, p259

*CAPÍTULO VIII*

*ANEXOS*

*Tabela VIII.1 - Coeficientes de variação espacial e temporal.*

ANO	ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1967	1970,40	1513,90	1960,30	605,80	1639,60	758,10	507,80	358,00	538,00	658,50	785,30	358,80	453,20
1968	1810,70	1177,40	1942,20	874,30	1623,20	711,40	521,30	633,10	179,30	633,80	580,70	184,60	354,50
1969	2323,10	1338,40	2445,90	1300,40	2186,90	975,20	716,90	757,70	678,70	1332,40	710,80	323,70	636,20
1970	2315,60	1682,60	2222,20	1100,70	2010,20	782,60	629,90	573,10	427,70	1112,50	583,70	376,40	443,70
1971	1985,30	1591,40	1697,00	462,40	1501,90	650,40	531,90	538,00	302,00	605,20	539,10	422,90	348,20
1972	2448,50	2246,00	1954,40	822,10	1911,20	762,40	730,70	504,50	439,50	961,70	1080,20	502,70	485,80
1973	2514,50	1452,90	1923,30	820,20	1638,00	703,00	667,00	497,40	461,10	879,70	1103,50	304,30	466,90
1974	2604,20	2080,10	2247,80	1160,70	2507,80	1095,50	829,30	896,80	600,40	1200,00	879,20	544,30	686,50
1975	2464,30	1598,10	2163,20	1005,10	2343,20	882,90	642,40	485,70	670,80	1272,50	874,80	530,90	688,70
1976	2070,30	1461,90	1749,80	952,70	1790,90	783,40	440,70	446,60	628,90	853,20	388,50	394,30	398,90
1977	2598,50	2100,00	2094,90	1190,50	2661,80	1007,00	807,00	762,50	714,80	1345,00	573,50	714,50	555,00
1978	2667,00	1397,70	2230,40	1131,70	2607,90	1240,70	919,00	628,50	667,40	1374,90	642,30	807,50	450,50
1979	2266,80	1517,80	2041,40	808,90	2024,90	695,70	883,80	398,50	444,50	969,90	372,90	199,80	354,30
1980	2256,70	1891,00	2138,30	1026,80	2055,20	766,60	747,40	463,10	334,70	933,30	384,90	252,20	347,30
1981	1994,20	1398,30	1635,20	748,10	1754,70	750,40	678,50	454,70	514,70	805,90	495,40	403,00	524,20
1982	2285,80	1850,00	1795,80	893,30	2044,40	728,20	531,60	403,40	437,80	609,80	373,20	369,90	406,10
1983	1943,00	1600,00	1653,40	725,60	1740,00	596,60	435,30	342,70	383,50	576,70	380,00	330,10	504,20
1984	2693,00	2243,30	2291,30	1073,10	2241,20	925,60	694,50	718,40	689,00	1016,90	534,20	580,10	320,60
1985	2477,70	2082,80	2254,70	1344,00	2319,80	1192,00	1017,20	1013,40	860,40	952,40	708,00	812,10	708,80
1986	3486,20	3007,30	2900,00	1277,90	2864,10	1139,80	867,70	554,80	542,80	1230,00	693,30	686,40	325,10
1987	1963,60	1567,00	1650,00	761,60	1726,50	635,30	495,80	439,80	292,00	730,80	419,20	332,00	478,70
1988	2320,70	1414,80	1950,00	1015,50	2029,40	735,00	518,40	649,80	513,00	1060,00	502,80	389,60	713,40
1989	2791,30	2044,80	2400,00	1064,10	2597,90	1122,30	751,30	831,60	541,80	937,30	638,10	506,40	803,50
1990	2006,50	1873,60	1600,00	742,00	1608,40	693,00	512,90	481,80	358,60	694,90	282,60	188,10	336,70
1991	1926,50	1792,50	1760,00	732,20	1889,70	729,30	570,40	463,40	248,60	777,90	529,00	470,10	454,90
1992	2216,80	2158,60	2250,00	980,90	2229,70	875,20	858,90	570,20	467,20	1025,00	492,00	363,70	585,40
<b>Temporal</b>	0,16	0,22	0,15	0,23	0,18	0,22	0,24	0,30	0,33	0,26	0,36	0,40	0,28

