

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
DOUTORADO

REGRESSÃO LOGÍSTICA E REDES NEURAS APLICADAS À
PREVISÃO PROBABILÍSTICA DE ALAGAMENTOS NO MUNICÍPIO
DE CURITIBA, PR

MARCIEL LOHMANN

CURITIBA,

2011

MARCIEL LOHMANN

**REGRESSÃO LOGÍSTICA E REDES NEURAIS APLICADAS À
PREVISÃO PROBABILÍSTICA DE ALAGAMENTOS NO MUNICÍPIO
DE CURITIBA, PR**

Tese apresentada como requisito à obtenção de grau de Doutor. Curso de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração em Análise e Gestão Ambiental, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos

CURITIBA

2011

*Dedico este trabalho aos que acreditam
na concretização dos sonhos.*

*Em especial a minha esposa Camilla,
meus pais Julio e Solange
e meu irmão Ismael.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, em especial ao curso de Pós-Graduação em Geografia, por ter me oportunizado realizar o curso de Doutorado em Geografia;

Ao professor Dr. Leonardo José Cordeiro Santos pela orientação, sugestões e sempre apoio fornecidos durante a elaboração desta tese e, acima de tudo, pela paciência e amizade construída ao longo destes vários anos de convivência, que já vem desde o mestrado;

Ao Diretor Superintendente do Instituto Tecnológico SIMEPAR Dr. Eduardo Alvim Leite, por sua visão, entusiasmo e sempre disposição demonstrada em todos os momentos, bem como por suas excelentes idéias e discussões a cerca do tema pesquisado, que em muito enriqueceram o meu aprendizado;

Ao secretário do curso de Pós-Graduação Luiz Carlos Zem, mais conhecido apenas como “Zem”, pelo sempre apoio e incentivo concedido durante a realização da tese, mas acima de tudo, pela grande pessoa, grande amigo e “irmão” que é.

Aos colegas do Instituto Tecnológico SIMEPAR, em especial Ângelo Breda, João Paulo Sabóia e Anne Caroline Negrão pela amizade e empenho irrestrito na elaboração de diversos programas desenvolvidos em Python e Fortran que em muito agilizaram o tratamento e interpretação dos dados trabalhados na tese;

Ao Flavio Deppe pelas palavras de motivação e apoio para a elaboração do trabalho

À direção do Instituto Tecnológico SIMEPAR, pela cessão de dados e informações hidrometeorológicas que serviram de base para a elaboração deste trabalho;

A Prefeitura Municipal de Curitiba e Defesa Civil Municipal pela cessão dos dados pontuais de alagamentos bem como da base cartográfica de Curitiba;

A minha esposa Camilla pelo seu amor, incentivo e palavras fortes que sempre guiaram a busca de aperfeiçoamento e de novos conhecimentos;

Aos meus pais, Julio Astor Lohmann e Solange Maria Lohmann e meu irmão Ismael, que mesmo longe, sempre incentivaram e apoiaram a conclusão desta tese.

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar, é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver...”

(Martin Luther King)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	22
1.2	ÁREA DE ESTUDO – BREVE DESCRIÇÃO	23
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	EVENTOS EXTREMOS E DESASTRES.....	30
2.2	PRECIPITAÇÕES INTENSAS	38
2.3	DEFINIÇÕES SOBRE ENCHENTE, INUNDAÇÃO E ALAGAMENTO	41
2.4	GERENCIAMENTO DO RISCO DE INUNDAÇÃO	53
2.5	ALAGAMENTOS E INUNDAÇÕES NA RMC	57
2.5.1	<i>Índice de Agravamento de Inundações.....</i>	<i>62</i>
2.6	RADAR METEOROLÓGICO E DADOS DE CHUVA	64
2.7	O SATÉLITE METEOROLÓGICO GOES 12	76
2.8	REGRESSÃO LOGÍSTICA	81
2.9	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	88
2.9.1	<i>Mapas Auto-Organizáveis</i>	<i>91</i>
2.9.2	<i>O processo de Aprendizagem</i>	<i>93</i>
2.9.3	<i>Estrutura do Algoritmo dos Mapas Auto-Organizáveis.....</i>	<i>94</i>
2.10	RELEVÂNCIA DO USO DAS PREVISÕES PROBABILÍSTICAS	97
2.11	AVALIAÇÃO DE MODELOS PROBABILÍSTICOS	99
2.11.1	<i>Curva ROC (Receiver Operating Characteristic).....</i>	<i>100</i>
2.11.2	<i>Área sob a Curva ROC.....</i>	<i>104</i>
2.11.3	<i>Diagrama de Confiabilidade, Discriminação e Refinamento (Reliability, Discrimination and Sharpness Diagram).....</i>	<i>106</i>
2.11.4	<i>Avaliação da Melhor Estimativa Determinística</i>	<i>108</i>
3	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS-OPERACIONAIS E METODOLÓGICOS	109
3.1	BASE CARTOGRÁFICA.....	109
3.2	DADOS DE ALAGAMENTOS	109
3.3	ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS	113
3.4	DADOS DE CHUVA	114
3.5	DISSEMINAÇÃO DAS PREVISÕES DE PROBABILIDADE.....	124
3.6	SOFTWARE ESTATÍSTICO	124
3.7	A REGRESSÃO LOGÍSTICA	125
3.8	MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS (SOM).....	127

3.8.1	<i>Indicadores de Desempenho</i>	132
3.9	AVALIAÇÃO DA MELHOR ESTIMATIVA.....	133
3.10	ANÁLISE DE SIGNIFICÂNCIA DOS RESULTADOS	134
4	RESULTADOS	137
4.1	ALAGAMENTOS EM CURITIBA – CARACTERÍSTICAS E DINÂMICA	137
4.1.1	<i>Análise do Número de Alagamentos</i>	137
4.1.2	<i>Análise do Total de Alagamentos por Bacia Hidrográfica</i>	143
4.1.3	<i>Análise dos Dias com Alagamento e do Número de Alagamentos Diários</i> ... 144	
4.1.4	<i>Análise Mensal dos Alagamentos</i>	147
4.1.5	<i>Análise da Frequência de Alagamentos ao Longo do Dia</i>	148
4.1.6	<i>Análise Preliminar da Seqüência de Chuvas que Antecederam os Alagamentos</i>	150
4.1.7	<i>Determinação do Número de Dias a ser Considerado na Construção dos Modelos</i>	154
4.1.8	<i>Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)</i>	156
4.2	RESULTADOS DOS MODELOS DE REGRESSÃO LOGÍSTICA E REDES NEURAI (SOM)	159
4.2.1	<i>Desempenho do Modelo de Regressão Logística</i>	160
4.2.2	<i>Desempenho do Modelo Redes Neurais (SOM)</i>	168
4.3	OS PADRÕES DE CHUVA	178
4.3.1	<i>Simulação de Padrões Hipotéticos</i>	190
4.4	AVALIAÇÃO DA MELHOR ESTIMATIVA: NÚMERO ESPERADO DE ALAGAMENTOS	192
4.5	ANÁLISE DA SIGNIFICÂNCIA DOS RESULTADOS	195
4.6	ESPACIALIZAÇÃO DA PROBABILIDADE E DO NÚMERO ESPERADO DE ALAGAMENTOS (NEA).....	198
5	CONCLUSÕES	209
5.1	RELATIVAS AOS DADOS UTILIZADOS	209
5.2	RELATIVAS AOS MÉTODOS PREDITIVOS UTILIZADOS	211
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	215
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	218

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de localização do município de Curitiba.....	24
Figura 1.2	Bacias Hidrográficas de Curitiba	27
Figura 2.1	Panorama dos tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil (1900-2006).....	31
Figura 2.2	Distribuição dos desastres naturais no Brasil (1900-2006).....	32
Figura 2.3	Modelo esquemático da conceituação relacionada aos desastres.	36
Figura 2.4	Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas e situação de alagamento.	43
Figura 2.5	Diferença entre inundação brusca e gradual	46
Figura 2.6	Ilustração de redução da magnitude.....	50
Figura 2.7	Ilustração de redução da vulnerabilidade.....	50
Figura 2.8	Conceitos e princípios em gerenciamento de riscos de inundações.....	54
Figura 2.9	Ciclo de gerenciamento de um desastre.....	55
Figura 2.10	Ciclo de gerenciamento de risco.	57
Figura 2.11	Inundação na Rua XV de Novembro – Fevereiro de 1999.	58
Figura 2.12	Esquema de funcionamento do radar	65
Figura 2.13	Representação dos resultados das varreduras do radar: a) IPP; b) IDA.....	66
Figura 2.14	Esquema ilustrado da confecção de um IPPAC.....	67
Figura 2.15	Formas de medidas – pluviômetro e radar	72
Figura 2.16	Forma da relação logística entre variáveis dependente e independente.....	85
Figura 2.16	Neurônio biológico	89
Figura 2.17	Exemplo de um Mapa Auto-organizável bidimensional N x M, com entrada x_k	92
Figura 2.18	Diferentes topologias para estruturação dos mapas auto-organizáveis: a) unidimensional; b) bidimensional hexagonal; c) bidimensional retangular.....	93
Figura 2.19	Curva ROC para uma dada capacidade de discriminação, com a variação do ponto de corte (critério de decisão)	102
Figura 2.20	Exemplos de diferentes curvas ROC (Perfeita, Boa e Aleatória)	103
Figura 2.21	Trapézios da Curva ROC formando a área sob a curva.....	105
Figura 2.22	Exemplo de diagrama de confiabilidade	106
Figura 2.23	Diferentes tipos de resultados para o diagrama de discriminação	107
Figura 2.24	Exemplo de diagrama de discriminação e refinamento	107
Figura 3.1	Estimador de Kernel para um padrão de pontos	112
Figura 3.2	Distribuição das estações meteorológicas e hidrológicas telemétricas no Paraná e área de cobertura do radar no modo quantitativo (200 km).....	117
Figura 3.3	Grade de 10x10 e 4x4km	121
Figura 3.4	Exemplo de gráfico elaborado para identificar a dinâmica da chuva no dia da ocorrência e em três dias anteriores na bacia do rio Barigui; Dia 15/03/2007.....	123
Figura 3.5	Ilustração da adaptação dos pesos de uma rede de Kohonen (Zuchini, 2003).....	127
Figura 3.6	Exemplo de linhas de comando utilizadas para inicialização do SOM e mensuração dos erros.....	129
Figura 3.7	Gráfico dos erros associados a definição do número de codebooks em diferentes simulações. Em (B) visão aumentada do gráfico (A).	130
Figura 3.8	Diagrama ilustrando as etapas utilizadas para elaborar a previsão probabilística via o SOM.....	132
Figura 4.1	Número total de ocorrências de Defesa Civil e número de alagamentos registrados em Curitiba entre 2005 e 2010.....	137

Figura 4.2	Número total de alagamentos registrados em Curitiba entre os anos de 2005 e 2010	138
Figura 4.4	Espacialização de todas as ocorrências de alagamentos registradas em Curitiba entre os anos de 2005 e 2010.....	141
Figura 4.5	Cartogramas de densidade de alagamentos para Curitiba os anos de 2005 a 2010	142
Figura 4.6	Número de alagamentos registrados por ano nas bacias hidrográficas entre 2005 e 2010	143
Figura 4.7	Número total de alagamentos registrados por bacia hidrográfica entre os anos de 2005 e 2010.....	144
Figura 4.8	Frequência acumulada do número de alagamentos por dia em situação de alagamento (número médio de alagamentos em dias de evento)	146
Figura 4.9	Ocorrências de alagamentos para os 12 meses do ano com período de análise de 2005 a 2010	147
	Iniciando em novembro e concentrando-se até março, esse meses respondem por 73% de todos os alagamentos que ocorrem no ano, mostrando que o planejamento de ações bem como planos de contingência já devem estar preparados caso necessitem ser utilizados em situação de emergência.	147
Figura 4.10	Frequência (A) e frequência acumulada (B) de ocorrências de alagamentos de hora em hora para as bacias hidrográficas.....	149
Figura 4.11	Frequência de ocorrências de alagamento de 6 em 6 horas para as bacias hidrográficas de Curitiba	149
Figura 4.12	Chuva acumulada em 6 horas no dia do alagamento e nos três dias anteriores utilizando método de Thiessen e Inverso da Distância ao Quadrado para cada uma das bacias hidrográficas de Curitiba	152
Figura 4.13	Chuva acumulada do tempo t até o dia do alagamento utilizando método de Thiessen e Inverso da Distância ao Quadrado para cada uma das bacias hidrográficas de Curitiba	153
Figura 4.14	Chuva acumulada diária no dia do alagamento e em dias anteriores ao do evento nas diferentes bacias hidrográficas e Curitiba	155
Figura 4.15	Gráficos apresentando as Curvas ROC geradas para as três funções de ligação e para os dois métodos de cálculo de chuva média no período de calibração para as bacias hidrográficas e para o município de Curitiba	163
Figura 4.16	Curvas das funções Logit, Normit e Gompit	165
Figura 4.17	Comparação das Curvas ROC geradas para a verificação considerando apenas os melhores resultados para Curitiba e para as bacias hidrográficas.....	167
Figura 4.18	Curvas ROC geradas para a calibração considerando apenas os melhores resultados para Curitiba.	169
Figura 4.19	Curvas ROC geradas para a calibração considerando as bacias hidrográficas	171
Figura 4.20	Curvas ROC geradas para a verificação considerando apenas os melhores resultados para Curitiba.	172
Figura 4.21	Diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento das previsões geradas via regressão logística e SOM.....	176
Figura 4.22	Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 75%	178
Figura 4.23	Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 50%	179
Figura 4.24	Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 75%	180
Figura 4.25	Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 50%	180

Figura 4.26 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 75%.....	182
Figura 4.27 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 50%.....	183
Figura 4.28 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 75%.....	184
Figura 4.29 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 50%.....	184
Figura 4.30 Gráfico de área para todos os padrões de chuva considerando as probabilidade maiores ou iguais a 75% - Escala de 6 horas.....	186
Figura 4.31 Gráfico de frequência da chuva acumulada no dia do evento, no dia do evento e 1 dia anterior, no dia do evento e 2 dias anteriores e no dia do evento e 3 dias anteriores,	188
Figura 4.32 Probabilidade e NEA em relação a uma chuva hipotética concentrada no último dia.....	191
Figura 4.33 Gráfico das distribuições de frequência para o SSEMQ e Área sob a curva ROC das reamostras geradas pelo Bootstrap.....	196
Figura 4.34 Espacialização da probabilidade de alagamentos por bacia hidrográfica para o dia 13/12/2010.....	198
Figura 4.35 Grade de 1x1km, buffers e o resultado da operação “Spatial Join”.....	200
Figura 4.36 Raster contendo o somatório de áreas de alagamento em cada pixel da grade de 1x1km, dividido pela área do círculo de 300m.....	200
Figura 4.37 Número histórico de alagamentos registrados por km ² (2005-2010).....	203
Figura 4.38 Número esperado de alagamentos por km ² para o dia 23/04/2010.....	204
Figura 4.39 Número esperado de alagamentos por km ² para o dia 24/09/2010.....	205
Figura 4.40 Número esperado de alagamentos por km ² para o dia 30/10/2010.....	206
Figura 4.41 Número esperado de alagamentos por km ² para o dia 13/12/2010.....	207

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos desastres quanto à evolução	34
Tabela 2.2 – Classificação dos desastres quanto à origem	34
Tabela 2.3 – Classificação dos desastres quanto à intensidade	34
Tabela 2.4 – Conceitos utilizados para definir as inundações graduais	44
Tabela 2.5 – Conceitos utilizados para definir as inundações bruscas	45
Tabela 2.6 – Estimativa de danos de cheias na RMC.....	61
Tabela 2.7 – Indicador de Agravamento de Inundações para as bacias que integram o município de Curitiba	64
Tabela 2.7 – Equações ZxR.....	71
Tabela 2.9 – Série de satélites GOES	77
Tabela 2.10 – Características dos satélites GOES	77
Tabela 2.11 – Características do sensor imageador do GOES 12	78
Tabela 2.12 – Tipos de variável resposta	82
Tabela 2.13 – Funções de ligação.....	85
Tabela 3.1 – Modelo da estrutura da tabela.....	111
Tabela 3.2 – Características técnicas do radar DWSR-93/EDGE do SIMEPAR.....	116
Tabela 3.3 – Exemplo de tabela construída que serviu de base para entrada no Minitab	125
Tabela 3.4 – Relação entre número de ocorrências de alagamentos e de dias com ocorrência de alagamentos.....	126
Tabela 4.1 – Número total de ocorrências de Defesa Civil e alagamentos registrados em Curitiba entre 2005 e 2010	138
Tabela 4.2 – Percentagem de dias sem e com ocorrências de alagamentos (2005-2010)	145
Tabela 4.3 – Total de ocorrências de alagamentos por mês em Curitiba	148
Tabela 4.4 –Valores significativos e críticos para a estatística K-S	158
Tabela 4.5 –Valores críticos ($D_{crítico}$) para cada bacia hidrográfica e para o município de Curitiba	158
Tabela 4.6 –Resultados para o teste de Kolmogorov-Smirnov para as diferentes bacias e para o município de Curitiba (D_{max})	159
Tabela 4.7 – Resultados da área sob a curva ROC para as bacias hidrográficas e o município de Curitiba para a Calibração, Regressão Logística.....	163
Tabela 4.8 – Comparação da área sob a curva gerada para os melhores resultados por bacia e para Curitiba - Verificação	167
Tabela 4.9 – Resultados da área sob a curva para o município de Curitiba para o período de Calibração	170
Tabela 4.10 – Resultados da área sob a curva ROC para as bacias hidrográficas no período de Calibração referentes ao modelo SOM.....	171
Tabela 4.11 – Resultados da área sob a curva para o município de Curitiba para a Verificação, SOM.....	172
Tabela 4.12 – Valores de EMQ para a calibração e verificação.....	192
Tabela 4.13 – Valores de Skill Score (SS) obtidos para NEA X Climatologia, NEA x Previsão de zero e NEA x Persistência.....	192
Tabela 4.14 – Classes de alagamentos definidas em função da frequência que ocorrem	193
Tabela 4.15 – Número de vezes em que a classe do número observado (NOA) é igual a classe do NEA previsto	194
Tabela 4.16 – Probabilidade das classes de NEA previstas dada a classe observada de alagamentos	194

Tabela 4.17 – Estatísticas para a amostra original e as 10000 reamostras para as variáveis NOA, SS e área sob a curva ROC	196
Tabela 4.18 – Exemplo para 4 dias específicos do número de alagamentos observados versus NEA.....	201
Tabela 4.19 – NEA dividido pelo total histórico	201