ANO	ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS														Espacial
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24				
1967	821,50	631,80	725,10	847,50	410,40	605,50	832,50	824,50	662,40	1248,70	694,10	0,57			
1968	704,20	908,70	456,40	468,40	689,60	342,90	277,80	785,20	607,00	955,60	855,00	0,64			
1969	905,60	586,80	708,90	824,80	341,20	562,80	790,50	558,30	699,80	893,10	768,90	0,60			
1970	701,60	577,80	702,10	414,30	434,70	261,20	547,20	641,10	297,20	603,10	530,70	0,72			
1971	209,50	648,40	715,60	565,50	654,90	345,80	674,20	711,40	463,10	695,70	444,70	0,68			
1972	308,90	815,40	732,80	668,30	156,00	618,00	959,10	698,20	544,40	963,00	851,80	0,65			
1973	399,30	1416,70	665,10	498,70	778,10	638,50	797,90	591,90	545,00	703,20	452,00	0,63			
1974	877,30	1029,00	1002,10	964,20	489,20	696,00	980,10	1109,90	926,40	1358,60	1158,90	0,50			
1975	761,00	856,40	796,30	777,80	336,90	736,50	1103,80	814,30	862,20	976,20	873,90	0,55			
1976	510,40	1042,80	600,00	564,50	363,10	575,00	696,90	740,50	551,60	438,40	830,10	0,62			
1977	812,00	1046,80	930,00	1064,40	712,00	663,10	1046,40	1048,80	877,30	752,00	806,30	0,54			
1978	813,90	590,60	915,00	802,50	358,80	700,90	698,90	857,80	832,80	928,40	933,60	0,58			
1979	433,10	760,50	480,00	636,50	304,70	298,70	345,70	490,80	345,30	553,80	617,40	0,78			
1980	350,30	645,10	470,70	384,20	379,10	324,30	371,70	360,90	358,60	806,00	643,40	0,81			
1981	579,20	403,80	761,80	365,50	387,90	390,00	642,10	538,30	498,10	695,80	587,70	0,64			
1982	332,10	414,70	498,80	577,80	266,70	273,50	534,80	319,20	416,70	670,80	556,70	0,81			
1983	417,10	712,50	504,30	369,20	674,20	472,40	507,30	432,50	280,10	528,80	378,90	0,74			
1984	653,80	916,80	759,20	740,70	616,90	635,50	970,80	697,70	727,90	903,00	820,50	0,62			
1985	1005,50	917,80	1042,00	976,70	639,40	694,00	985,90	1119,80	913,50	1065,80	1059,00	0,46			
1986	720,30	551,3	840,80	807,40	269,70	512,70	840,20	1155,20	677,20	837,40	954,30	0,77			
1987	499,60	638,20	540,00	395,00	614,00	390,70	572,40	542,10	355,60	517,20	552,60	0,70			
1988	886,60	885,80	765,00	755,90	643,60	867,90	729,00	784,80	649,80	637,40	792,10	0,55			
1989	591,00	498,80	840,00	236,90	248,80	705,00	989,10	840,80	859,60	1068,20	1083,50	0,66			
1990	427,40	640,50	511,50	225,10	596,00	311,50	420,00	413,80	331,60	253,60	499,30	0,81			
1991	448,60	862,30	542,30	891,30	583,95	410,60	585,00	800,90	376,00	358,00	436,00	0,68			
1992	885,80	318,90	751,80	351,10	352,28	551,50	780,00	886,10	554,40	636,60	612,30	0,69			
<b>Temporal</b>	0,36	0,33	0,24	0,39	0,37	0,33	0,32	0,32	0,35	0,34	0,30				