RESUMO

REGRESSÃO LOGÍSTICA E REDES NEURAS APLICADAS À PREVISÃO PROBABILÍSTICA DE ALAGAMENTOS NO MUNICÍPIO DE CURITIBA, PR

A presente pesquisa se propõe a estudar por meio do uso de regressão logística e redes neurais as características relacionadas aos padrões de chuva em Curitiba, procurando estabelecer a relação entre chuva e alagamentos para o município, utilizando como base a integração de informações hidrometeorológicas. Para alcançar os objetivos propostos, foram construídos modelos baseados em regressão do tipo logística e redes de Kohonen (Self Organizing Map (SOM)) para previsão probabilística de alagamentos, sendo os dois métodos comparados e avaliados em relação ao seu desempenho por meio da Curva de Características Operacionais (ROC), bem como a partir dos diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento. Para a construção dos modelos foram utilizados os dados de precipitação estimada a partir da integração das informações provenientes de radar meteorológico, satélite e pluviômetros, utilizando o método de Análise Objetiva Estatística (ANOBES). Os dados dos registros pontuais de alagamentos fornecidos pela Defesa Civil Municipal foram compilados pelo IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba). A partir dos dados de estimativas de precipitação foi calculada a chuva média acumulada de 6 em 6 horas por bacia hidrográfica, utilizando-se do método de Thiessen e do Inverso da Distância ao Quadrado, sendo os dois métodos comparados para verificar qual possui o melhor resultado para a geração dos dados de entrada dos modelos. Em relação ao desempenho dos dois métodos utilizados na construção dos modelos, verificou-se no caso estudado que o SOM (Self Organizing Map) apresentou desempenho superior quando comparado com a regressão logística tanto no período de calibração quanto de verificação. A partir dos resultados gerados por meio da rede SOM, pode-se definir quais os principais padrões de chuva responsáveis por deflagrar os alagamentos em Curitiba e ainda estimar o número esperado de alagamentos (NEA) por bacia hidrográfica. Sob esta perspectiva, este trabalho possui como uma primeira inovação a utilização de ferramentas especializadas de inteligência artificial (IA) para o reconhecimento de padrões de chuva causadores de alagamento. Em relação ao número esperado de alagamentos, a inovação se refere a espacialização dos mesmos baseado no histórico de ocorrências. Como proposta, sugere-se que os resultados gerados neste trabalho integrem um Sistema de Alertas de Alagamentos em Curitiba, e que as informações e dados gerados possam ser utilizados pela Defesa Civil no sentido de aumentar a resiliência da população e mitigar possíveis impactos decorrentes dos alagamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Alagamentos; Rede Neural, Padrões de Chuva;

ABSTRACT

LOGISTIC REGRESSION AND NEURAL NETWORKS APPLIED FOR PROBABILISTIC FORECASTS OF FLOODING IN CURITIBA, PR

This research aims to study through the use of logistic regression and neural network, the characteristics related to rainfall patterns in Curitiba, in order to establish the relationship between rainfall and flooding, using the integration of hydrometeorological data. To achieve the proposed aims, two models were built based on logistic regression and Kohonen neural network type (Self Organizing Map (SOM)), to predict the probability of flooding. The two methods were compared and evaluated their performance through the ROC (Receiver Operating Characteristic) curve as well as from diagrams of reliability, discrimination and refinement. For the construction of the models were used rainfall data estimated from the integration of meteorological radar, satellite and rain gauges data, using the analysis for statistical purposes (ANOBES) method. In addition, data records of flooding were used as a reference. These data were supplied by the Municipal Civil Defense and compiled by IPPUC (Institute for Urban Research and Planning of Curitiba). Rainfall estimates were used to calculate cumulative average rain of 6 hours in a basis of 4 days, using the method of Thiessen and Squared Inverse Distance. These the two methods were compared to see which has better results for data generation to be used as models' data input. Regarding the performance of the two methods used to construct the models, it was found that the SOM (Self Organizing Map) has superior performance when compared with the logistic regression, either for calibration and verification. Results generated by the SOM, indicated that it is possible to define the main rainfall patterns responsible for triggering flooding in Curitiba and also estimate the expected number of floods (NEA), for each watershed. From this perspective, this work has as a first innovation the use of artificial intelligence (AI) tools designed for the recognition of rainfall patterns that can cause flooding. Regarding the expected number of floods, the innovation refers to the spatial distribution of floods based on historical occurrences. As a proposal, it is suggested that the results generated in this work should be used in a flooding alert system for Curitiba, and that the information and data generated can be used by Civil Defense to increase the resilience of the population and mitigate potential impacts of flooding.

Key Words: Flooding, Neural Networks, Rain Patterns

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

As inundações são fenômenos de ocorrência antiga na história da Terra e remontam a própria existência do Homem, que sempre procurou se localizar próximo dos rios para usá-lo como transporte, obter água para consumo e até mesmo dispor seus dejetos. Por possuírem características físicas apropriadas para o assentamento humano, as planícies de inundação foram sendo ocupadas gradualmente ao longo da história.

Assim, grande parte das cidades se desenvolveram às margens dos rios ou no litoral. De acordo com Tucci & Bertoni (2003), a urbanização representa uma das manifestações mais significativas da atividade humana sendo que ao longo da história do processo de urbanização reconhece-se três grandes etapas: (i) pré-industrial, (ii) industrial e (iii) atualmente o das comunicações (também denominada por alguns autores como de “terceirização das decisões”).

A “explosiva” urbanização do mundo e os problemas que esta nova situação traz para os grandes conglomerados urbanos constituem uma das temáticas mais importantes do tempo atual. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), os desastres provocados por inundações vêm aumento em consequência, principalmente, do incremento da expansão urbana em planícies aluviais. A ocupação humana destas áreas tem-se refletido no agravamento dos danos provocados por inundações e alagamentos, que mesmo em bacias regularizadas, continuam a ocorrer e a provocar extensas inundações, com perdas humanas e prejuízos de grande ordem.

As estatísticas sobre a incidência de desastres induzidos por fenômenos naturais extremos no mundo contemporâneo revelam a tendência para a preponderância de fenômenos de origem hidroclimática, como sejam inundações e tempestades (MUNICH-RE, 2005). Levando em consideração tal afirmação e pensando o modelo de urbanização adotado em grandes cidades mundiais nota-se que em muitos casos é permitido a ocupação das planícies de inundação dos cursos d’água urbanos o que expõe a população ao risco de impactos de inundações e alagamentos, agravados pelos episódios anômalos de precipitação. Em regiões tropicais e subtropicais, por exemplo, em que as precipitações são mais freqüentes, as inundações e alagamentos decorrentes de chuvas intensas são

fenômenos comuns e também conhecidos como eventos extremos. Tais eventos fazem parte da dinâmica climática de um local, e podem tornar-se desastres quando “superam a capacidade material de uma determinada organização social para absorver, amortizar ou evitar seus efeitos negativos” (GONÇALVES, 2003).

No caso brasileiro, as características sociais e ambientais de diversas cidades, tais como os processos de impermeabilização do solo e parcela considerável da população ocupando fundos de vale e planícies de inundação, acarretaram problemas crônicos de inundações nos últimos anos, causando grandes impactos em áreas urbanas, prejudicando as condições de vida da população e provocando prejuízos econômicos.

Assim, uma das maiores dificuldades quanto à prevenção dos impactos pluviais reside no fato de que toda a estrutura urbana, quando “planejada”, utiliza como parâmetro apenas os dados médios referentes aos fenômenos meteorológicos, desconsiderando as anomalias que fazem parte do clima local, e que esporadicamente ocorrem.

Portanto, a chuva é o principal elemento deflagrador dos desastres relacionados a inundações e alagamentos, mas a ocupação inadequada de áreas sujeitas a alagamentos é o principal componente da vulnerabilidade da população frente a esses eventos, e decorrem de processos políticos, econômicos e culturais.

Nos últimos anos, tem-se observado o crescimento no número de pessoas afetadas por inundações e alagamentos, mesmo durante eventos pluviais não tão extremos, devido ao aumento da vulnerabilidade da população.

De forma geral, o gerenciamento de riscos associados a estes fenômenos é feito priorizando a realização de medidas estruturais, tais como retificação e canalização dos cursos d’água. Apesar dos altos custos financeiros e tempo envolvidos com estas ações, via de regra, elas se mostram insuficientes e defasadas para solucionar os problemas.

Por isso a importância em adotar medidas não-estruturais em consonância com as estruturais, como procedimento complementar no gerenciamento de riscos associados a inundações e alagamentos. A adoção destas medidas pode significar alterações importantes no sistema de gestão de políticas públicas, concatenando diferentes setores da sociedade por meio de parcerias que integrem população, poder público, iniciativa privada e institutos de pesquisa, objetivando encontrar soluções mais eficazes.

Como medida não-estrutural, pode-se destacar um sistema de monitoramento e alerta a inundações e alagamentos, o qual permitiria avaliar em tempo real a probabilidade de sua ocorrência, em determinada área. Este sistema pode ainda auxiliar os órgãos

competentes (Governo Estadual, Municipal e Defesa Civil) a elaborarem seus planos de ações para minimizar os riscos e prejuízos associados a inundações e alagamentos, evitando assim grande parte dos perigos de vida e transtornos que acometem freqüentemente a população atingida. Além disso, as medidas não estruturais objetivam a melhor convivência da população com estes fenômenos e consistem em regulamentos que disciplinam os usos do solo, tipos de construção viáveis, seguros e sistemas de alerta.

No entanto, a falta de dados (cartográficos, meteorológicos, hidrológicos) em escalas adequadas para estudos locais tem sido um dos entraves a realização de pesquisas relacionadas a desvendar a dinâmica de eventos extremos no Brasil. Nas pesquisas de cunho ambiental, a situação é ainda mais complicada, pois a avaliação de fenômenos não contínuos, como chuva, ventos, tempestades severas e suas derivações não possuem registros de dados satisfatoriamente detalhados quando os trabalhos utilizam como áreas de estudo bacias hidrográficas urbanas.

Dessa maneira, a necessidade de previsão de eventos extremos de caráter dinâmico e complexo (como as inundações e alagamentos) esbarra na baixa resolução das malhas de registro dos sistemas de coleta de dados e na conseqüente escassez de metodologias aptas a este tipo de previsão. No espaço de poucos quilômetros a grande variação do fenômeno pode comprometer sua compreensão, como no caso das chuvas, onde pode-se encontrar variações de até 20 mm em 1 hora por exemplo, em diferentes pontos de uma mesma bacia. A alta densidade populacional, própria de meios urbanos, também remete à necessidade de precisão cartográfica onde, na exiguidade espacial de habitações de pequeno porte, reside um grande número de pessoas (PEREZ FILHO et al, 2006).

No Brasil, ainda se encontram em desenvolvimento sistemas preventivos para as inundações e alagamentos em áreas urbanas. Como conseqüência à falta de um processo eficiente de prevenção, tais fenômenos continuam sendo motivo de preocupação para a sociedade brasileira. Desde a década de 1950, o Brasil vem passando por um processo de urbanização e metropolização bastante intenso. Nesse período, residiam nas cidades somente 36% da população brasileira, contudo, em 2000 este percentual alcançou um total de 80% (BRANDÃO, 2001). O mais alarmante é que somente nos 12 aglomerados metropolitanos nacionais – São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, Recife, Belo Horizonte, Fortaleza, Curitiba, Porto Alegre, Belém, Brasília, Campinas e Goiânia – residem aproximadamente 33% da população brasileira (BRITO, 2006).

O relatório do governo federal Enchentes 2004 (BRASIL, 2004a), elaborado pelo Ministério da Integração Nacional, demonstra que as chuvas convectivas ocasionaram estados de calamidade pública em mais de 120 municípios, em diversas regiões do país, atingindo cerca de 1200 municípios e cerca de 380.000 pessoas, deixando um saldo de 211 mortes. Os danos materiais contabilizados remetem a mais de 110.000 habitações e aproximadamente 1050 pontes danificadas e/ou destruídas. Sabe-se que os gastos com ações corretivas – dentre auxílios à população e aos municípios – foram extremamente elevados, entretanto, de difícil contabilização.

As experiências discutidas e difundidas mundialmente apontam que as políticas de planejamento e gerenciamento dos riscos de inundações e alagamentos são as melhores práticas para a redução significativa dos riscos inerentes a estes eventos (PLATE, 2002; ZHANG et al., 2002; TODINI, 1999). Neste sentido, algumas iniciativas de programas internacionais e nacionais foram discutidas para a redução de riscos e de desastres. A “Carta Humanitária e as Normas Mínimas de Resposta Humanitária em Situações de Desastre” foi uma dessas iniciativas. Além dessa, o “Marco de Ação de Hyogo” que tem como objetivo a redução das perdas ocasionadas por desastres incluindo perdas humanas, bens sociais, econômicos e ambientais, bem como a “Estratégia Internacional para a Redução de Desastres (EIRD)”, com a missão de habilitar sociedades para resistirem aos perigos naturais e aos desastres tecnológicos e ambientais no sentido de reduzir perdas humanas, econômicas e sociais, foram outros recentes programas.

No Brasil, diversos setores do governo federal acreditam na potencialidade de ações preventivas direcionadas ao planejamento e gerenciamento para a mitigação de problemas relacionados às inundações e alagamentos urbanos, sendo os difusores dessas premissas os Ministérios da Integração Nacional, das Cidades e do Meio Ambiente (MMA, 2000, 2006).

Nesse sentido, são inúmeros os desafios pela busca de soluções integradas e economicamente sustentáveis que possam reduzir esse problema. O planejamento da ocupação da bacia hidrográfica é visto como prioridade, contudo, o fim às ocupações desordenadas, que avançam sobre as áreas de inundação e intensificam os danos ambientais ainda é uma grande preocupação para o país (CORDEIRO NETO, HESPANHOL e TUCCI, 2001). Contudo, Tucci (2003, p.63) alerta que “é ingenuidade do homem imaginar que poderá controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas conseqüências”. Desta forma, são de elevada importância estudos que

priorizem ações de planejamento e gestão urbana como mecanismos de mitigação dos impactos econômicos e sociais resultantes da ocorrência das inundações nas cidades.

Especificamente para bacias integradas em áreas urbanas, necessita-se cada vez mais, criar condições para o monitoramento dos eventos extremos principalmente, em alta resolução, gerando um ambiente refinado de avaliação, permitindo ser utilizado como base em diversas áreas do conhecimento. Assim, gera-se dados base para estudos, aprimora-se modelos que podem vir a nortear políticas públicas de médio e longo prazos de maneira mais eficaz e precisa.

De acordo com Perez Filho et al (2006), a iniciativa de implantação de bacias urbanas monitoradas e voltadas para o estudo de eventos extremos num contexto pluvio-fluvial, assim como suas aplicações na gestão e planejamento urbano são de extrema importância no Brasil, o que a coloca como fundamental para o balizamento de demais estudos que possam se adequar à realidade físico-natural (geomorfológica, climática, pedológica) e social (o padrão de ocupações das cidades brasileiras).

Levando em consideração tal problemática, constata-se que os problemas relacionados aos eventos extremos de caráter dinâmico e complexo também afetam a Região Metropolitana de Curitiba, onde está inserido o município de Curitiba, verificados principalmente em função dos efeitos do impulso do crescimento urbano desenfreado ao longo das últimas décadas.

Até os anos 60, Curitiba se encontrava em uma situação sem destaque entre as maiores cidades do Brasil, sendo a capital de um estado fortemente agrícola. No entanto, o estado do Paraná passou por grandes modificações durante os últimos 30 anos. Estas mudanças têm explicações externas (determinações federais, política agrícola) e locais (o próprio desenvolvimento urbano), que contribuiu para o rápido crescimento de Curitiba.

O primeiro fator surge da modernização e mecanização da agricultura, que causou alterações no campo rural levando a migrações para os centros urbanos do estado, principalmente para Curitiba. Com a evasão dos cafezais por causas climáticas (o Paraná que era o maior produtor de café do mundo) em conjunto com a mudança para outras culturas agrícolas (trigo, soja e milho), muitos trabalhadores rurais se viram desempregados e recorreram às cidades em busca de empregos.

Além do forte impulso migratório que ocorria nas áreas rurais, o crescimento intenso se explica também através da crescente industrialização que ocorria na cidade. Com a criação da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no início da década de 70,

Curitiba recebeu diversos auxílios do Governo Federal e melhoramentos em sua infraestrutura. Um elevado número de indústrias nacionais e internacionais se instalou na cidade e posteriormente na RMC. A criação do parque industrial “Cidade Industrial de Curitiba” (CIC) foi a contribuição mais forte para a mudança do perfil econômico de uma região agrícola para uma região cada vez mais industrializada.

O desenvolvimento demográfico na cidade de Curitiba, na Região Metropolitana de Curitiba (RMC) e no estado do Paraná entre 1970 e 1996 mostra que principalmente Curitiba como núcleo de região metropolitana passou por um crescimento rápido e intenso nas décadas de 1970 e 1980, o mais alto de todas as capitais estaduais do Brasil (IPPUC, 2008)

Essa expansão, verificada, sobretudo nas áreas periféricas, não ocorreu em concordância com ações de planejamento gerando diversos problemas socioeconômicos e ambientais, entre eles os alagamentos.

Assim, a motivação deste estudo surge de três aspectos os quais são: i) interesse em entender quais os padrões de chuva e/ou se existem padrões de chuva para que ocorram os alagamentos em Curitiba e qual a sua dinâmica; ii) se os padrões poderiam ser utilizados na estruturação de um sistema de alerta; iii) se é possível utilizar inteligência artificial (IA) para configurar o sistema como método preditivo de alagamentos;

A partir de tais motivações, as principais contribuições deste trabalho residem no fato de que o reconhecimento de padrões de chuva é de fundamental importância, principalmente no que tange aos aspectos ligados ao próprio crescimento, ordenação e planejamento da cidade.

Reconhece-se que tal conhecimento deve possibilitar o aprimoramento das ações de proteção por parte da Defesa Civil no sentido de retirar pessoas de áreas de risco, subsidiar medidas em tempo real para ordenação do trânsito, proteção de bens materiais e até mesmo para evitar a perda de vidas. Ainda, vem diretamente ao encontro das diretrizes gerais propostas nos planos diretores, no sentido da prevenção contra alagamentos e inundações no Município.

Vislumbra-se também como contribuição a utilização do conhecimento gerado para construção de um sistema de alerta a alagamentos em Curitiba baseado em estratégia probabilística para emissão de alertas, favorecendo o desenvolvimento das ações não só na eminência e no momento da ocorrência do alagamento, mas no pós-ocorrência e no

planejamento futuro de médio e longo prazo. Nesse sentido, contribui também como medida não estrutural de controle dos alagamentos.

Especificamente com relação aos alagamentos em Curitiba, sabe-se que não há trabalhos publicados que fazem análises utilizando os dados pontuais de alagamentos coletados pela Defesa Civil do Município e compilados pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC). Neste sentido, este trabalho torna-se pioneiro por trabalhar com tais dados, fazendo uso de métodos estatísticos para previsão da probabilidade de alagamentos em Curitiba e do número esperado de alagamentos.

Além disso, os dados de precipitação utilizados a serem utilizados, foram de estimativas de precipitação por pluviômetros, radar meteorológico e satélite e a integração das informações utilizando um método de análise objetiva estatística. Tais dados, já utilizados e testados em outros trabalhos científicos (Calvetti et al 2006, Calvetti et al 2009, Beneti et al 2002) e empregados de forma operacional pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR para a estimativa de precipitação no estado do Paraná tornam-se diferencial nesta pesquisa. Sendo assim, a colaboração deste trabalho vem no sentido de investigar a existência de ganho na qualidade e rapidez da informação referente a precipitação, utilizando como base a integração de três diferentes fontes de dados.

A partir da identificação da problemática apresentada e em consonância com as motivações e contribuições do trabalho, a hipótese desta tese pode ser traduzida por um pergunta: é possível desenvolver modelos de natureza estocástica e empírica que permitam estabelecer a relação entre padrões de chuva e alagamentos bem como prever o número esperado de alagamentos para Curitiba? Com tal pergunta, a seguir são apresentados os objetivos desta pesquisa

1.1 Objetivos do Trabalho

Pretende-se neste trabalho, estudar por meio do uso de regressão logística e redes neurais as características relacionadas aos padrões de chuva em Curitiba, procurando estabelecer a relação entre chuva e alagamentos para o Município, utilizando como base a integração de informações hidrometeorológicas.

Os objetivos específicos do trabalho consistem em:

- ✓ Mapear os dados pontuais de alagamentos de 2005 a 2010 do ponto de vista de distribuição e frequência, utilizando como base a unidade espacial

município e para as bacias hidrográficas que integram o Município de Curitiba;

- ✓ Estruturar os dados de precipitação integrada por bacia hidrográfica e para Curitiba;
- ✓ Realizar estudos estatísticos para determinação do período de consideração da chuva significativa para a ocorrência de alagamentos;
- ✓ Construir um modelo regressivo do tipo logístico para previsão da probabilidade de ocorrência de alagamento por bacia hidrográfica;
- ✓ Construir um modelo baseado em rede neural para previsão da probabilidade de ocorrência de alagamentos e do número esperado de ocorrências por bacia hidrográfica;
- ✓ Comparar o desempenho dos modelos de previsão construídos e verificar a capacidade de uso operacional para um sistema de alerta a alagamentos;
- ✓ Determinar os padrões críticos de chuva responsáveis pela ocorrência dos alagamentos e derivar, em termos de frequência, intensidade e duração, as chuvas consideradas críticas por bacia hidrográfica;

1.2 Área de Estudo – Breve Descrição

Para a presente pesquisa, selecionou-se como área de estudo o município de Curitiba, município pólo da Região Metropolitana de Curitiba, PR. A escolha desta área justifica-se na medida em que grandes transformações socioeconômicas e ambientais foram observadas ao longo das últimas décadas deflagrando fortes pressões e modificações sobre o ambiente, muitas das quais se traduziram em perdas irreparáveis para esta área.

Curitiba é a capital do Estado do Paraná e localiza-se na Região Sul do Brasil. Fundada em 1693, ocupa uma área de 432,17 km². É também a cidade pólo da Região Metropolitana (Figura 1.1) composta por 26 municípios que, juntos, ocupam uma área de 15.622,33 km².

Localiza-se no Primeiro Planalto Paranaense, o qual foi descrito por Reinhard Maack (1981) como “uma zona de eversão entre a Serra do Mar e a Escarpa Devoniana”, mostrando um plano de erosão recente sobre um antigo tronco de dobras.

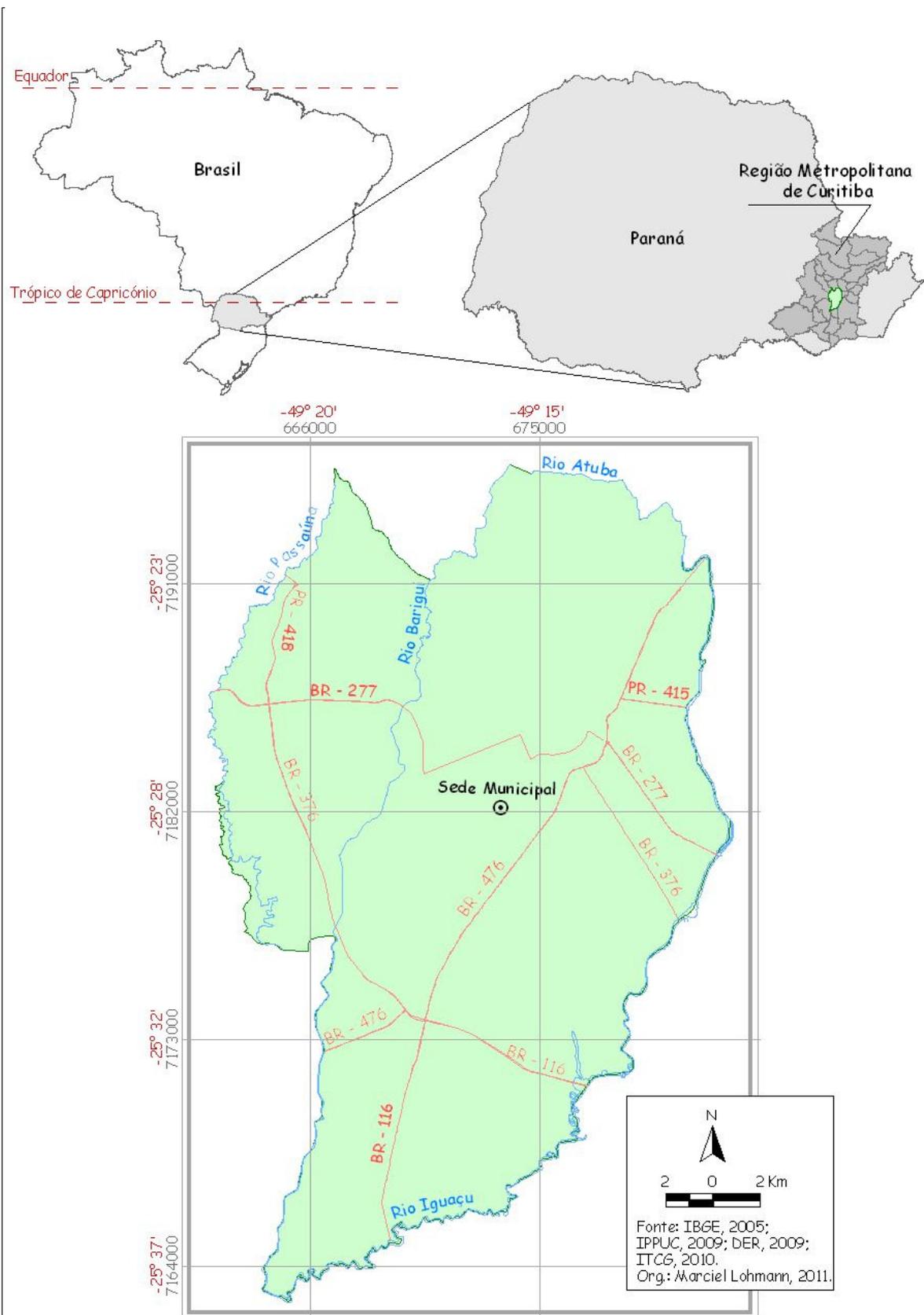


Figura 1.1 Mapa de localização do município de Curitiba

Possui altitude média de 934,6 m acima do nível do mar e caracteriza-se geomorfologicamente de acordo com Canali e Muratori (1981) como uma bacia de sedimentação, encravada em compartimento intermontano, tendo sua gênese relacionada às superfícies de pediplanação.

Grande parte do município apresenta relevo em colinas alongadas, de baixa altura, em cotas altimétricas que variam entre 900 e 950 m acima do nível do mar. Os interflúvios apresentam-se amplos e os vales mostram-se abertos e com fundo chato, constituídos por terraços fluviais que foram “sucessivamente ocupados a partir da parte central do terraço fluvial do rio Belém” (IPPUC, 1985, p.87). As declividades variam de 0 a 12%, fato que facilitou a expansão urbana da cidade de Curitiba (IPPUC, op cit).

Guardando intrínseca relação com a geologia e a geomorfologia, os solos inteferem diretamente nos processos relacionados ao escoamento e à infiltração das águas das chuvas. De acordo com EMBRAPA (1999) e MINEROPAR (2000), o município de Curitiba, apresenta predominância de solos do tipo Cambissolos, Argissolos, Latossolos e Gleissolos, estes últimos sendo identificados ao longo das várzeas dos rios e por isso mesmo em locais passíveis de inundações e alagamentos.

Em relação a hidrografia, o município de Curitiba está localizado à margem direita e a Leste da maior sub-bacia do Rio Paraná, a bacia hidrográfica do rio Iguaçu. Os principais rios de Curitiba que constituem as seis bacias hidrográficas do município são: rio Atuba, rio Belém, rio Barigüi, rio Passaúna, Ribeirão dos Padilhas e rio Iguaçu (Figura 1.2). A maior bacia hidrográfica de Curitiba é a do Rio Barigüi, que atravessa o município de Norte a Sul e perfaz um total de 139,9 Km². Ao sul do município tem-se a menor bacia hidrográfica de Curitiba, a do Ribeirão dos Padilhas, com 33,6 km² de área.

As características climáticas de Curitiba, como todos os lugares da superfície da terra, são condicionadas por fatores estáticos (latitude, altitude, distância do mar) que são responsáveis pela quantidade de energia solar que chega à cidade, e por fatores dinâmicos (massas de ar e frentes), responsáveis pelo ritmo da sucessão habitual dos estados atmosféricos (DANNI-OLIVEIRA, 1999). A interação deste dois fatores influencia diretamente na determinação de seu tipo climático.

Dada a posição geográfica ao Sul do Trópico de Capricórnio, onde os sistemas atmosféricos intertropicais e polares travam confrontos, além de sua localização na borda oriental do Primeiro Planalto Paranaense, Curitiba caracteriza-se por apresentar temperaturas mais elevadas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, quando a

quantidade de energia solar disponível é maior e predomina a atuação de sistemas atmosféricos intertropicais; e temperaturas mais baixas nos meses de junho, julho e agosto, quando a energia solar disponível é reduzida e predomina a atuação dos sistemas atmosféricos polares. Associado a isso, a sua situação topográfica assegura à cidade um caráter de clima mesotérmico úmido com verão quente (DANNI-OLIVEIRA, 1999; MENDONÇA, 2001).

De acordo com os mesmos autores, com relação à precipitação Curitiba caracteriza-se por apresentar chuvas bem distribuídas durante todos os meses do ano, embora o verão apresente maior concentração, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro. A instabilidade adquirida na massa de ar TA (Tropical Atlântica) e seus confrontos com a PA (Polar Atlântica), bem como a atuação da Ec (Equatorial Continental), respondem pelos valores mais elevados de precipitação durante esse período do ano. Já o inverno, um pouco menos chuvoso, apresenta maior estabilidade do ar, dada principalmente pela participação da Massa Polar Atlântica, tendo-se o mês de agosto como o mais seco.

De acordo com Danni-Oliveira (1999, p.144), a análise das chuvas em Curitiba durante 45 anos (1951-1995) sugere a existência nítida de três padrões comportamentais da pluviosidade ao longo do ano: um mais seco e longo com chuvas de 70 à 100 mm abrangendo os meses de abril a agosto; um intermediário e breve com chuvas de 100 à 120 mm correspondente aos meses de setembro a novembro; e finalmente um último mais chuvoso e de duração intermediária com totais de 130 a 180 mm que se estende de dezembro a março.

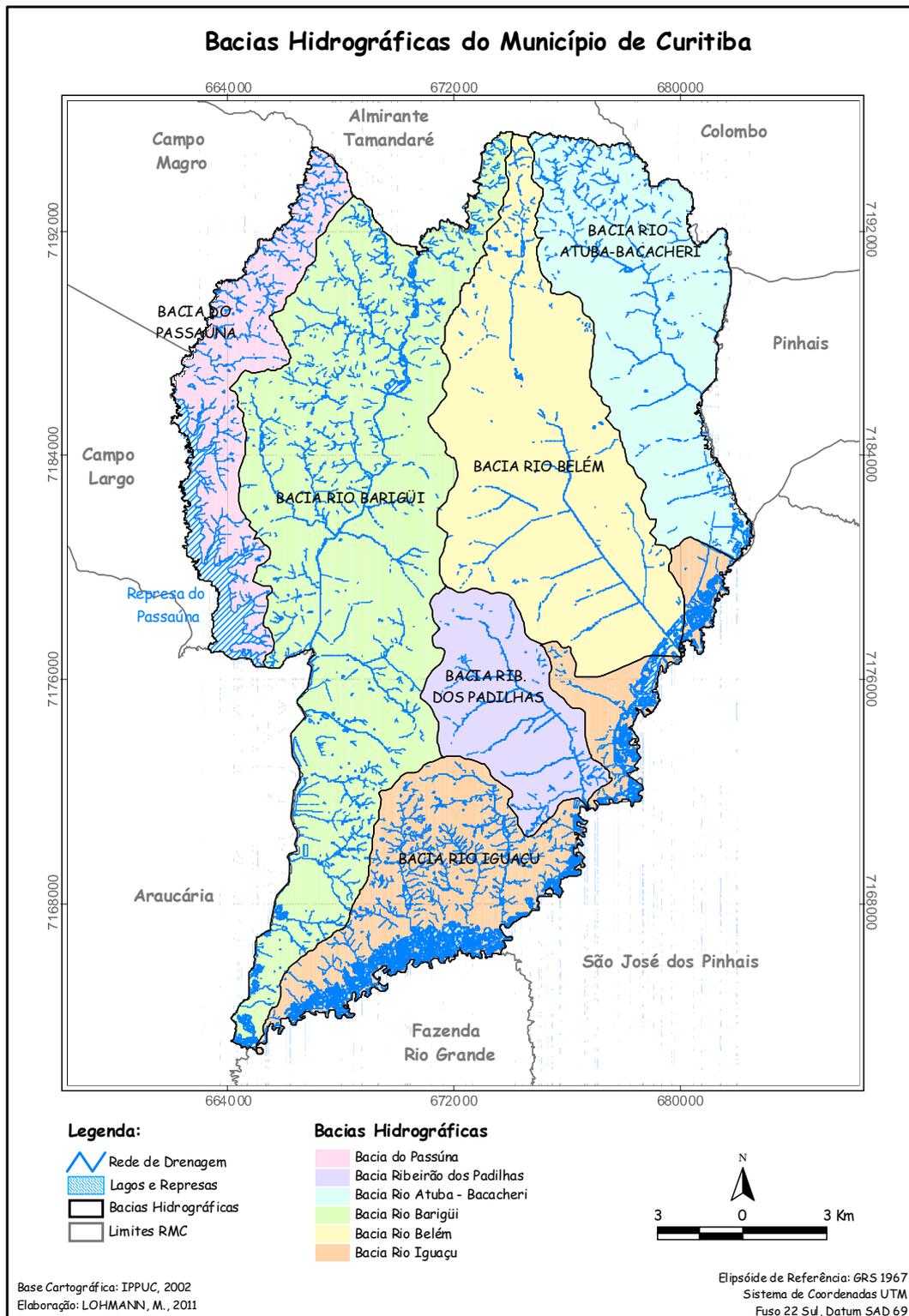


Figura 1.2 Bacias Hidrográficas de Curitiba

1.3 Estrutura da Tese

O trabalho de tese está dividido em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução ao tema em estudo, procurando trazer uma breve discussão sobre a problemática relacionada aos alagamentos, sua relação com o processo de urbanização decorrido ao longo da história e suas conseqüências. Traz ainda os aspectos ligados a motivação para elaboração do trabalho e possíveis diferenciais do mesmo. São apresentados ainda os objetivos da tese bem como uma breve caracterização da área.

No capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, com a caracterização dos principais temas abordados no trabalho. Entre os itens consta a discussão sobre eventos extremos e desastres, definições e diferenciais para os conceitos de enchente, inundação e alagamento, bem como são mostrados alguns trabalhos já produzidos nesta mesma linha no item chamado “Alagamentos e inundações na RMC”. Em função da utilização de dados provenientes da integração de diferentes fontes (radar, satélite e pluviômetros) são discutidos aspectos referentes a estas fontes. Neste capítulo ainda são apresentados os aspectos ligados à regressão logística e a redes neurais artificiais e mais especificamente a rede neural SOM (Self Organizing Map) que foi utilizada como base para geração das previsões probabilísticas para ocorrência de alagamentos em Curitiba. E por fim, são caracterizados os métodos para avaliação de modelos probabilísticos.

O capítulo 3 focaliza a discussão nos procedimentos técnicos-operacionais e metodológicos, em que são apresentados os dados cartográficos, de registros de alagamentos, de chuva e de que forma foram compilados e produzidos tais dados. Ainda são apresentados e descritos de forma detalhada todos os procedimentos e etapas seguidas para geração das previsões probabilísticas por meio do uso de regressão logística e de redes neurais.

Os resultados e uma discussão dos mesmos são apresentados no capítulo 4. Inicialmente são explorados e discutidos os dados sobre os alagamentos ocorridos em Curitiba de 2005 a 2010, apresentando mapas com a localização dos alagamentos por bacia hidrográfica, tabelas com a mensuração dos dados por bacia hidrográfica e ainda gráficos levando em consideração a frequência para a melhor interpretação e entendimentos dos dados. Este capítulo traz ainda os resultados do teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov (KS) para identificar quantos dias anteriores ao dia do evento deveriam ser considerados para construção dos modelos baseados em regressão logística e redes neurais.

Posteriormente são apresentados os resultados dos modelos construídos com o uso de regressão logística e baseados em rede neural. Este item tem como foco mostrar os resultados gerados com os dois métodos e uma comparação de qual obteve melhor desempenho na previsão de probabilidades para a ocorrência de alagamentos. São apresentadas as avaliações elaboradas utilizando a curva ROC, área sob a curva e os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento. Por fim, são apresentados os resultados do método que agrega a previsão do número esperado de alagamentos para Curitiba, bem como uma proposta de espacialização destes resultados.

O capítulo 5 e último, as principais conclusões, recomendações e considerações finais são apresentadas.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a discussão teórica a cerca dos principais temas abordados no trabalho e que serviram de base para a melhor compreensão de determinados conceitos, bem como para o entendimento detalhado de temas específicos que constam no trabalho.

2.1 Eventos Extremos e Desastres

Os fenômenos atmosféricos despertaram o interesse e a curiosidade do homem desde as civilizações antigas, que consideravam estes fenômenos obra da força divina. A história do ajustamento do homem às condições do meio e da transformação destes por suas atividades tem sido uma relação de conflito e harmonia, mas durante muitos séculos tais condições se mantiveram dentro dos limites sem causar danos significativos, pelo menos até o início do período da Revolução industrial (BRANDÃO, 2004).

De acordo com o mesmo autor, embora pesem, favoravelmente, o grande avanço tecnológico atual e os esforços para o conhecimento das forças da natureza, a sociedade moderna permanece ainda bastante vulnerável diante dos eventos naturais extremos, particularmente os de natureza meteorológica.

Sob o rótulo genérico de eventos naturais extremos encontra-se uma gama de fenômenos, variada em quantidade e complexa em intensidade. A grande maioria dos mais freqüentes e intensos desses eventos está ligada, direta ou indiretamente, à atmosfera: enchentes, secas, nevoeiros, geadas, granizos, descargas elétricas, nevascas, tornados, ondas de calor, ciclones tropicais e vendavais, complementados por desmoronamentos de vertentes e ressacas, acrescidos por impactos pluviiais concentrados (WHITE, 1974 apud MONTEIRO, 1991).

No Brasil, os eventos naturais extremos de maior repercussão nas atividades humanas são de natureza climática. Embora sejam fenômenos de ordem natural ocasionados pelas disritmias dos sistemas meteorológicos, a ação humana interferindo ao longo do tempo, seja nas áreas urbanas, seja nas rurais, tem contribuído consideravelmente para sua maior freqüência, agressividade e expansão areolar.

Os desastres naturais estão diretamente vinculados à história do homem e ao seu modo de apropriação e uso dos recursos naturais. Desde a formação dos primeiros agrupamentos humanos até a concepção das cidades modernas, os desastres têm gerado fortes impactos na sociedade (MONTEIRO, 1991).

Entretanto, nas últimas décadas, as pesquisas têm demonstrado que houve um aumento considerável não só na frequência dos desastres naturais, mas também na intensidade, o que resultou em sérios danos e prejuízos sócio-econômicos. De acordo com alguns cientistas, este cenário pode estar vinculado ao aquecimento global, como uma das consequências diretas das mudanças climáticas (MARCELINO et al., 2006; IPCC, 2007).

Especificamente no caso do Brasil, Marcelino (2008) utilizando um sumário com dados do Banco Internacional de Desastres OFDA/CRED mantido pela Universidade Católica de Louvain, Bélgica (EM-DAT, 2007), calculados com dados de 1900 a 2007, verifica que os tipos de desastres mais frequentes foram as inundações (Figura 2.1), representadas pelas graduais e bruscas, com 59% dos registros, seguidas pelos escorregamentos (14%). *A maioria dos desastres no Brasil (mais de 80%) está associada às instabilidades atmosféricas severas, que são responsáveis pelo desencadeamento de inundações, vendavais, tornados, granizos e escorregamentos.* Com exceção das inundações graduais, esses fenômenos são súbitos e violentos, responsáveis por grande mortandade e destruição. Em virtude da velocidade, não há tempo para as pessoas procurarem abrigos ou salvarem parte dos bens existentes em suas casas.