## VIII. 2 - Relatórios finais do ArcGIS

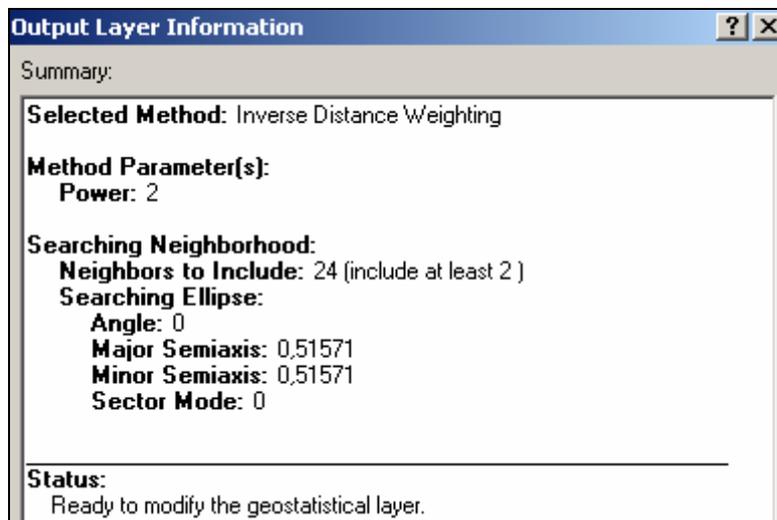


Figura VIII. 1 – Relatório final das precipitações anuais médias com o inverso do quadrado da distância.

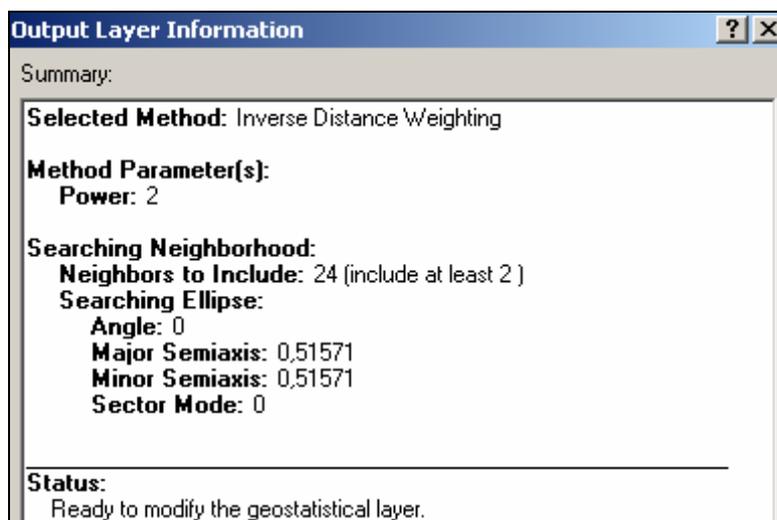


Figura VIII. 2 – Relatório final dos coeficientes de irregularidade com o inverso do quadrado da distância.

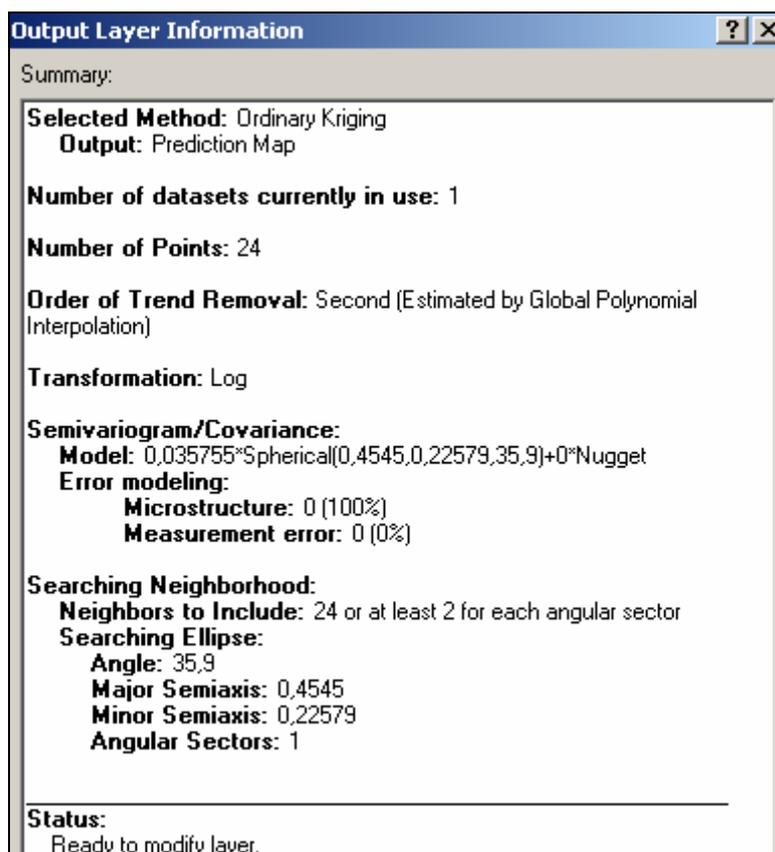


Figura VIII. 3 – Relatório final das precipitações anuais médias com kriging.