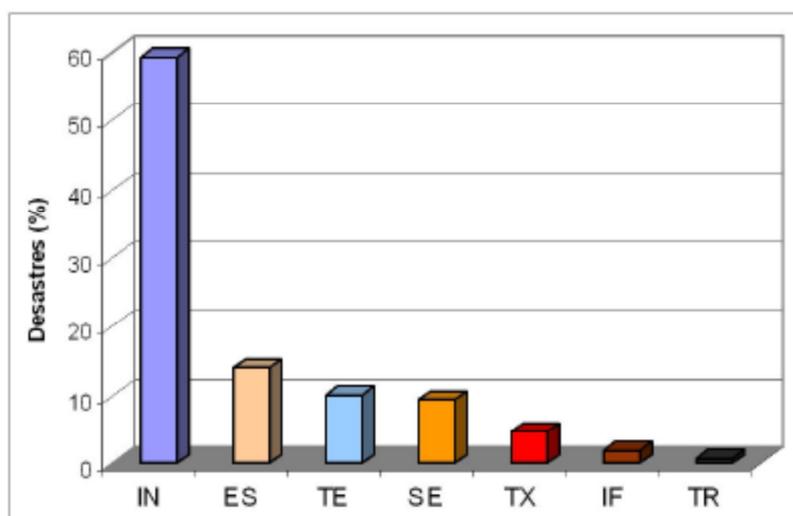


Figura 2.1 Panorama dos tipos de desastres naturais ocorridos no Brasil (1900-2006).
Legenda: IN – Inundação, ES – Escorregamento, TE – Tempestades, SE – Seca, TX – Temperatura Extrema, IF – Incêndio Florestal e TR – Terremoto.
Fonte: Marcelino (2008).

Marcelino (2008) ressalta que são computados no banco EM-DAT, somente os desastres considerados de grande severidade, ou seja, que se enquadram no padrão que satisfaça pelo menos a um dos seguintes critérios: 10 ou mais mortos; 100 ou mais afetados; se foi solicitada ajuda internacional; ou, se foi declarado estado de emergência. Assim, o número de desastres ocorridos no Brasil é bem mais elevado do que os contabilizados no banco EM-DAT.

O mesmo autor, analisando a distribuição espacial dos desastres, mostra que mais de 60% dos casos ocorreram nas regiões Sudeste e Sul (Figura 2.2). No Brasil, essa distribuição está mais associada às características geoambientais do que as sócio-econômicas. Uma vez que, as áreas de favela, os bolsões de pobreza e a falta de planejamento urbano estão presentes na maioria das cidades brasileiras. Nessas regiões, as instabilidades atmosféricas são freqüentes devido à passagem de frentes frias no inverno, da ocorrência de complexos convectivos de mesoescala na primavera e da formação dos sistemas convectivos no verão, que desencadeiam as chuvas intensas e concentradas para essa estação (SANT'ANNA NETO, 1995; NASCIMENTO, 2005).

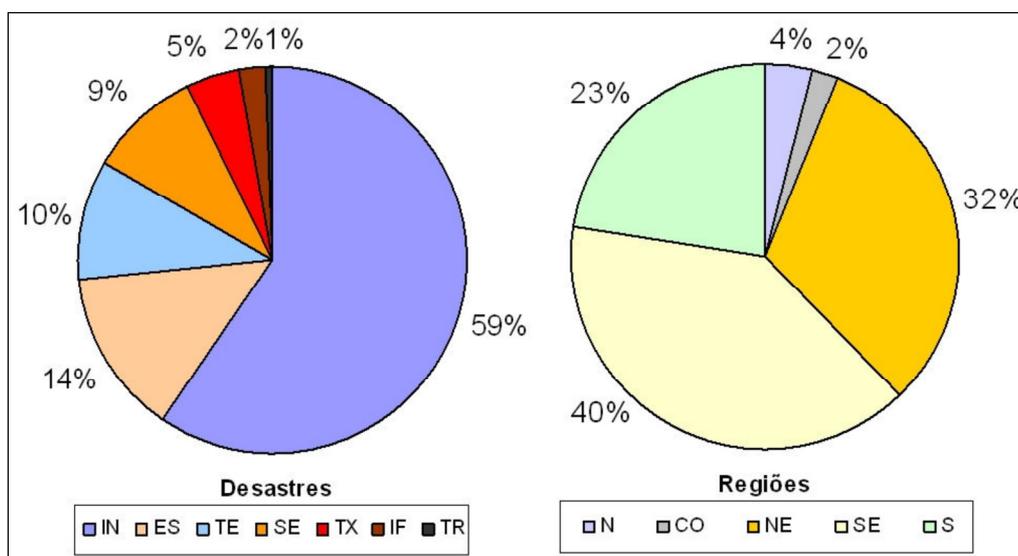


Figura 2.2 Distribuição dos desastres naturais no Brasil (1900-2006). Legenda: N – Norte, CO – Centro Oeste, NE – Nordeste, SE – Sudeste, S – Sul.
Fonte: Marcelino (2008)

Ainda com relação aos dados do EM-DAT no mesmo período, a média de mortes anuais devido a inundações no mundo é de 64.120 pessoas e perdas de US\$ 3,5 bilhões anuais (US\$ 119 milhões por evento). Para o Brasil, esse banco de dados registra no período de 1948 a 2007, uma média de mortes anuais devido a inundações de 99 pessoas e perdas de US\$ 78 milhões anuais (US\$ 52 milhões por evento). Esses dados categorizam

as inundações como o principal desastre natural do país, tanto no total de pessoas mortas ou afetadas, quanto em perdas econômicas, mostrando que o problema das inundações torna-se significativo e merecedor de crescente preocupação na sociedade brasileira.

De forma geral, os eventos naturais extremos são previstos com razoável precisão, registrados e acompanhados pela sofisticada tecnologia de radares e satélites, divulgados em tempo real para todo o mundo. No entanto toda esta tecnologia não é capaz de poupar os milhares de vidas e os danos materiais que causam com frequência e intensidade a cada ano. Pesquisadores de todo o mundo, neste início de milênio tentam compreender as causas, avaliar as repercussões e encontrar formas de prevenção no sentido de diminuir os prejuízos, nas atividades econômicas, sócio-culturais e ambientais (BRANDÃO, 2004).

Os desastres, especificamente os naturais, podem ser conceituados, de forma simplificada, como o resultado do impacto de um fenômeno natural extremo ou intenso sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excedem a capacidade dos afetados em conviver com o impacto (TOBIN e MONTZ, 1997; UNDP, 2004).

De acordo com a Política Nacional de Defesa Civil (PNDC), “desastre” é tido como o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e conseqüentes prejuízos econômicos e sociais.

Os desastres classificam-se quanto à intensidade, à evolução e à origem dos eventos adversos. Os desastres, quanto a sua intensidade, possuem quatro níveis: pequeno porte ou acidentes; médio porte; grande porte, e muito grande porte. Quanto à evolução, classificam-se em evolução crônica ou gradual; evolução aguda ou súbita; e somação de efeitos parciais. Quanto à origem, são naturais, antropogênicos e mistos. Os quadros 2.1, 2.2 e 2.3 apresentam tal classificação, destacando a importância e as considerações de cada uma dessas classificações.

Tabela 2.1 – Classificação dos desastres quanto à evolução

Tipos de Desastre, segundo a evolução			Importância e considerações
Evolução Súbita ou Agudos	Evolução Crônica ou graduais	Somação de Efeitos parciais (*)	Permite enfatizar os principais desastres brasileiros e amplia o campo da atuação preventiva da Defesa Civil. (*) Organismos internacionais e muitos autores não aceitam a classificação por somação de efeitos parciais, por não considerá-los desastres.
Exemplos: Enxurradas, Granizo, Terremotos, etc	Exemplos: Seca, Erosão, Poluição Ambiental etc	Exemplos: Acidentes de Trânsito, Acidentes de Trabalho, Cólera, Dengue, etc	

Fontes: SEDEC (Secretaria Nacional de Defesa Civil), Política Nacional de Defesa Civil, Anexo A. Manual para a Decretação de Situação de Emergência (SE) ou de Estado de Calamidade Pública (ECP), Vol.I e II.

Tabela 2.2 – Classificação dos desastres quanto à origem

Tipos de Desastre, segundo a origem			Importância e considerações
Naturais	Antropogênicos	Mistos	Permite aprofundar o estudo dos desastres a partir dos eventos adversos (causas primárias) e intervir nas causas dos desastres, preventivamente.
Exemplos: Enxurradas, Terremotos, Etc	Exemplos: Terrorismo, cólera, acidentes com produtos perigosos, etc.	Exemplos: Efeito estufa, sismicidade induzida, etc.	

Fontes: SEDEC (Secretaria Nacional de Defesa Civil), Anexo A. Manual para a Decretação de Situação de Emergência ou de Estado de Calamidade Pública, Vol.I e II.

Tabela 2.3 – Classificação dos desastres quanto à intensidade

Tipos de Desastre, segundo a intensidade				Importância e considerações
Pequeno Porte ⁽¹⁾	Médio Porte	Grande Porte	Muito Grande Porte	Facilita o planejamento da resposta e da recuperação, segundo a demanda de recursos humanos, materiais e financeiros É o critério para a decretação de SE e ECP. A Avaliação de Danos (AVADAN) é indispensável para essa classificação.
Pouca importância para a coletividade.	Perdas pouco importantes, recuperáveis com recursos locais.	Perdas importantes necessitando de reforço dos recursos locais.	Perdas muito importantes e necessitam de coordenação dos três níveis do SINDEC..	

Fontes: SEDEC (Secretaria Nacional de Defesa Civil), Anexo A. Manual para a Decretação de Situação de Emergência ou de Estado de Calamidade Pública, Vol.I e II.

⁽¹⁾ Desastres de pequeno porte são, geralmente, denominados de ‘Acidentes’.

Para apresentar a linha conceitual mundialmente preponderante, cita-se a Estratégia Internacional para Redução de Desastres (EIRD), programa da Organização das Nações Unidas (ONU), que adota o seguinte conceito de desastre:

Interrupção séria do funcionamento de uma comunidade ou sociedade, que causa perdas humanas e/ou importantes perdas materiais, econômicas ou ambientais; que excedam a capacidade da comunidade ou sociedade afetada para fazer frente à situação, utilizando seus próprios recursos. Um desastre é função do processo de risco. Resulta da combinação de ameaças, condições de vulnerabilidade e insuficientes capacidades ou medidas para reduzir as conseqüências negativas e potenciais do risco (EIRD, 2001, p.35).

Analisando-se comparativamente os dois conceitos estabelecidos pela PNDC e EIRD, Cunha (2007) verifica que na essência são muito próximos, e o que mais os distancia é a amplitude. A EIRD considera desastres tão-somente quando seu impacto excede à capacidade local, enquanto que a PNDC classifica qualquer anormalidade, desde acidentes até os desastres de grande porte. Esse entendimento da PNDC amplia o campo de atuação da Defesa Civil.

Quanto aos risco¹ de desastre a mesma autora compara o conceito utilizado pela defesa civil brasileira, estabelecido pela Política Nacional de Defesa Civil (PNDC) e o adotado pela EIRD. Na PNDC, o risco é a medida de danos ou prejuízos potenciais, expressa em termos de probabilidade estatística de ocorrência e de intensidade ou grandeza das conseqüências previsíveis. Relação existente entre a probabilidade de que uma ameaça de evento adverso ou acidente se concretize, com o grau de vulnerabilidade do sistema receptor a seus efeitos. O conceito de risco proposto pela EIRD significa a probabilidade de conseqüências prejudiciais ou perdas esperadas (mortes, lesões, propriedade, meios de subsistência, interrupção de atividade econômica ou deterioração do ambiente) resultado de interações entre ameaças naturais ou antropogênicas e condições de vulnerabilidade.

Conceitualmente, sob o aspecto físico, o risco está sempre associado ao resultado da ameaça sobre o local, sistema ou pessoa exposta. Além da possibilidade do dano físico, é forçoso reconhecer que há riscos inerentes aos sistemas sociais. Importante também

¹ No Decreto nº 5.376, de 17.02.2005, a atuação do órgão local em casos de riscos, Coordenadoria Municipal de Defesa Civil (COMDEC) ou correspondente, é explicitada no Art.13, incisos: VIII - vistoriar edificações e áreas de risco e promover ou articular a intervenção preventiva, o isolamento e a evacuação da população de áreas de risco intensificado e das edificações vulneráveis; IX - implantar bancos de dados e elaborar mapas temáticos sobre ameaças múltiplas, vulnerabilidades e mobiliamento do território, nível de riscos e sobre recursos relacionados com o equipamento do território e disponíveis para o apoio às operações; X - analisar e recomendar a inclusão de áreas de riscos no plano diretor estabelecido pelo § 1º do art. 182 da Constituição.

considerar os contextos sociais nos quais os riscos ocorrem, em consequência, a população não necessariamente compartilha com as mesmas percepções sobre o risco e suas causas subsequentes.

Cunha (2007), ainda comenta que sobre o risco, outro aspecto importante a se considerar é o grau de aceitabilidade ao qual determinado grupo se dispõe a se expor a ele. O ‘risco aceitável’ relaciona-se com informações científicas, fatores sociais e culturais, econômicos e políticos, assim como aos benefícios decorrentes dessa condição.

De acordo com PNUD (2005, p. 27), “a percepção do risco de cada indivíduo também se relaciona com a lacuna de informações devido à escassez de dados fundamentais sobre as consequências dos desastres e sobre os riscos em todos os níveis, desde o local até o global.”

Independente do autor, ou corrente, de acordo com Cunha (2007), o conceito de desastre sempre remete a três outros conceitos, de ameaça, vulnerabilidade e risco. No campo, considera-se a ameaça, a vulnerabilidade esperada e o risco de desastre. Mas concretamente falando, a ameaça provável se concretiza como evento adverso. A vulnerabilidade pode-se apurar com o montante de perdas e se expressa a mesma em termos financeiros. O risco de desastre potencializado se converte no próprio desastre. Para facilitar o entendimento, dos conceitos relacionados aos riscos e desastres, pode-se representar os mesmos em dois planos: o da probabilidade e da concretização das ocorrências, como esquematizado na Figura 2.3.

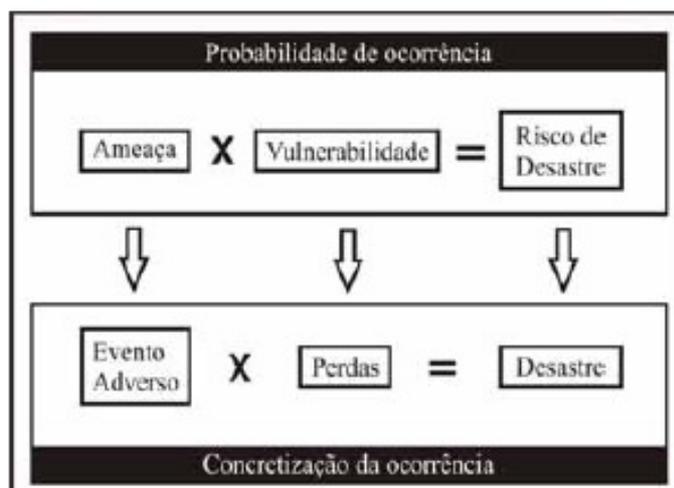


Figura 2.3 Modelo esquemático da conceituação relacionada aos desastres. Fonte: Cunha (2007)

Em 2005, o PNUD publicou o trabalho sobre um Índice de Risco de Desastre (IRD), desenvolvido por uma equipe de consultores e especialistas, o que constituiu o primeiro instrumento mundial de avaliação de risco de desastre, pois tal trabalho permite comparar, país por país, a vulnerabilidade e a exposição dos seres humanos frente a três ameaças naturais: os terremotos, os ciclones tropicais e as inundações. Tal índice foi definido tendo como base a experiência o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) já desenvolvido pelo PNUD. O primeiro informe sobre IRD deverá ser considerado como primeiro passo na medição do risco de desastres no mundo e sua importância está na contribuição que mesmo dará para determinar de que forma se distribui internacionalmente o risco, ressaltando onde há falta de informação para respaldar decisões nas escalas local, nacional e internacional.

Na análise de riscos de desastres, o PNUD considerou os fatores de risco levando em conta as variáveis associadas à urbanização e ao meio de vida rural. Também se examinou, para cada uma, uma pressão dinâmica crítica que provavelmente determine as características futuras dessas variáveis (PNUD, 2005, p. 58).

Neste sentido, os desastres são quantificados em termos de intensidade, enquanto que os eventos adversos são quantificados em termos de magnitude. A intensidade de um desastre depende da interação entre a magnitude do evento adverso e o grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado. Normalmente, o fator preponderante para a intensificação de um desastre é o grau de vulnerabilidade do sistema receptor.

De acordo com o Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) o conceito de desastre é entendido como o resultado de evento adverso que gere danos e/ou prejuízos. Mais amplamente, refere-se a qualquer evento adverso que incorra em danos ao meio ambiente, à propriedade e à incolumidade das pessoas, abarcando todo o universo da autoproteção, independente da magnitude do evento adverso e da capacidade de resposta da comunidade atingida. Essa condição, no Brasil, é considerada apenas para a gradação em quatro níveis do desastre (porte): pequeno ou acidente, médio, grande e muito grande porte.

Além dessa particularidade, Cunha (2007), explica que a subitaneidade do evento adverso, considerada por outros países como fator determinante do desastre, no Brasil, não interfere. Essa lógica conceitual é explicada com a realidade brasileira, na qual se observa que a estiagem, por exemplo, um desastre brasileiro importante e crônico têm evolução gradual. Portanto, se todos os desastres tivessem que ser súbitos para serem reconhecidos

como tais, a estiagem não seria um desastre, o que é inadmissível para o Brasil, já que anualmente seus efeitos vêm comprometendo o desenvolvimento regional e até nacional. Igualmente, se os acidentes de trânsito, somados, não forem considerados um desastre fica difícil explicar a causa de milhares de mortes e danos registrados anualmente no país.

De qualquer forma, analisando a realidade, observa-se que a maior parte dos desastres de maior significância ocorre em função da extrema vulnerabilidade da comunidade afetada, que ora está relacionada com fatores ambientais, físicos, econômicos, sociais e culturais e, não raro, agravados por fatores políticos de governo e, institucionais do Estado.

Levando em consideração tal discussão, este trabalho terá como norte o conceito de desastre estabelecido pela Política Nacional de Defesa Civil: “o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais” (PNDC, 1994, p. 11).

Concluindo, faz-se necessário ressaltar que os conceitos adotados, preferencialmente, são aqueles estabelecidos pela Política Nacional de Defesa Civil, na legislação pertinente e nas publicações técnicas², de uso corrente no âmbito do SINDEC. Com esse entendimento da terminologia a ser adotada, fica estabelecida a base conceitual para os capítulos a seguir.

2.2 Precipitações Intensas

O estudo da distribuição espacial da chuva envolve várias vertentes da Ciência. Peck³ (1980) apud Calheiros (1982) separa o estudo de precipitação em duas escalas as quais são: (1) grande escala ou sinótica, que é a escala de movimento que compreende fenômenos cuja dimensão horizontal varia aproximadamente entre 2000 e 10000 km e cujas escalas de tempo variam entre dias e semanas. São de interesse meteorológico para balanços hídricos globais por exemplo; (2) pequena escala, campo de trabalho do engenheiro civil. O autor afirma que para o estudo de pequena escala é bastante precária a capacidade de modelagem da distribuição espacial da chuva principalmente em função da

² Disponíveis na íntegra no site www.defesacivil.gov.br, na Seção Publicações.

³ PECK, E. L. Design of precipitation networks. *Bull. Of the American Meteor. Society*. 61: 884-992. 1980.

variabilidade espacial do fenômeno ser muito maior que a densidade das redes pluviométricas existentes.

No caso específico deste trabalho, é conveniente que se conheça o regime de precipitação da região, a distribuição espacial e temporal dos seguintes tipos de precipitação:

- Precipitações convectivas: são formadas por um processo de convecção de massa de ar úmido, que se forma em uma região restrita, em função de um gradiente de temperatura vertical. Durante a manhã, a radiação solar aquece o volume de ar e o solo. No período da tarde, com a diminuição da radiação solar e com uma radiação da massa de ar em contato com o solo, em função do calor armazenado no mesmo, cria-se uma situação de instabilidade. Essas chuvas possuem geralmente, grande intensidade e curta duração e atingem áreas restritas. São, portanto, causadoras de inundações em pequenas bacias urbanas.
- Precipitações orográficas: são formadas através da ascensão do volume de ar úmido, que são impulsionadas contra as barreiras montanhosas, por ventos originados do oceano. São chuvas que podem ter pequena a grande intensidade, pois o mecanismo de produção pode estar associado aos outros tipos de chuvas. Caracterizam-se por serem muito freqüentes.
- Precipitações frontais ou ciclônicas, originam-se do contato de massas de ar quentes e frias. As massas de ar quente são elevadas (menor densidade), encontrando condições de temperaturas e pressões menores, facilitando a condensação da umidade existente. Essas chuvas apresentam baixa a média intensidade e longa duração. Atingem grandes áreas, sendo por isso causadoras de inundações.

Tradicionalmente, a precipitação é medida em redes pluviométricas que contam com pluviômetros e pluviógrafos. Tais dados podem ser transmitidos para algum centro de análise em tempo real ou coletados periodicamente. De qualquer forma, esta forma de aquisição de dados apenas fornece amostras pontuais. Geralmente, a utilização de dados pluviométricos pressupõe uma estimativa de sua distribuição espacial e temporal.

A precipitação também pode ser estimada de forma distribuída por sensoriamento remoto. O radar meteorológico e o satélite são instrumentos que possibilitam esse tipo de coleta.

Especificamente sobre as características das precipitações intensas, as que causam maior quantidade de danos e prejuízos para a população, as principais são o total precipitado, sua distribuição temporal e espacial e sua frequência de ocorrência. O conhecimento destas características é essencial para os estudos e projetos de drenagem urbana. Os radares meteorológicos, satélites meteorológicos juntamente com as redes de tele medição permitem uma abrangência significativa na caracterização dos dados de precipitação, principalmente espaço-temporal.

Em regiões não abrangidas por radares meteorológicos e redes telemétricas, é importante que no mínimo se disponha de informações de precipitação máxima obtidas por pluviógrafos e sua caracterização através de uma análise estatística, através das relações intensidade-duração-freqüência.

Deve-se considerar que a caracterização ideal da precipitação seria a decorrente da perfeita integração das informações obtidas de redes telemétricas, redes básicas, radares meteorológicos e satélites meteorológicos.

Diante disso, conhecer as condições climáticas de um determinado local ou região representa uma das variáveis fundamentais para a tomada de decisões na implantação de projetos de engenharia por exemplo. Para tais projetos é importante se conhecer a magnitude das inundações e a sua frequência, sendo bastante difundida e utilizada a precipitação máxima.

A precipitação máxima provável é definida como a maior coluna pluviométrica, correspondente a uma dada duração, fisicamente possível de ocorrer sobre uma dada área de drenagem em uma época do ano (WMO, 1973). A precipitação máxima provável pode, portanto, ser vista não como um limite físico, que pode vir a ocorrer para as condições analisadas, mas, sim, como um evento cuja superação está associada a uma probabilidade muito baixa. Muitas organizações vinculadas à segurança de barragens recomendam explicitamente a precipitação máxima provável para o caso de grandes obras, em que a transposição envolve grandes riscos (SUGAI & FILL, 1990).

É importante ainda se conhecer a precipitação máxima para que em novos projetos de dimensionamento racional de obras como galerias pluviais e sistemas de drenagem urbanos, por exemplo, possam ser definidos os limites para os quais a probabilidade de

ocorrência de alagamentos e inundações provenientes do sub dimensionamento possam ser evitados.

Para tanto geralmente são utilizadas as equações de intensidade, duração e frequência (IDF). A precisão na estimativa da intensidade da precipitação depende do ponto a ser estimado, com o local em que os dados pluviográficos são registrados, do intervalo de aplicabilidade da equação de chuvas intensas e, principalmente, da(s) extensão(s) da(s) série(s) de dados utilizados para obtenção dos parâmetros da equação (RODRIGUES et al 2008). Dessa forma, segundo o mesmo autor, as equações IDF apresentam melhores resultados quando obtidas a partir de séries de dados extensas, ajustando-se, a priori, um modelo de distribuição de probabilidade aos dados de intensidade de chuvas. Dentre as distribuições de probabilidade, a de Gumbel têm sido a mais aplicada em estudos de eventos extremos.

Tomando-se por base a importância que representa o conhecimento das equações que relacionam a intensidade, a duração e a frequência da precipitação pluviométrica, mesmo este trabalho não tendo o objetivo de definir equações de IDF, a partir das mesmas pode-se conhecer o real comportamento das chuvas intensas e, portanto, ordenar o dimensionamento de obras contra os alagamentos e inundações, reduzindo os impactos sócio-econômicos para uma determinada área.

2.3 Definições sobre Enchente, Inundação e Alagamento

Em função de certo conflito e de terminologias variadas caracterizando o mesmo fenômeno, procura-se neste item elucidar os conceitos, buscando estabelecer as semelhanças e diferenças nos conceitos utilizados pelo Sistema de Defesa Civil e por pesquisadores da área de hidrologia, esclarecendo de que forma tais conceitos são utilizados neste trabalho.

De forma geral, o extravasamento da calha de um rio é um fenômeno natural. No entanto, quando a água atinge áreas ocupadas caracteriza o desastre.

A terminologia utilizada para a caracterização deste fenômeno é bastante variada e freqüentemente termos como enchente, cheia, inundação e alagamento são utilizados (erroneamente) como sinônimos. Contudo deve-se ter cautela ao empregá-los, uma vez que cada um deles diz respeito a um determinado fenômeno ou acontecimento.

Segundo Goerl e Kobiayma (2005) as palavras cheia e enchente têm como origem o verbo encher, do Latim *implere*, que significa ocupar o vazio, a capacidade ou a superfície de; e tornar cheio ou repleto. Quando as águas do rio elevam-se até a altura de suas margens, contudo, sem transbordar nas áreas adjacentes, é correto dizer que ocorre uma **enchente**. A partir do momento em que as águas transbordam, ocorre uma **inundação**. A Figura 2.4 ilustra de que forma a elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas caracteriza os diversos fenômenos.

De acordo com o Manual de Desastres Naturais publicado em 2003 pelo Ministério da Integração Nacional, são estabelecidos os conceitos referentes ao que é considerado desastre natural pelo Sistema Nacional de Defesa Civil. Neste sentido, as **inundações**, terminologia mais geral utilizada no documento, podem ser definidas como um transbordamento de água proveniente de rios, lagos e açudes, podendo ser classificadas em função da magnitude e da evolução.

Em função da *magnitude*, as inundações, através de dados comparativos de longo prazo, são classificadas em:

- inundações excepcionais;
- inundações de grande magnitude;
- inundações normais ou regulares;
- inundações de pequena magnitude.

Em função da *evolução*, as inundações são classificadas em:

- enchentes ou inundações graduais;
- enxurradas ou inundações bruscas;
- alagamentos;
- inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar

Como principal causa das inundações, tem-se a precipitação anormal de água que, ao transbordar dos leitos dos rios, lagos, canais e áreas represadas, invadem os terrenos adjacentes, provocando danos. O incremento dos caudais superficiais, na maioria das vezes, é provocado por precipitações pluviométricas intensas e concentradas, mas, também, pode ter outras causas como o degelo, elevação dos leitos dos rios por assoreamento entre outras.

De acordo com BRASIL (2003), as **inundações graduais** são caracterizadas em virtude da elevação das águas de forma paulatina e previsível, mantendo-se em situação de cheia durante algum tempo, escoando-se gradualmente.

Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais. Exemplo típico de periodicidade ocorre nas inundações anuais da bacia do rio Amazonas. Ao longo de quase uma centena de anos de observação e registro, caracterizou-se que, na cidade de Manaus, na imensa maioria dos anos, o pico das cheias ocorre em meados de junho (BRASIL 2003).

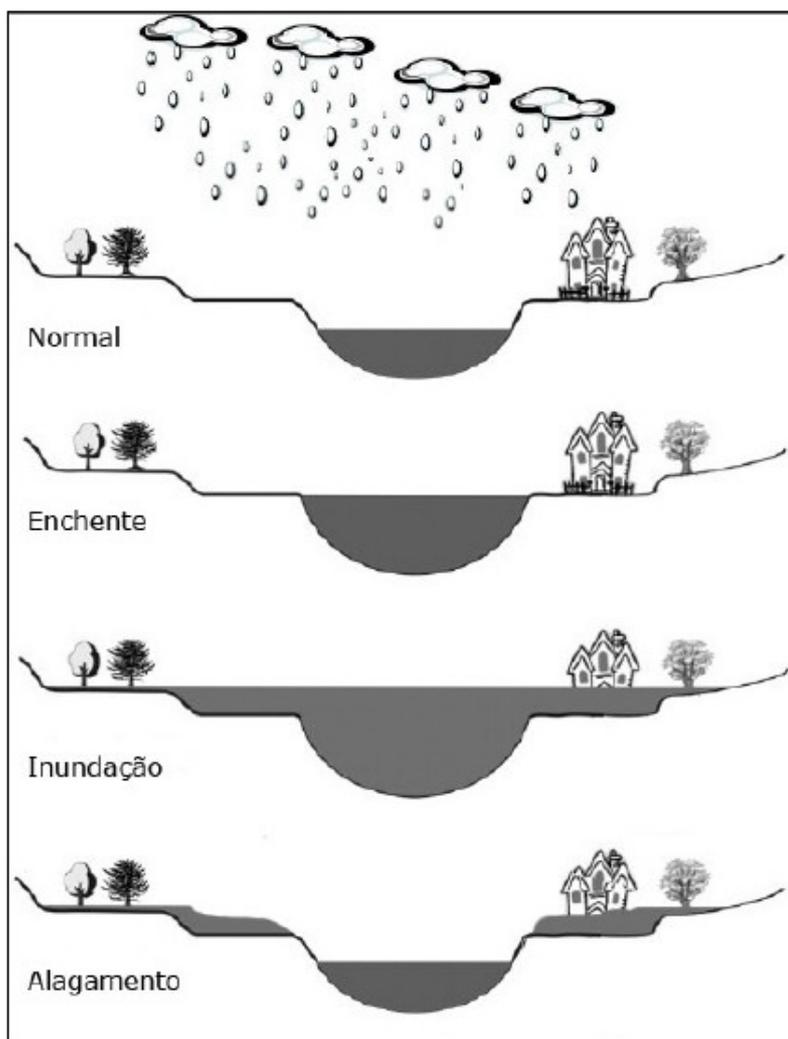


Figura 2.4 Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas e situação de alagamento. Fonte: Adaptado de Goerl e Kobiayma (2005) e Mendes (2005 p.4)

As inundações graduais são intensificadas por variáveis climatológicas de médio e longo prazos e pouco influenciáveis por variações diárias do tempo. Relacionam-se muito mais com períodos demorados de chuvas contínuas do que com chuvas intensas e

concentradas. O fenômeno caracteriza-se por sua abrangência e grande extensão. A Tabela 2.4 mostra algumas definições utilizadas para as inundações graduais.

Tabela 2.4 – Conceitos utilizados para definir as inundações graduais

Autor	Definição
Castro (1999)	As águas elevam-se de forma paulatina e previsível, mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam gradualmente. Normalmente, as inundações graduais são cíclicas e nitidamente sazonais (inundação gradual ou enchente).
Tucci e Bertoni (2003)	Quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, grande parte do volume escoam para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento. O excesso de volume que não consegue ser drenado ocupa a várzea, inundando de acordo com a topografia áreas próximas aos rios (inundação ribeirinha).
Mendiondo (2005)	O transbordamento do curso do rio é, normalmente, o resultado de prolongada e copiosa precipitação sobre uma grande área. Inundações de rio acontecem associadas a sistemas de grandes rios em trópicos úmidos (inundação fluvial).
NWS/ NOAA (2005)	A inundação de uma área normalmente seca causada pelo aumento do nível das águas em um curso d'água estabelecido, como um rio, um córrego ou um canal de drenagem, ou um dique, perto ou no local onde a chuvas precipitaram (inundação).

Fonte: Adaptado de Goerl & Kobiyama (2005) e Kobiyama & Goerl (2007)

As **enxurradas ou inundações bruscas** são provocadas por chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo acidentado caracterizando-se por produzirem súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam-se de forma rápida e intensa. Nessas condições, ocorre um desequilíbrio entre o continente (leito do rio) e o conteúdo (volume caudal), provocando transbordamento. A inclinação do terreno, ao favorecer o escoamento, contribui para intensificar a torrente e causar danos. Esse fenômeno costuma surpreender por sua violência e menor previsibilidade, exigindo uma monitorização complexa (BRASIL 2003). A Tabela 2.5 mostra algumas definições sobre para as inundações bruscas de acordo com diversos autores.

Neste contexto, Kobiyama & Goerl (2007) questionam que as definições das inundações graduais e bruscas não estão bem claras e elucidativas e nem é fácil diferenciar inundações graduais e bruscas em campo. Isso se dá principalmente devido às diferentes percepções e terminologias utilizadas para as inundações há uma dificuldade em padronizar as categorias. O fato é que até hoje diversas vezes as inundações graduais vêm sendo registradas como inundações bruscas e vice-versa. De acordo com os autores,

isto nem sempre é devido à falta de conhecimento, mas sim devido à dificuldade de identificação do fenômeno em campo e à ambigüidade das definições existentes. Além dos problemas tipicamente conceituais e etimológicos, algumas características comportamentais são similares para ambas as inundações, ou seja, ocorrem tanto nas inundações graduais como nas bruscas.

Assim, há uma grande dificuldade em estabelecer um limiar, ou seja, um tempo limite que diferencie as inundações bruscas das graduais. Este tempo limite pode variar muito de acordo com a bacia hidrográfica, pois não apenas a quantidade de precipitação é que determina a ocorrência de um desastre devido a uma inundação, mas também as características fisiográficas da bacia e as características socioeconômicas da comunidade (KOBİYAMA & GOERL 2007, p.47).

Tabela 2.5 – Conceitos utilizados para definir as inundações bruscas

Autor	Definição
WMO (1994)	Em bacias pequenas, de rápida resposta, como as de tempo de concentração menor de seis horas, intensa precipitação pode criar uma inundação brusca.
Castro (1999)	São provocadas por chuvas intensas e concentradas em regiões de relevo acidentado, caracterizando-se por súbitas e violentas elevações dos caudais, os quais escoam-se de forma rápida e intensa.
Mendiondo (2005)	É um evento de inundação de curta duração com uma rápida elevação da onda de inundação e rápida elevação do nível das águas. São causadas por pesadas, geralmente curtas precipitações, como uma chuva torrencial, em uma área que freqüentemente é pequena.
NWS/ NOAA (2005)	Uma inundação causada pela pesada ou excessiva chuva em um curto período de tempo, geralmente menos de seis horas. Também, as vezes uma quebra de barragem pode causar inundação brusca. dependendo do tipo de barragem e o período de tempo que ocorre a quebra.

Fonte: Adaptado de Goerl & Kobiyama (2005) e Kobiyama & Goerl (2007)

Contudo, faz-se necessária a distinção entre as inundações bruscas e graduais (Figura 2.5), visto que há um sistema de registro para cada tipo de inundação criado e gerenciado pela Defesa Civil Nacional. Este sistema era feito com base em relatórios de avaliação de danos, conhecido como (AVADAN) enviados à Defesa Civil quando um município decretava a situação de emergência ou o estado de calamidade pública em virtude da ocorrência de um desastre natural. Este registro era importante fonte de dados, pois era o único reconhecido oficialmente.

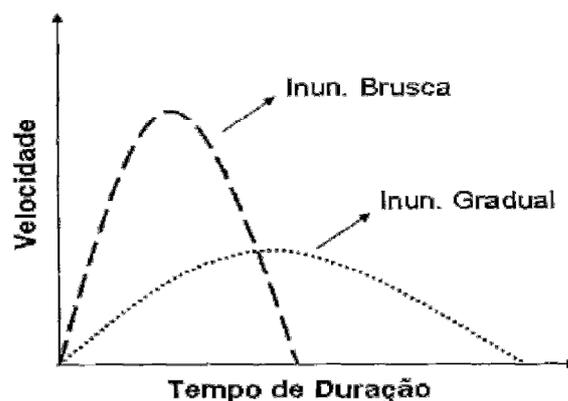


Figura 2.5 Diferença entre inundação brusca e gradual

Em dezembro de 2010 entrou em vigor a lei nº 12.340, que dispõe sobre o SINDEC (Sistema Nacional de Defesa Civil), sobre as transferências de recursos para ações de socorro, assistência às vítimas, restabelecimento de serviços essenciais e reconstrução nas áreas atingidas por desastre e sobre o Fundo Especial para Calamidades Públicas. Conforme o artigo 17 da referida lei, para o município ou o estado receber recursos para a execução de ações de reconstrução destinadas ao atendimento de áreas afetadas por desastres, ele deve enviar para a Secretaria Nacional de Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional três documentos: o decreto declaratório do estado de calamidade pública ou da situação de emergência; NOPRED (Notificação Preliminar de Desastre), emitido pelo órgão público competente; e plano de trabalho, com proposta de ações de reconstrução em áreas atingidas por desastres. Mesmo no NOPRED ainda deve-se colocar o código do tipo de desastre, ou seja, ainda deve-se continuar a distinguir as inundações entre graduais e bruscas.

Levando em consideração tais idéias, e com o objetivo de diferenciar os dois tipos de inundação de maneira simples e quantitativa, Kobiyama & Goerl (2011) propõem o IEO (Índice de Eficiência de Operação) que é definido como:

$$IEO = T_c / T_o \quad (1)$$

Em que:

T_c é o tempo de concentração, que é definido como o tempo necessário para chuva que cai no local mais distante do exutório escoar até ele;

T_o é o tempo operacional de resposta no sistema instituição-comunidade.

De acordo com os autores, o T_c é um fator que contém influências ambientais de precipitação, topografia, uso de solo, etc. Já o T_o é determinado pelos fatores humanos e proposto como:

$$T_o = -T_a + T_t + T_{al} + T_e \quad (2)$$

O T_a é o tempo antecedente da previsão do tempo com alta precisão. T_t é o tempo de transmissão levado do Centro de Previsão até Defesa Civil. O T_{al} é o tempo necessário para alertar a comunidade. Por último, T_e é o tempo necessário para a comunidade se deslocar para local seguro. Desta maneira, esse índice envolve aqueles fatores que determinam a ocorrência de um desastre natural, isto é, os fatores ambientais e sociais (KOBİYAMA & GOERL, 2011).

Por meio desta relação, as inundações bruscas e graduais podem ser identificadas. Quando $IEO > 1$, as inundações são graduais e $IEO < 1$, ocorrem inundações bruscas. Do ponto de vista de prevenção de desastres naturais, quando $IEO < 1$, ou seja, quanto menor valor de IEO pode-se ter maior dano, pois a população não teria tempo hábil para tomar as medidas preventivas. Por exemplo, sabendo que em uma bacia o T_c é de quatro horas, deve-se estabelecer um tempo de resposta menor que isto, o que resultará em $IEO > 1$. Dessa maneira, o T_o deve ser menor que quatro horas, por exemplo, duas horas. Assim, teríamos, $IEO = 4/2 = 2$, ou seja, $IEO > 1$, resultando em inundações graduais (KOBİYAMA & GOERL, 2011).