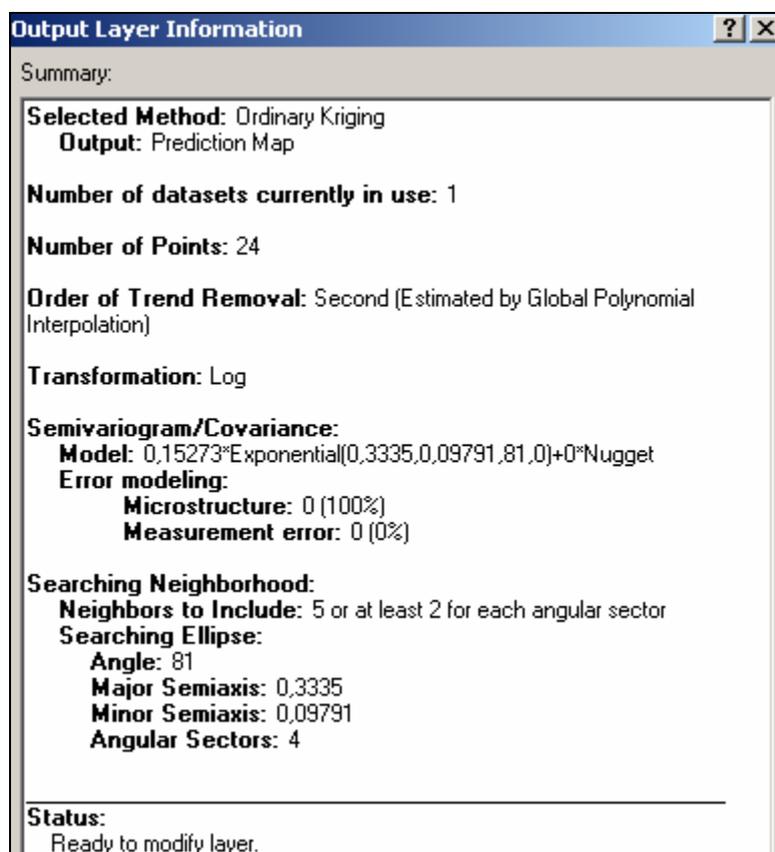


Figura VIII. 4 – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de média variabilidade espacial com kriging.