Além de tal complexidade relacionada aos conceitos anteriormente discutidos, tem-se ainda o conceito de alagamento. Os **alagamentos**, segundo Brasil (2003) são as águas acumuladas no leito das ruas e nos perímetros urbanos por fortes precipitações pluviométricas, em cidades com sistemas de drenagem deficientes. Nos alagamentos o extravasamento das águas depende muito mais de uma drenagem deficiente, que dificulta a vazão das águas acumuladas, do que das precipitações locais. O fenômeno relaciona-se com a redução da infiltração natural nos solos urbanos, a qual é provocada por:

- Compactação e impermeabilização do solo;
- Pavimentação de ruas e construção de calçadas, reduzindo a superfície de infiltração;
- Construção adensada de edificações, que contribuem para reduzir o solo exposto e concentrar o escoamento das águas;

- Desmatamento de encostas e assoreamento dos rios que se desenvolvem no espaço urbano;
- Acumulação de detritos em galerias pluviais, canais de drenagem e cursos d'água;
- Insuficiência da rede de galerias pluviais.

Os alagamentos são freqüentes nas cidades mal planejadas ou quando crescem explosivamente, dificultando a realização de obras de drenagem e de esgotamento de águas pluviais. É comum a combinação dos dois fenômenos - enxurrada e alagamento - em áreas urbanas acidentadas, como ocorre no Rio de Janeiro, Belo Horizonte e em cidades serranas.

Tucci (2003), referindo-se a este tipo de fenômeno, comenta que na segunda metade do século XX, com o acelerado desenvolvimento das cidades e a densificação urbana, rios urbanos passaram a inundar com maior freqüência. Este processo ocorre devido ao aumento das áreas impermeáveis e a canalização que acelera o escoamento através de condutos e canais. A quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta produzindo inundações mais freqüentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento natural. Esta inundação é **devido a urbanização ou na drenagem urbana**.

Fazendo uma observação, o mesmo autor afirma que tanto as inundações ribeirinhas como as devido a urbanização ou na drenagem urbana, podem ocorrer isoladamente ou combinados, mas geralmente as inundações ribeirinhas ocorrem em bacias de grande e médio porte ($> 500 \text{ km}^2$) no seu trecho onde a declividade é baixa e a seção de escoamento pequena, enquanto que as inundações na drenagem urbana ocorrem em pequenas bacias urbanizadas (1 - 100 km^2 , a exceção são grandes cidades como São Paulo).

Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população no primeiro caso e da impermeabilização e canalização da rede de drenagem no segundo. A inundação ribeirinha tem sido registrada com a história do desenvolvimento humano. **A inundação devido à urbanização** tem sido mais freqüente nos últimos 30 anos, com o aumento significativo da impermeabilização das cidades e a tendência dos engenheiros de drenarem o escoamento pluvial o mais rápido possível das

áreas urbanizadas (visão ultrapassada, mas mantida nos países em desenvolvimento) (TUCCI, 2003).

Levando em consideração as ideias descritas, serão utilizados neste trabalho os termos **alagamentos**, considerando que os mesmos estão fortemente ligados a precipitações pluviométricas incompatíveis com a drenagem ocasionando o acúmulo de água no leito das ruas e nos perímetros urbanos e, **inundações**, também causadas por chuvas intensas, geralmente de curta duração, causando a elevação e o transbordamento das águas de seu leito natural.

No caso do município de Curitiba, como tem-se rios cortando o município como um todo, nas ocasiões de chuvas intensas os processos podem se sobrepor, sendo que as águas acumuladas em ruas e no perímetro urbano podem ser provenientes tanto de sistemas de drenagem deficientes como pela própria dinâmica natural do rio e seu extravasamento, ocupando o leito menor.

Além disso, os dados coletados pela defesa civil municipal e disponibilizados para serem utilizados neste trabalho não discriminam alagamentos e inundações como fenômenos distintos, ou seja, os dois fenômenos são considerados como um conjunto. No entanto, as estatísticas e análises foram elaboradas considerando que os pontos em que houve registros de ocorrências foram de **alagamentos** até mesmo porque as inundações atingem uma área muito maior quando comparadas com um alagamento.

Para diminuir os danos sofridos pela população potencialmente atingida pelas águas, pode-se:

- diminuir a magnitude do evento: desta forma um menor volume d'água extravasará do canal atingindo uma área também menor (Figura 2.6);
- reduzir a vulnerabilidade e exposição da área: ocupar a área de risco com construções apropriadas (através de zoneamento ambiental ou métodos construtivos com mecanismos contra inundações) ou retirar a área a ser atingida pessoas e bens antes que a inundação aconteça (Figura 2.7).

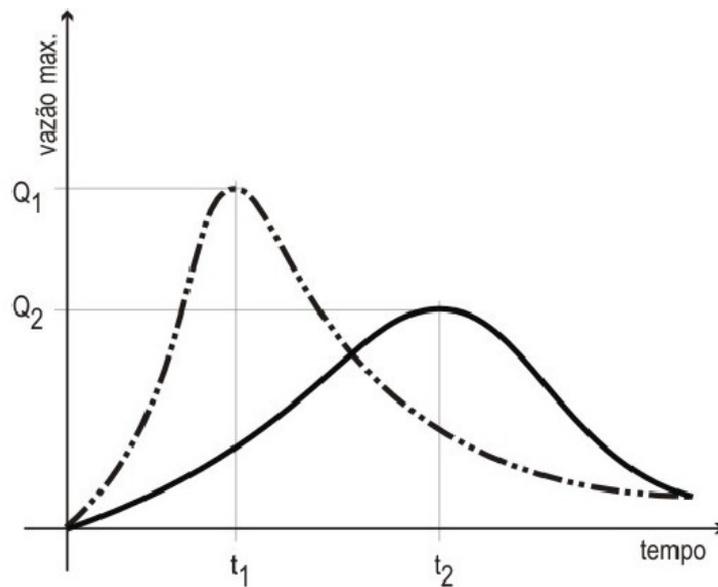


Figura 2.6 Ilustração de redução da magnitude.

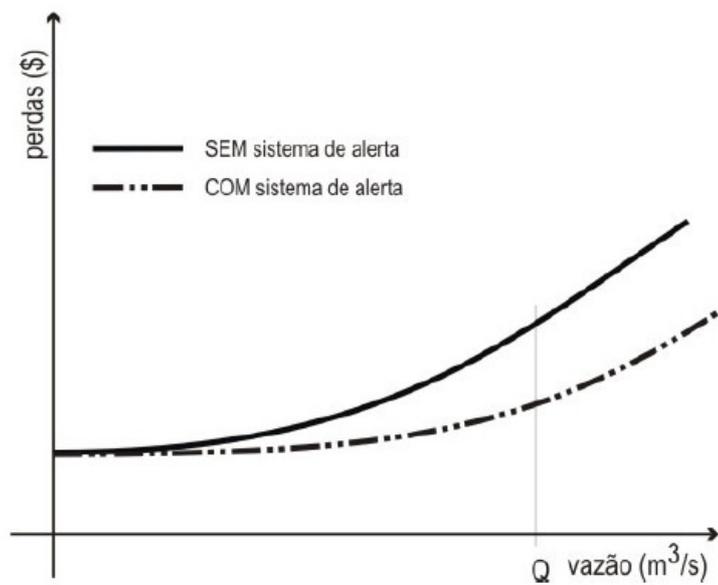


Figura 2.7 Ilustração de redução da vulnerabilidade.

A drenagem urbana também possui papel relevante nos impactos sofrido pela população.

Na área rural a chuva é retida pela vegetação, infiltra-se no subsolo e o que resta escoar pela superfície gradualmente, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e com picos de enchente moderados, mas nas áreas urbanizadas a impermeabilização reduz a infiltração.

Para as áreas urbanizadas, os sistemas de drenagem urbana são sistemas essencialmente preventivos de inundações, principalmente nas áreas mais baixas das comunidades sujeitas a alagamentos ou em marginais de cursos naturais de água.

Segundo Tucci (2003), os sistemas de drenagem são classificados de acordo com suas dimensões em sistemas de microdrenagem, também denominados de sistemas iniciais de drenagem, e de macrodrenagem.

A microdrenagem inclui a coleta e a condução das águas superficiais através de pequenas e médias galerias, fazendo ainda parte do sistema todos os componentes para que tal projeto ocorra.

A macrodrenagem inclui, além da microdrenagem, as galerias de grande porte e os corpos receptores, tais como canais e rios canalizados ou não.

Quando um sistema de drenagem não é considerado desde o início da formação do planejamento urbano, é bastante provável que esse sistema ao ser projetado revele-se, ao mesmo tempo, de alto custo e deficiente. É conveniente para a comunidade que a área urbana seja planejada de forma integrada. Se existirem planos de desenvolvimento regionais, estaduais ou federais, é interessante a perfeita compatibilidade entre o plano de desenvolvimento urbano e esses planos.

Todo plano urbanístico de expansão deve conter em seu bojo um plano de drenagem urbana, visando delimitar as áreas mais baixas e potencialmente inundáveis a fim de diagnosticar a viabilidade ou não da ocupação destas áreas do ponto de vista da expansão dos serviços públicos.

Geralmente a capacidade da microdrenagem é planejada para expulsar água do loteamento, porém a macrodrenagem muitas vezes não está preparada para receber esse acúmulo continuado de ampliação urbana, considerando que não existe nenhuma regulamentação ou planejamento da macrodrenagem.

Um sistema de drenagem adequado proporcionará uma série de benefícios, tais como:

- a) desenvolvimento do sistema viário;
- b) redução de gastos com manutenção das vias públicas;
- c) valorização das propriedades existentes na área beneficiada;
- d) escoamento rápido das águas superficiais, facilitando o tráfego por ocasião das precipitações;
- e) eliminação da presença de águas estagnadas e lamaçais;

- f) recuperação de áreas alagadas ou alagáveis;
- g) maior segurança e conforto para a população habitante ou transeunte pela área de projeto.

Existem ações que influenciam na eficácia das soluções de Drenagem Urbana, conforme cita Andrade (1999):

- a) políticas que definam os objetivos a serem alcançados e os meios legais, institucionais, técnicos e financeiros para atingi-los;
- b) políticas de ocupação do solo urbano compatíveis com a política de drenagem urbana, com destaque para ocupação das várzeas de inundação;
- c) processos de planejamento com medidas de curto, médio e longo prazos em toda a bacia;
- d) entidades eficientes para exercer liderança do setor, promovendo a participação pública, estabelecendo critérios e aplicando leis;
- e) domínio de tecnologia adequada para planejamento, projeto, construção e operação das obras;
- f) campanhas de educação e esclarecimento da opinião pública.

Com relação às ações supracitadas, algumas conseqüências devem ser observadas, advindas do comportamento político e administrativo:

- a) tendência em atuar corretivamente em pontos isolados devido a disputas por recursos entre diversos setores da administração urbana;
- b) dificuldade em disciplinar a ocupação do solo devido a conflitos de interesses;
- c) políticas de médios e longos prazos são invariavelmente relegadas a um segundo plano.

No Brasil, institucionalmente, a infra-estrutura de microdrenagem é reconhecida como da competência dos governos municipais que devem ter total responsabilidade para definir as ações no setor; ampliando-se esta competência em direção aos governos estaduais, na medida em que crescem de relevância as questões de macrodrenagem, cuja referência fundamental para o planejamento são as bacias hidrográficas. Isto é, deve ser de competência da Administração Municipal os serviços de infra-estrutura urbana básica relativos à microdrenagem e serviços correlatos - incluindo-se terraplanagens, guias, sarjetas, galerias de águas pluviais, pavimentações e obras de contenção de encostas, para minimização de risco à ocupação urbana. Já ações de macrodrenagem devem envolver a

administração Estadual, uma vez que as bacias hidrográficas geralmente estão localizadas dentro de vários municípios.

Como medidas de combate a inundações, existem as medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais consistem em obras de engenharia implementadas com o objetivo de reduzir o risco de enchentes. Elas modificam o sistema fluvial e são as mais onerosas. Tucci (2003) as classifica em extensivas ou intensivas. As extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como, por exemplo, a alteração da cobertura vegetal do solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. As medidas intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser de três tipos:

- a) aceleração do escoamento: aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros;
- b) retardamento do escoamento: reservatórios e as bacias de amortecimento;
- c) desvio do escoamento: obras como canais de desvios, construção de diques e polders.

Estas medidas são essenciais e necessárias para a solução de grande parte dos problemas de inundações urbanas. Porém, além de onerosas, não representam por si só soluções eficazes e sustentáveis dos problemas mais complexos de drenagem urbana. As melhores soluções são alcançadas através de compreensão mais integrada do ambiente urbano e das relações entre os sistemas que o compõem.

As medidas não estruturais defendem a melhor convivência da população com enchentes. Não são projetadas para dar proteção completa, pois isso exigiria uma atuação contra a maior enchente possível.

Podem ser agrupadas em: regulamento do uso da terra (zoneamento), construções à prova de inundações, sistemas de alerta, manutenção e limpeza da rede de drenagem, integração de gerenciamento dos setores de saneamento entre outros. Assim, o presente trabalho é uma contribuição para o aprimoramento dos sistemas de alerta e portanto de medidas não estruturais de combate à inundações.

2.4 Gerenciamento do Risco de Inundação

O que se chama de gerenciamento de desastres naturais é um conjunto de ações, que têm como objetivo mitigar os efeitos negativos dos eventos extremos (ANDRADE, 2006).

Segundo Treby et al (2006), as questões técnicas e sociais são consideradas, por alguns países, de grande importância para uma eficaz compreensão e gerenciamento das inundações. Ainda segundo os mesmos autores, é hoje bem reconhecida a importância de acomodar o entendimento das ameaças públicas e a percepção do risco em modelos de gerenciamento das inundações.

De acordo com Tobin e Montz (1997), a gestão de risco é um processo de gerenciamento de decisões que envolvem a definição de necessidades, o reconhecimento das opções aceitáveis e a escolha de estratégias apropriadas. É um processo social complexo que envolve ações de planejamento, intervenção e organização, que devem ser avaliadas e conduzidas de forma contínua e consistente em cada fase do desastre (LAVELL, 2003).

As propostas modernas de gestão de riscos de inundação contêm três etapas principais: “Antes” (estágio de preparo, sistemas de alerta e prevenção), “Durante” (ações de controle de manejo, medidas de proteção) e “Após” o evento (reconstrução/reabilitação das áreas atingidas). O modelo referencial Técnico – Prático ilustrado no esquema da Figura 2.8 mostra as etapas e suas integrações (MEDIONDO, 2005).

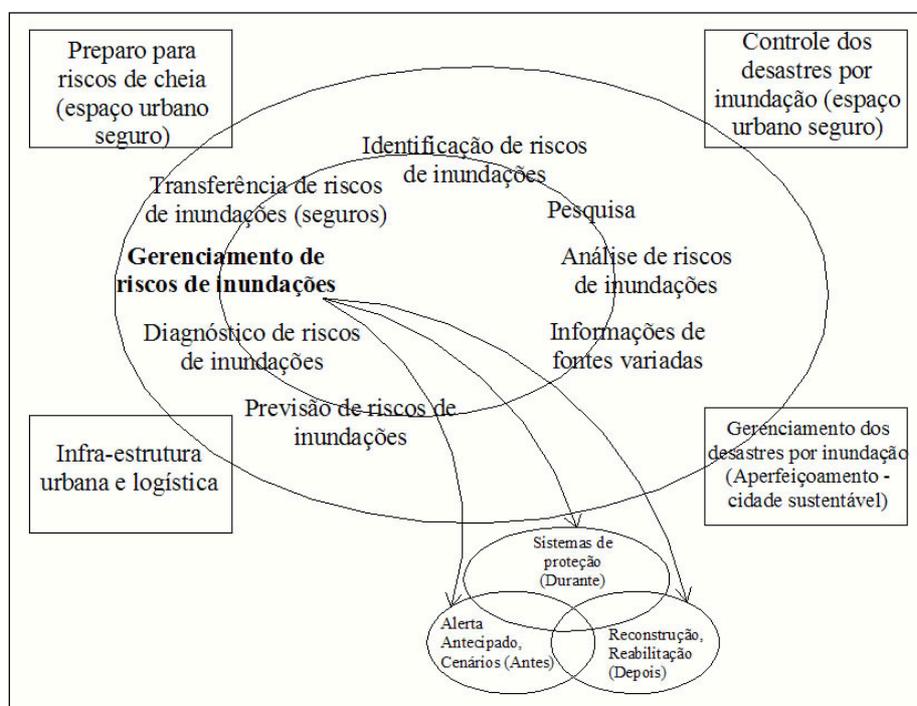


Figura 2.8 Conceitos e princípios em gerenciamento de riscos de inundações. Fonte: Mediondo (2005)

Marcelino (2007) abordando o tema gestão de risco de inundação, também ressalta que o ciclo de gerenciamento de desastres naturais envolve as fases *Antes*, *Durante* e *Depois*, como apresentado por Tobin e Montz (1997). Tal esquema apresentado em forma de gráfico (Figura 2.9) relaciona as fases de risco ao longo do tempo (eixo das abcissas) com três indicadores ambientais: qualidade de vida, atividade econômica e estabilidade social (eixo das ordenadas). Como pode ser observado, a partir do momento em que ocorre o desastre, todos os indicadores considerados decrescem. Uma vez atingido um ponto mínimo e crítico, os indicadores tendem a melhorar de maneira gradual.

Como coloca Tobin e Montz (1997) apud Marcelino (2008), o *Antes* é a fase que antecede a chegada dos fenômenos extremos, conhecida como etapas de Prevenção e Preparação para o impacto. É a fase mais importante, onde são adotadas medidas para reduzir o impacto dos desastres, como as análises de risco, a execução de projetos de engenharia (diques, pontes, muros de contenção, etc.), a elaboração de políticas públicas (plano diretor, zoneamentos ambientais, legislação, etc.), a educação ambiental em escolas e comunidades afetadas, etc. Nos momentos mais críticos que precedem o impacto, destacam-se os sistemas de previsão (meteorológica e hidrológica) e de alerta. Quanto maior for o investimento nesta fase, menor será a probabilidade de danos, podendo até mesmo acarretar na diminuição da frequência e intensidade dos desastres.

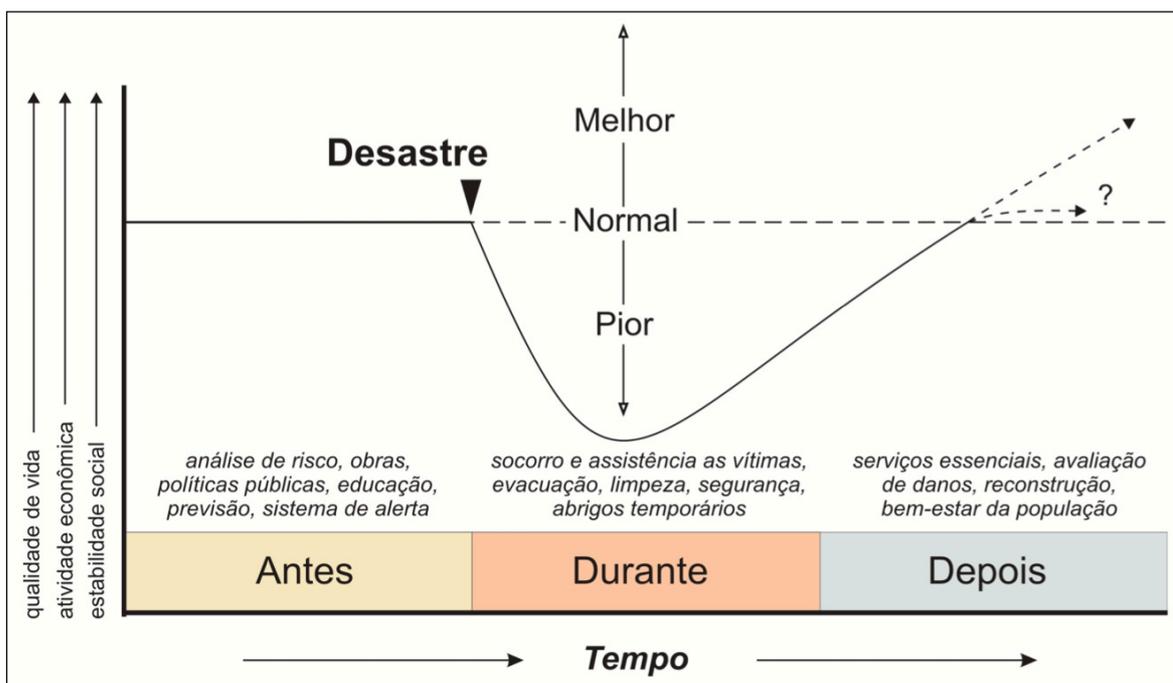


Figura 2.9 Ciclo de gerenciamento de um desastre.
 Fonte: Marcelino (2005) adaptado de Tobin e Montz (1997)

O *Durante* envolve a realização de ações emergenciais de *Resposta* que visam o salvamento (socorro e assistência às vítimas), o auxílio (evacuação, abrigo, alimentação, atendimento médico, etc.) e a reabilitação do cenário do desastre, que corresponde ao início das atividades de restauração (curto prazo), como limpeza, segurança, entre outros (TOBIN e MONTZ, 1997 apud MARCELINO, 2008).

Enquanto que, o *Depois* é representado pelas atividades de *Reconstrução* necessárias para o restabelecimento das funções básicas de uma comunidade (bem-estar da população) a médio e longo prazo. Neste momento, é feito o restabelecimento dos serviços essenciais (água, luz, comunicação e transporte), a avaliação dos danos e, nas áreas mais afetadas, a reconstrução das estruturas danificadas ou destruídas (casas, pontes, estradas, etc.). O objetivo na fase de Reconstrução, ampliado pela fase de Prevenção, é retornar a normalidade, entendida como sinônimo de funcionalidade, e não de retorno às condições que precederam o desastre. Assim, almeja-se que a área afetada retorne as suas funções socioeconômicas primordiais, mas de forma compatível com a realidade ambiental que a cerca, o que resultaria numa elevação da qualidade de vida local. Dessa forma, a vulnerabilidade e o risco de desastres tenderiam a diminuir de forma natural (TOBIN e MONTZ, 1997 apud MARCELINO, 2008).

O “Programa de Avaliação da Água Mundial das Nações Unidas” (United Nations World Water Assessment Programme – WWAP, 2006) possui outro esquema que analisa o ciclo de gerenciamento de risco. Tal esquema é adaptado do ciclo de mitigação-crise-reabilitação da Defesa Civil Suíça (Figura 2.10).

De acordo com Giuntoli (2008), o relatório da WWAP salienta como os desastres relacionados a água perturbam o desenvolvimento econômico e também o tecido das sociedades vulneráveis comprometendo os ganhos acumulados em desenvolvimento social e econômico e os investimentos em melhorias nas condições e na qualidade de vida. As políticas e as medidas de redução dos riscos de desastre devem, portanto ser projetadas de maneira a ser consistentes com objetivos integrados de desenvolvimento de longo prazo e planos de implementação.



Figura 2.10 Ciclo de gerenciamento de risco.
 Fonte: WWAP (2006) adaptado de Giuntoli (2008).

Esta abordagem demonstra como o gerenciamento de riscos relacionados à água é uma questão de governança (*governance*). Em particular, as atividades de assistência e reconstrução após desastre precisam ser melhoradas como o objetivo de “reconstruir melhor” (*building back better*) a longo prazo. Isso significa que é preciso analisar as causas dos desastres para direcionar os investimentos em reconstrução, em particular para infra-estruturas e uso do solo. Como mostrado no esquema da WWAP, limitar a grandeza dos danos e reduzir a vulnerabilidade são dois objetivos principais interligados no ciclo de gerenciamento de risco.

2.5 Alagamentos e Inundações na RMC

A RMC, insere-se na bacia hidrográfica do Alto Iguaçu, que por sua vez faz parte da bacia do Iguaçu componente da bacia do Paraná. Está localizada no estado do Paraná, compreendendo parte da RMC (Região Metropolitana de Curitiba), próximo ao litoral, numa zona compreendida entre a Serra do Mar e a escarpa Devoniana, com uma área total de 6.036 km² (SUDERSHA, 2002).

Freqüentemente são noticiadas informações sobre alagamentos e inundações em Curitiba, principalmente nas porções da grande planície aluvial do rio Iguaçu, bem como

em algumas bacias que deságuam no Iguaçu mas que tem praticamente toda sua área integrada na área urbana da RMC, como no caso da bacia hidrográfica do rio Belém e do rio Atuba.

Segundo Agache (1943), Lima (2000), Mazza (1990) e Fendrich (2000), as chuvas de maior interesse são as torrenciais do tipo convectivas, cuja duração não ultrapassa 40 minutos. Essas chuvas ocorrem em Curitiba e RMC entre novembro a março, às vezes acompanhadas de granizo.

Vários trabalhos foram publicados levando em consideração a problemática das inundações em Curitiba e RMC, inseridas na bacia do Alto Iguaçu. Dentre eles encontra-se as publicações de Zanela (2005), que analisou as inundações no bairro Cajuru em Curitiba, elaborando um estudo sobre os impactos da urbanização nas inundações que ocorrem no bairro. Fortunato (2006), também falando sobre tal problemática, analisou as inundações na bacia do rio Belém, buscando subsídios para a prevenção e o controle das inundações nas cidades por meio de ações de planejamento e gestão ambiental urbana.

Fortunato (2006), analisando as fontes disponíveis de dados sobre inundações, comenta que a maior parte das informações disponíveis fazem referência a inundações que ocorreu no ano de 1983 e 1999 (Figura 2.11). Comenta ainda que a maior parte das informações sobre os eventos é registrado pelos jornal de maior veiculação diária, o Gazeta do Povo. Tais relatos também são utilizados por Zanela (2005).



Figura 2.11 Inundação na Rua XV de Novembro – Fevereiro de 1999.
Fonte: Jornal Gazeta do Povo apud Fortunato (2006)

Geissler & Loch (2004), elaborando uma análise histórica das inundações em Curitiba especificamente, utilizaram para tal estudo um período temporal de um século de dados. Tais dados foram obtidos pelas autoras em Agache (1943), Braga (1990), Destefani

(1999), Fendrich (2000), Fenianos (1996), IPPUC (1985), Lacerda (2001), Lima (2000) e cartas cadastrais na escala 1:2.000.

Neste estudo, é colocada em pauta a discussão sobre a cota topográfica crítica para a ocorrência de inundações em Curitiba. As autoras discordam dos estudos de Agache (1943) que afirmava que a cota topográfica crítica era de 886m e também de Fendrich (2000) que afirmava que a cota situava-se entre 882-889m. Em suas análises históricas (século XIX e início do século XX) identificaram que ocorreriam inundações freqüentes em cotas topográficas maiores de 896m, sendo que a inundação oscilava em níveis próximos de 0,50m, apesar de haver vastas florestas, campos e pouca impermeabilização e edificações esparsas.

Cruzando informações de Agache (1943), Destefani (1999) e Cartas Cadastrais em escala 1:2.000, constataram que em dezembro de 1932 o rio Ivo inundou o Centro de Curitiba em profundidade de 1,8m próximo a rua João Negrão situada na cota topográfica 896,5m. Na praça Zacarias (894m) a profundidade atingiu 1,2m. Na rua XV de Novembro/Boca Maldita situada na cota topográfica 896,0m a profundidade do alagamento foi de 0,50m (GEISLER & LOCH, 2004).

Levando-se em consideração tais verificações, as autoras ainda discordam de IPPUC & PMC (1992) quando dizem que Curitiba conviveu, durante três séculos e meio, sem problemas com os rios e que a ocupação urbana ocorreu acima do leito maior, acima da linha de enchente. As inundações não “acabaram” na década de 70.

Diante de tais preocupações, segundo o Governo do Paraná & JICA (1996), os prejuízos causados por inundações na região do Alto Iguaçu, em Curitiba e Região Metropolitana, são considerados segundo o grau de gravidade em nível 4 e 5. Foram previstas diretrizes para controlar as enchentes no período de 1996 a 2015 e deste ano em diante. Foi prevista a melhoria do método existente e emprego de novos métodos para: zoneamento, reassentamento e Regra de Operação de Reservatórios existentes, previsão e alerta (FFWS), evacuação e atividades de resgate, gerenciamento e implementação no controle das enchentes. Os custos da I etapa do PROSAM foram calculados em duzentos e trinta e três milhões de dólares, sendo 52% financiados pelo Banco Mundial.

JICA (1995), em um estudo sobre inundações no estado do Paraná, identificou cinco áreas críticas sujeitas a inundações na Bacia do rio Iguaçu. Dentre essas cinco encontra-se a Região Metropolitana de Curitiba. Neste estudo, afirmam que as inundações ocorrem nas áreas próximas ao rio Iguaçu e seus tributários: rio Atuba, rio Irai, rio

palmital, Rio Pequeno, rio Belém, rio Ivo e rio Barigui. Nesta região, ocorreram inundações em 1980, 1981, 1982, 1983, 1988, 1992, 1993 e 1995. No entanto, a maior inundação ocorreu em 1983 contabilizando só em Curitiba cerca de 200.000 vítimas. Esse evento crítico provocou na época uma série de mobilizações e proposições visando solucionar problemas relacionados à drenagem urbana no município.

Conforme IPPUC (1983), a população de Curitiba vinha sofrendo anualmente com inundações, principalmente a população mais carente. Isso ocorria devido às falhas no sistema de drenagem, o qual era incompatível com o acelerado desenvolvimento urbano, além de ocupações em áreas não adequadas – às margens dos rios, várzeas, abaixo da cota de inundação. Durante o evento de 1983, milhares de pessoas ficaram desabrigadas e bairros inteiros foram alagados, tanto em Curitiba quanto em algumas cidades da RMC, havendo ainda grande perda material e de vidas humanas.

A inundação de fevereiro de 1999, segundo Lima (2000), definida como “inundação relâmpago”, atingiu tanto as populações de baixa renda quanto as de alta renda, proporcionando elevados prejuízos em toda a região. O evento foi caracterizado por uma intensa precipitação, com distribuição irregular, alcançando em algumas áreas da cidade valores elevados, os quais geraram inúmeros alagamentos, afetando milhares de pessoas. As informações obtidas junto às estações pluviométricas distribuídas pela malha urbana do município demonstraram que a precipitação dos dias 21 e 22 de fevereiro de 1999 atingiram em algumas estações de medida níveis históricos enquanto em outras foi praticamente irrelevante.

Fendrich (2000) definiu essa precipitação como representante de um risco hidrológico de tempo de recorrência de 100 anos – considerando o modelo desenvolvido pelo autor para Simulação de Cotas de Enchente na Bacia do rio Belém. Para Fendrich, vários fatores contribuíram para a magnitude desse evento, o qual atingiu marca crítica de 6,2 m registrada no Campus da PUC-PR – Estação Pluviográfica Curitiba Prado Velho, onde o leito normal é de 0,7m. Dentre esses fatores pode-se citar: maior índice pluviométrico na Estação Prado Velho (197,5mm); chuva acumulada entre 01/01/1999 e 20/02/1999, que tornou a capacidade de infiltração da bacia (Formação Guabirotuba) quase nula; áreas impermeabilizadas na bacia, as quais agravaram ainda mais o quadro de infiltração na mesma, implicando em um rápido escoamento superficial em direção aos canais; chuva convectiva intensa com quase duas horas de duração; deslocamento da chuva

do sentido Norte para o Sul, acompanhando o relevo da bacia hidrográfica do Belém, ampliando o fluxo de águas do Alto para o Médio e Baixo Belém.

Tendo em vista tais eventos e principalmente os críticos do ponto de vista hidrológico, JICA (1995) propôs algumas medidas estruturais para minimizar os efeitos das inundações em Curitiba e RMC. Dentre elas estão a construção de um canal extravasor de 15 km paralelo ao rio Iguaçu; relocação e reassentamento de casas localizadas em áreas de risco, restauração dos parques urbano além da extensão do programa PROSAM.

Neste mesmo estudo, JICA (1995) apresenta alguns dados quantitativos interessantes relativos aos danos e prejuízos causados por eventos de inundação em diversos municípios deste estado, dentre eles Curitiba e alguns municípios da sua região metropolitana. Neste estudo apresenta-se uma estimativa de custos diretos e indiretos causados por cheias ocorridas na Região Metropolitana de Curitiba – RMC, conforme ilustrado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Estimativa de danos de cheias na RMC

Ano	Estimativa Monetária dos Danos (milhões de Us\$)
1983	32,9
1993	19,6
1995	43,7

Fonte: JICA (1995)

Ainda segundo JICA (1995), no ano de 1983 ocorreu a maior cheia de Curitiba e sua região metropolitana, desde 1932. No entanto, MÜLLER et al. (1995) mostram que o conceito de máxima inundação varia conforme a sub-bacia considerada. Para a RMC no rio Iguaçu na Ponte BR-277 (687 km²) a vazão de pico em janeiro de 1995 superou a de 1983 em aproximadamente 24%. Estes mesmos autores observam que, “também contribuíram para a gravidade desta inundação [de 1995] a crescente ocupação (muitas vezes ilegal) das várzeas, o despejo de lixo nos cursos de água, a falta de dragagem dos rios e a falta de um plano de utilização e gestão dos recursos hídricos e de ocupação do solo na RMC”. Já para a bacia do rio Iguaçu a jusante de Balsa Nova (2.730 km²) a cheia de 1983 foi bem mais severa como registram os postos fluviométricos de Porto Amazonas (3.660 km²) e União da Vitória (22.400 km²), entre outros. Cabe mencionar ainda que, o número de pessoas desabrigadas na RMC pelas cheias de 1983 e 1995 foi de aproximadamente 9.000 (JICA, 1995) e 18.000 (MÜLLER et al., 1995) respectivamente.

Como pode ser observado, as inundações na Região Metropolitana de Curitiba constituem um problema que tem produzido danos e prejuízos significativos ao longo dos últimos tempos. Isto se deve principalmente a que Curitiba e sua região metropolitana, assim como a maioria das metrópoles brasileiras apresenta um processo de urbanização ao longo dos seus rios, que combinado com o crescimento e desenvolvimento muito rápido, fazem com que os eventos de cheias ocorram com maior frequência.

2.5.1 Índice de Agravamento de Inundações

A SUDERHSA no ano de 2007 em uma publicação intitulada “Plano da Bacia do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira”, publicou um índice chamado de IAI (Índice de Agravamento de Inundações) e afirmou que a questão do agravamento das inundações é consequência da impermeabilização do solo e passa a ser mais uma variável, além da qualidade da água e balanço hídrico, a considerar num quadro complexo de conflitos entre a expansão urbana e seus impactos sobre a base de recursos hídricos.

A sua determinação foi baseada na metodologia empregada pelos estudos do Plano Diretor de Drenagem (SUDERHSA, 2001) para a avaliação dos impactos do desenvolvimento urbano sobre as condições de escoamento das cheias, que identifica as modificações no comportamento das cheias devido a dois fatores diferentes: a impermeabilização da bacia trazida com a mudança do uso do solo e, com o aumento da densidade urbana. A diferenciação entre esses efeitos é importante na medida em que permite uma melhor avaliação das diversas consequências da expansão urbana da RMC em longo prazo, objeto do Plano da Bacia.

O indicador do agravamento das inundações é correspondente à variação do volume da chuva efetiva causada pela impermeabilização da bacia. A metodologia utilizada para a quantificação do volume de chuva efetiva no Plano de Drenagem foi a do *Soil Conservation Service*, que calcula o volume *VE* conforme a seguinte equação:

$$VE = (VP - 5080/CN + 50,8)^2 / (VP + 20320/CN - 203,2) \quad (3)$$

Em que:

VE = volume da chuva efetiva (mm);

VP = volume de precipitação (mm);

CN= *Curve Number*, que encerra em si todos os fatores produtores do deflúvio. *CN* varia de acordo com o uso do solo e a tipologia hidrológica do solo, e quanto maior for, maior a chuva efetiva produzida. Os *CNs* de bacias não urbanizadas são em geral menores que os *CNs* de bacias urbanizadas.

O valor do volume de precipitação (*VP*) adotado para o cálculo do indicador de agravamento das inundações foi igual a 96,32 mm, correspondente a uma chuva com tempo de duração de 120 minutos e período de retorno de 25 anos. Para a determinação do *VP* utilizou-se a mesma equação intensidade x duração x frequência para a estação Prado Velho que foi utilizada no Plano de Drenagem (SUDERHSA, 2007).

Para a determinação dos *CNs* de áreas urbanizadas o Plano Diretor estabeleceu a seguinte relação com a taxa de impermeabilização de uma área:

$$CN_{au} = 1/100 (98*AI+(100-AI)*(CNa*A+CNb*B+CNc*C+CNd*D+CNe*E)) \quad (4)$$

Em que:

CN_{au} = *CN* da área urbanizada;

AI = taxa de impermeabilização de uma área (%)

98 = *CN* adotado para uma área totalmente impermeável

CNa, *CNb*, *CNc*, *CNd*, *CNe* = são os *CNs* correspondentes a cada grupo hidrológico de solo para a cobertura ou uso do solo local.

Para a bacia do Alto Iguaçu o Plano Diretor de Drenagem trabalhou com 6 categorias de uso do solo identificadas a partir de imagem de satélite, e da distribuição dos grupos hidrológicos de solo presentes em cada local analisado. Foram identificados 16 tipos hidrológicos de solo, o que resultou em 96 classes de uso do solo combinados com grupos hidrológicos (SUDERHSA, 2007).

Foi utilizado um processo simplificado, onde o *CN* de cada sub-bacia foi determinado a partir da ponderação dos *CNs* médios das áreas classificadas de acordo com as tipologias de uso do solo.

A avaliação da taxa de impermeabilização das áreas urbanas baseou-se também na metodologia do Plano Diretor de Drenagem, que utilizou a seguinte relação, função da densidade populacional das bacias:

- Para $14 \text{ hab/ha} < D < 128 \text{ hab/ha}$: $AI = 0,57 \cdot D^{-8}$
- Para $D > 128 \text{ hab/ha}$ $AI = 65\%$

Finalmente, com base nos parâmetros e funções já descritas anteriormente, foi calculado o indicador de agravamento de inundações, como sendo a variação da chuva efetiva causada pela impermeabilização da bacia em relação a uma situação de referência com *CN* médio no valor de 60, equivalente à cobertura típica de zona rural, sem adensamento urbano, que produziria uma chuva efetiva no valor de 16,83 mm.

Os resultados estão apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Indicador de Agravamento de Inundações para as bacias que integram o município de Curitiba

Nome da Bacia	Dens. Pop Estimada (Censo 2000)	Área Impermeabilizada	Chuva Efetiva	Indicador de Agravamento de Inundações
Barigui	4.856 hab/km ²	20%	61mm	263%
Belém	5.129 hab/km ²	21%	64mm	280%
Atuba-Bacacheri	4.957 hab/km ²	20%	64mm	278%
Iguacu	826 hab/km ²	0%	23mm	38%
Rib. dos Padilhas	4.068 hab/km ²	15%	53mm	213%
Passaúna	356 hab/km ²	0%	21mm	24%

Fonte: Plano da Bacia do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira – SUDERHSA (2007)

2.6 Radar Meteorológico e Dados de Chuva

Radar é a abreviação para "*Radio Detection And Ranging*" e refere-se a técnica do uso de ondas eletromagnéticas para detectar a presença e a distância de um objeto. Trata-se de um sensor ativo que transmite pulsos de energia eletromagnética em intervalos de tempo regulares, concentrados em um feixe de pequena abertura através de uma antena rotativa. Os alvos iluminados pelo feixe do radar podem absorver parte desta energia e irradiá-la em diversas direções. A fração da energia que retorna ao Radar é medida pelo receptor e, conhecendo-se o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do eco, é possível determinar a distância do alvo (RINEHART⁴, 1994 apud MOREIRA, 2005) (Figura 2.12).