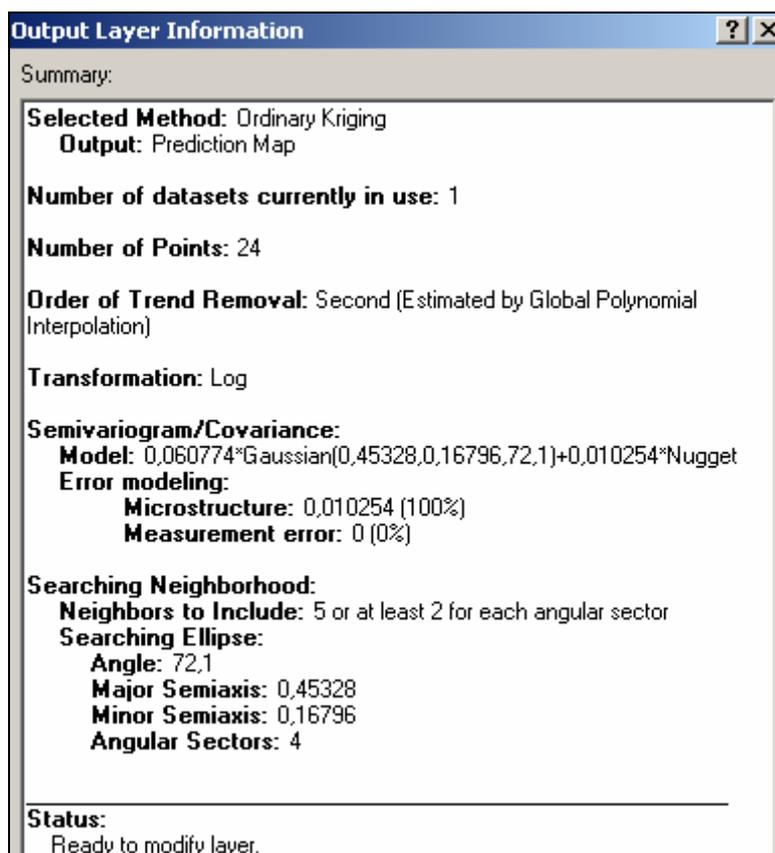


Figura VIII. 5 – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de máxima variabilidade espacial com kriging.

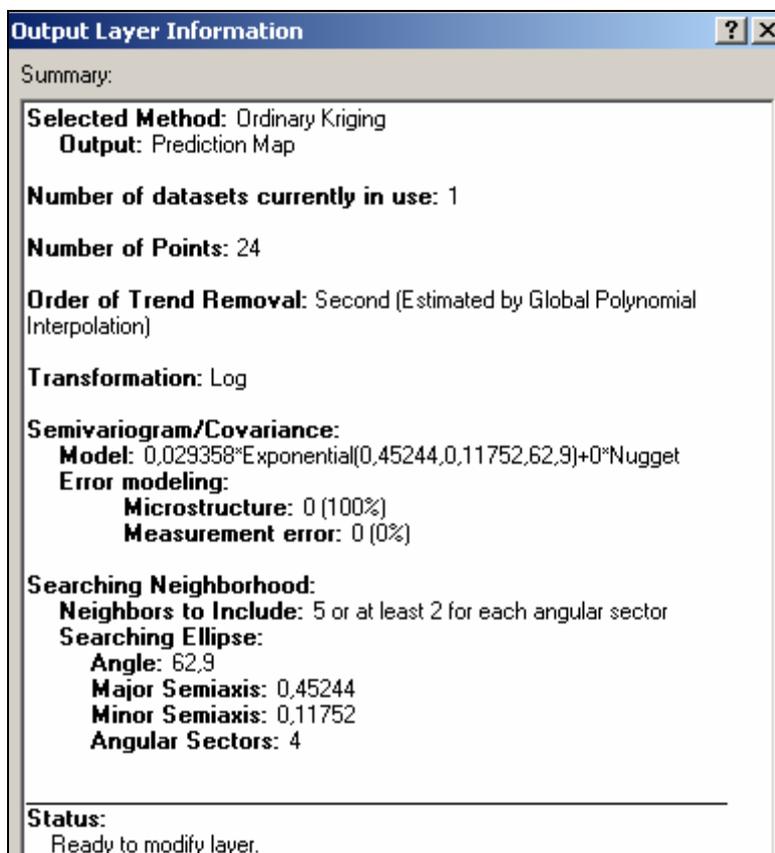


Figura VIII 6 – Relatório final das precipitações anuais médias no ano de mínima variabilidade espacial com Kriging.

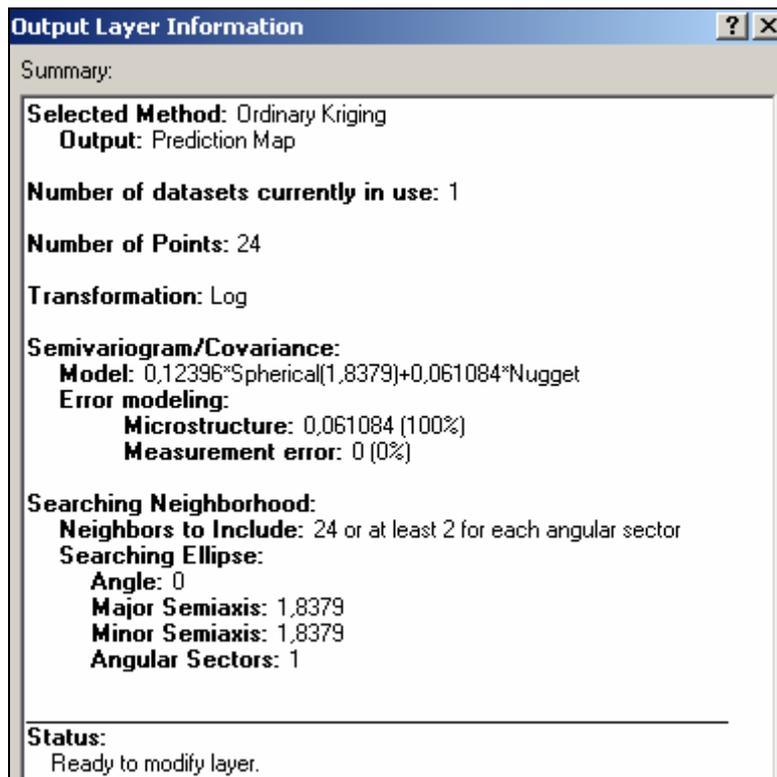


Figura VIII. 7 – Relatório final dos coeficientes de irregularidade com Kriging.

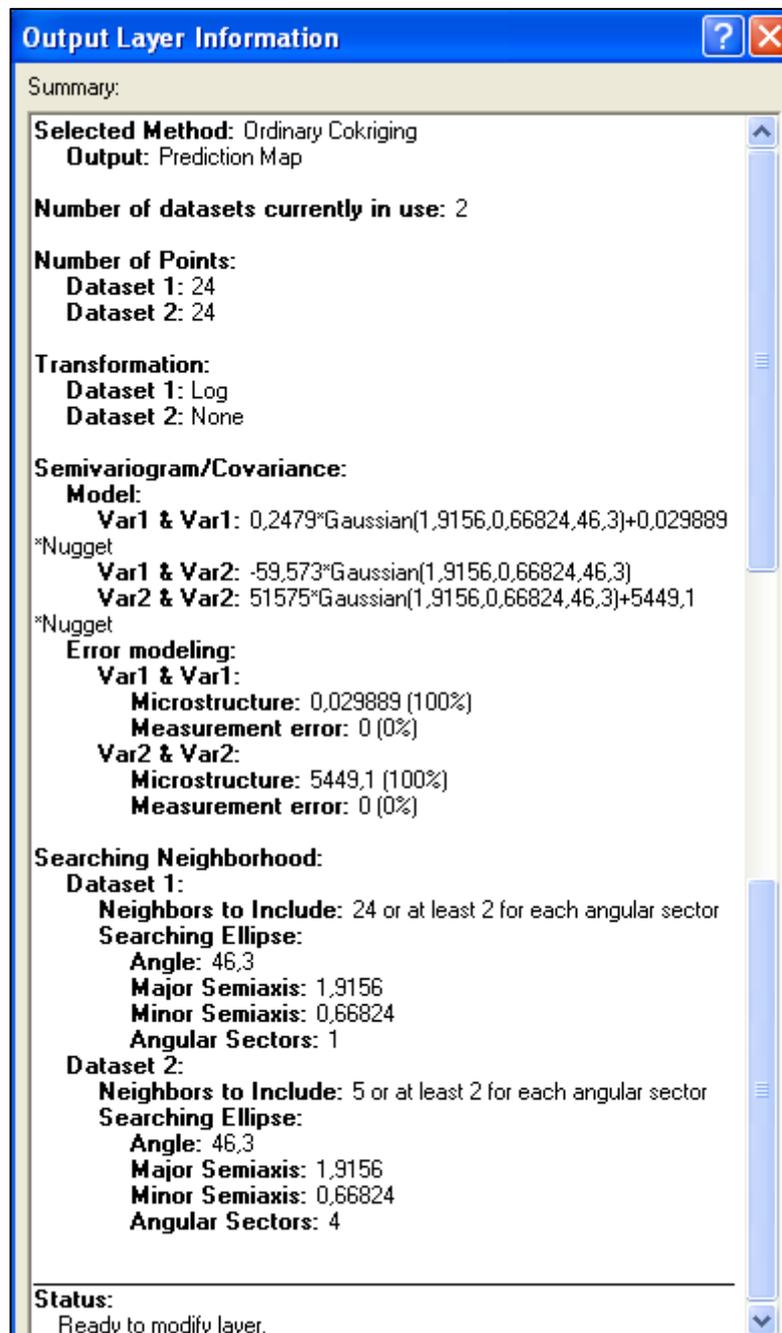


Figura VIII. 8 – Relatório final das precipitações anuais médias com co-kriging.