⁴ RINEHART, R.E. **Radar for meteorologist**. 2ª Ed. North Dakota, Knight printing Company, 334 p. 1994.

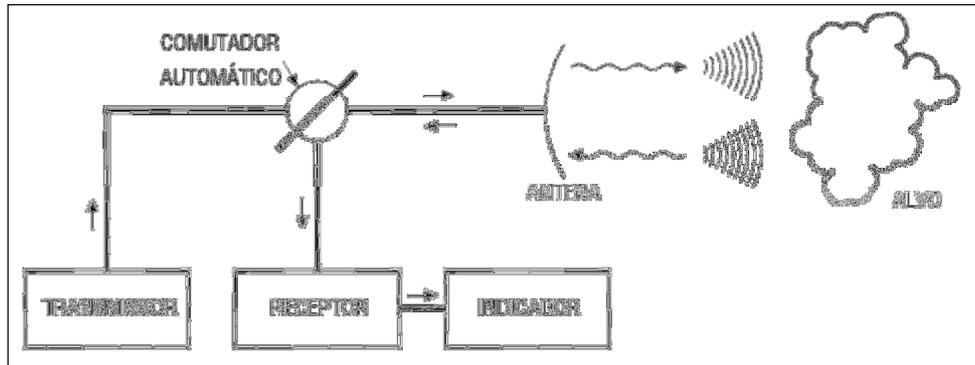


Figura 2.12 Esquema de funcionamento do radar
 Fonte: Calheiros 1982, apud Kaiser, 2006.

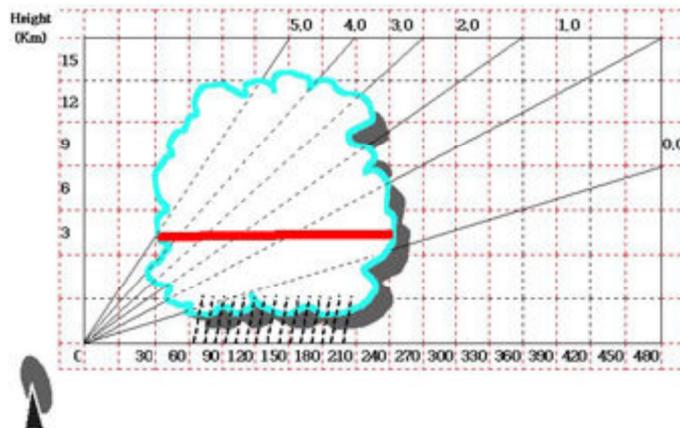
A distância do alvo é determinada pelo intervalo de tempo entre a emissão da onda e o recebimento do eco. A intensidade deste eco é quantificada pela medida da energia que retorna.

As respostas podem ser indicadas no indicador de posição no plano (IPP), que é utilizado para apresentar as varreduras do radar, ou seja, apresenta os sinais recebidos em um sistema de coordenadas polares com elevação fixa, ou em corte, através do indicador de distância e altura (IDA), que serve principalmente para inspecionar a estrutura vertical de uma tempestade. Este produto apresenta o sinal recebido em função da distância e elevação (altura) para azimutes fixos. As figuras 2.13a e 2.13b mostram os dois tipos de resposta.

Os radares como um todo, amostram uma determinada área no espaço. Na operação, a antena gira 360° para cada elevação. A elevação é alterada e repete-se o procedimento.



a)



b)

Figura 2.13 Representação dos resultados das varreduras do radar: a) IPP; b) IDA
Fontes: a) SIMEPAR (2009) b) KMA (2006).

De acordo com Kaiser (2006), é necessário fazer cortes no volume amostrado, fornecendo informações, no plano, sempre à mesma altura, a fim de se obter um padrão de comparação. Estes cortes são indicados em mapas, conhecidos por Indicadores de Posição no Plano a Altitude Constante (IPPAC) ou Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI), que se constituem na justaposição de recortes efetuados sempre à mesma altura nas varreduras do radar. Na figura 2.14 é possível visualizar a composição de um IPPAC.

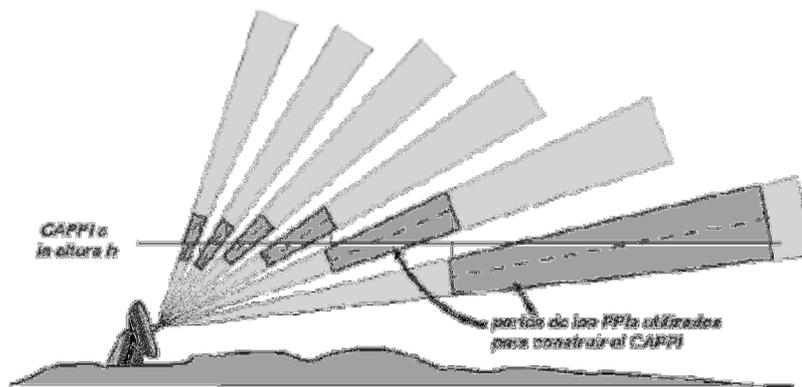


Figura 2.14 Esquema ilustrado da confecção de um IPPAC
 Fontes: Sanches-Diezma & Corral⁵ (2006) apud Kaiser (2006)

A composição das imagens finais para visualização e interpretação do eco do radar é gerada através do uso de softwares específicos.

Como o objetivo final é o conhecimento da precipitação, torna-se necessário converter o fator de refletividade Z , obtido pelo radar em intensidade de chuva (R).

É importante ressaltar que Z e R são grandezas diferentes, apesar de estarem relacionadas ao mesmo fenômeno físico. O fator de refletividade (Z) corresponde à quantidade e tamanho das gotas de água presentes no volume iluminado pelo radar e o R representa um fluxo de chuva que atinge uma área pontual a 1,5 m acima do terreno.

De acordo com Moreira (2005), o radar meteorológico permite a obtenção de medidas provenientes do retorno dos alvos em tempo real com alta resolução espacial. A potência de retorno está relacionada com o espectro de gotas no volume iluminado e é denominado de refletividade. A partir deste espectro, pode-se determinar a taxa de precipitação (mm h^{-1}), o conteúdo de água líquida (g m^{-2}) e o fator de refletividade ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$).

Marshall e Palmer propuseram a primeira equação em 1948, baseada em muitas observações experimentais, que relacionavam as informações obtidas por radar e as medidas em pluviômetros.

Para se estabelecer uma relação entre medidas do radar meteorológico e as medidas de precipitação especificamente, é necessário ter conhecimento da distribuição do tamanho de gotas contidas no volume iluminado pelo radar (MARSHALL e PALMER, 1948). Um

⁵ SANCHEZ-DIEZMA, R. & CORRAL, C. (2006). **Curso de Posgrado em Climatología Aplicada: El radar meteorológico y sus aplicaciones hidrológicas**. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Disponível em < http://www.grahi.upc.es/menu/curs/html_pages/>. Acesso em 13/02/2009.

alvo meteorológico contendo um espectro de tamanho de gotas, distribuídas aleatoriamente dentro do volume iluminado pelo feixe do radar, produz uma refletividade (Z) dada por:

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD = \sum D_i^6 \quad (5)$$

onde:

Z é a refletividade em $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$

$N(D)$ é o número de gotas com diâmetro D

A taxa de precipitação por unidade de tempo (R) é obtida da integração do espectro de gotas por unidade de área, por minuto de tempo dos volumes de cada gota (BATTAN, 1973), dada por:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} N(D)D^3V_t(D)dD \quad (6)$$

onde:

$V_t(D)$ é velocidade terminal das gotas de diâmetro D

Dessa forma, a partir do espectro de gotas e das suas respectivas velocidades terminais pode-se calcular a refletividade e a sua respectiva taxa de precipitação. Marshall e Palmer (1948) obtiveram uma relação de precipitação e a refletividade a partir do espectro de gotas em sistemas de precipitação, dada por:

$$Z = aR^b \quad (7)$$

onde:

Z é a refletividade ($\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$)

R é a taxa de precipitação (mm h^{-1});

a e b = constantes estimadas

Apesar da existência de um grande número de equações que tentam representar a variabilidade da relação $Z \times R$, as instituições que operam radares geralmente empregam apenas uma equação, usualmente a clássica de Marshall-Palmer em suas tarefas rotineiras.

O uso de mais de uma equação exige a adoção de mecanismos que identifiquem o tipo de evento. Os softwares de tratamento de dados de refletividade de radar que contemplam este tipo de análise estão ainda em fase de pesquisa e testes (ATLAS⁶ et al, 1997 e ROSSA⁷ et al, 2005 apud Kaiser 2006).

Conforme Gjertsen et al (2003), por algum tempo os termos ajuste e calibração de radar eram usados indistintamente como sinônimos, mas atualmente existe uma distinção entre eles. Calibração envolve procedimentos aplicados para alcançar um padrão de desempenho que seja repetido. Ajustes são modificações nas quantificações do radar para se adequar a uma quantidade de chuva medida de outra forma.

Desta forma, a calibração envolve a determinação de padrões de operação do radar, assim como a definição de equações de conversão da refletividade em intensidade ou volume de chuva. Os ajustes são métodos desenvolvidos para modificar as leituras feitas pelo radar com o objetivo de aproximar estes resultados aos valores medidos em outros instrumentos, na maioria das vezes em pluviômetros.

Existem três formas clássicas para obter a relação entre Z e R, isto é, para calibrar o radar.

A primeira forma trata-se do disdrômetro. Os valores de refletividade de um radar são relacionados com os valores lidos em um disdrômetro que é um equipamento desenvolvido para se obter amostras estatisticamente representativas das gotas presentes em uma determinada região. Com esse equipamento é possível determinar o espectro das gotas de chuva.

O disdrômetro transforma o momentum mecânico da gota incidente em seu cone sensor em impulso elétrico. A amplitude do pulso elétrico gerado é proporcional ao diâmetro da partícula e sua velocidade de queda, que também depende do diâmetro da gota. Desta forma, a amplitude do pulso é proporcional ao tamanho da gota incidente. O sinal assim obtido deve ser processado e analisado por softwares específicos, que fornecem o espectro das gotas. A partir deste espectro é possível calcular tanto a refletividade equivalente do radar, como a intensidade da chuva (KAISER, 2006).

⁶ ATLAS, D. et al. (1997). Evolution of radar rainfall measurements: steps and mis-steps. In: BRAGA JR., B.; MASSAMBANI, O. (ed.) (1997) Weather radartechnology for water resources management. São Paulo: IRTCUD/USP, IHPUNESCO. Disponível em: <<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/radar/content.html>>. Acesso: 10/01/2009.

⁷ ROSSA, A. et al. **Use of radar observation in hidrological and NWP models** – COST 717 – Final Report. Disponível em <http://www.smhi.se/cost717/doc.html>.

Outra forma de se obter a relação entre Z e R diz respeito ao pluviômetro. As informações de postos pluviométricos ou pluviográficos são comparadas com as informações do radar. Neste caso, o pluviômetro dá uma informação pontual, que será comparada à amostragem volumétrica, oriunda do radar.

Percebe-se que existem problemas neste tipo de análise, pois enquanto o radar amostra um volume de gotículas de proporções consideráveis, o pluviômetro coleta gotas em uma pequena área próxima ao solo. Se o pluviômetro estiver localizado no ponto de precipitação máxima, o radar, comparativamente, fornecerá valores mais baixos. A comparação é mais eficiente para chuvas uniformes.

De acordo com Calheiros (1982), é importante perceber que os dois métodos determinam, de fato, duas relações distintas, pois o que o radar observa não é o que o pluviômetro detecta nem o que o disdrômetro mede. Isso somente ocorreria se o radar iluminasse as mesmas gotas coletadas pelo pluviômetro, e estas correspondessem à amostra analisada pelo disdrômetro, o que não é o caso.

De qualquer forma, mesmo os parâmetros Z e R medirem grandezas diferentes, elas guardam uma ligação física, já que correspondem a parâmetros do mesmo fenômeno.

O método estatístico também é utilizado para obter a relação Z e R. Desenvolvido por Calheiros e Zawadzki leva em consideração o deslocamento da tormenta e usa o conceito de tempestades sintéticas. A tempestade sintética é a descrição da tormenta em termos de variação de intensidade ao longo de uma linha, a linha de direção de deslocamento da tormenta.

Zawadzki⁸ (1975) citado por Calheiros (1982) observou que o erro quadrático médio resultante da comparação entre os dados de radar e as medidas de pluviógrafos era minimizado quando os dados pontuais eram espacializados ao longo da linha de deslocamento da tormenta. O autor assumiu que esta variação também ocorresse nas demais direções. O método fornece a relação Z_h e R, considerando ambas as grandezas aleatórias e busca os eventos Z_h e R com mesma probabilidade de ocorrência, $P(Z_h) = P(R)$.

Utilizando tais métodos, o problema fundamental na estimativa de chuva com radar é determinar o espectro de gotas, pois espectros de gotas diferentes podem produzir a mesma refletividade, porém taxas de precipitações diferentes. Sabe-se que para longos intervalos de integração, as diferenças entre estimativas de chuva acumulada obtidas com

⁸ Zawadzki, I. I. – On radar – raingage comparison. **J. Appl. Meteor.** 14: 1430-1436. 1975.

diferentes relações ZR é pequena em função principalmente à variação temporal do espectro de gotas.

Na bibliografia específica, encontram-se um grande número de relações ZR experimentais. Algumas das principais equações propostas podem ser visualizadas na Tabela 2.8.

É consenso entre os pesquisadores que a variação dos parâmetros *a* e *b* não ocorrem apenas em função do tipo de precipitação, mas também em função da posição geográfica. A variabilidade destes parâmetros é decorrente da variação da distribuição do tamanho de gotas, para cada tipo de precipitação e para cada localidade. Observa-se que *A* aumenta e *b* diminui com o aumento da intensidade do processo convectivo. Os valores mais elevados de *b* nas duas últimas fórmulas refletem a presença de gelo.

Tabela 2.7 – Equações ZxR

Z = aR^b	a	b	Validade
Marshall & Palmer (1948)	200	1,6	Precipitações homogêneas e eventos estratiformes
Blanchard (1953)	31	1,37	Precipitações orográficas
Jones (1956)	486	1,37	Precipitações convectivas
Joss & Waldvogel (1967)	230	1,4	Precipitações médias
Joss & Waldvogel (1967)	400	1,3	Processos convectivos intensos
Joss & Waldvogel (1967)	100	1,4	Processos frontais – gotas muito pequenas
Smith et al. (1975)	155	1,88	Processos convectivos – presença de granizo
Sekhon & Srivastava (1970)	1780	2,21	Neve

Fonte: Pessoa⁹ (1993), Trovati¹⁰ (1988), Austin¹¹ (1987) e Smith et al¹² (1975) apud Kaiser (2006).

⁹ PESSOA, M. L. Hidrometeorologia com radar. In: TUCCI, C.E.M. (org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. Coleção ABRH v. 4. Porto Alegre: Ed. da Universidade/ABRH/EDUSP. 1993, p. 877-896.

¹⁰ TROVATI, L. R. Modelo de comparação entre o fator de refletividade do radar e vazões para estabelecer alertas de cheias. 156p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1988.

¹¹ AUSTIN, P. M. Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. Monthly Weather Review, v. 115, 1987, p. 1053-1071.

¹² SMITH, P. L. et al. (1975). Derivation of an R-Z relationship by computer optimization and its use in measuring daily areal rainfall. In: 16th RADAR METEOROLOGY CONFERENCE. Proceedings..., p. 461-466.

A equação ZR mais comumente encontrada é a de Marshall e Palmer (1948), sendo igualmente conhecida por relação ZR padrão. Neste trabalho será utilizada a relação de Marshall e Palmer, onde $a = 200$ e $b = 1,6$.

De qualquer forma, na literatura fica claro que os pluviômetros e os radares medem água presente na atmosfera, mas em alturas e amostragens volumétricas diferentes. A água medida por estes aparelhos encontram-se em estágios diferentes do processo de precipitação. O pluviômetro mede a água efetivamente precipitada, diferentemente do radar, que mede água potencialmente precipitável. A Figura 2.15 mostra os tipos de amostragem que cada instrumento faz para quantificação de um evento de chuva.

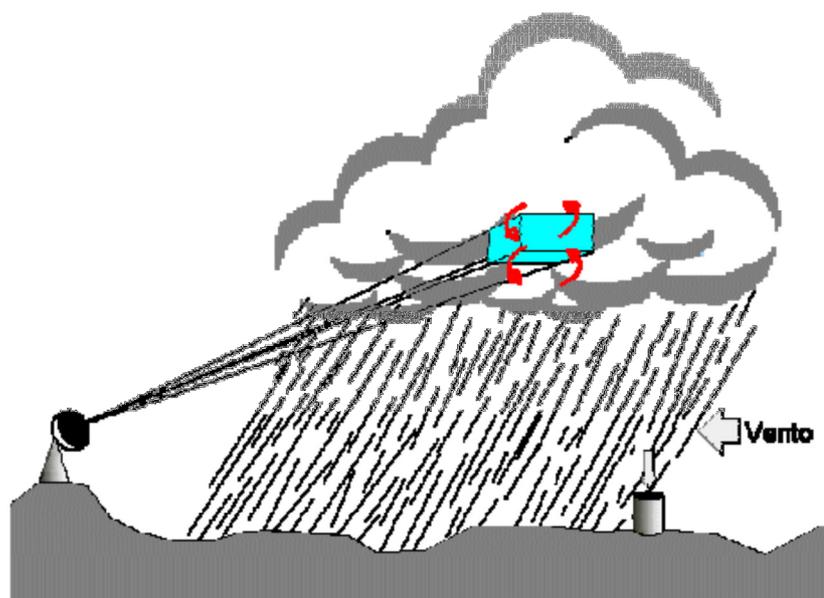


Figura 2.15 Formas de medidas – pluviômetro e radar
Fonte: Kaiser (2006)

Vários estudos foram realizados procurando identificar e quantificar o decréscimo na precisão da relação ZR com a distância ao posto pluviométrico. Tais estudos mostram que a relação ZR em relação à chuva que cai sobre uma determinada área (uma bacia hidrográfica, por exemplo) é tão mais representativa quanto mais pluviômetros ela possuir, ou seja, quanto mais densa for a rede de postos pluviométricos. Além disso, Moreira (2005), afirma que além desse fator, à medida que o local de interesse se afasta do radar, diminui a qualidade das informações para obtenção da chuva, por meio do fator de refletividade. Atualmente, se utiliza coeficientes de correção nas relações ZR, para minimizar essas distorções devido à distância alvo-radar.

Mesmo apresentando incertezas nas medidas, Donzelli & Mezzasalma¹³ (1995) apud Kaiser (2006), afirmam que o radar meteorológico é o único instrumento que fornece informações da localização, da estrutura tridimensional do campo de precipitação e uma avaliação quantitativa com uma resolução comparável com os instrumentos clássicos de medida em superfície. O valor do radar corresponde à média da chuva em um volume atmosférico equivalente a uma célula do radar (*radar cell*). Esta medida está relacionada ao *beamwidth* (largura do feixe) e à distância do ponto ao radar (uma vez que a largura do feixe aumenta com a distância). A média espacial introduz um erro, pois o volume amostrado aumenta com a distância do radar, podendo incluir trechos com informações de precipitação em diferentes fases (sólida e líquida) e mesmo ausência de ecos de chuva. Isso leva a uma subestimativa da chuva por parte do radar e às vezes ausências de registro de chuva, quando está ocorrendo uma chuva fina em baixa altitude. O radar, por sua vez, pode superestimar a chuva na presença de granizo, quando o ar está muito seco e ocorre evaporação no início da precipitação. Além disso, o radar não fornece medidas contínuas no tempo.

Na tentativa de relacionar e comparar as medidas feitas por radar com as medidas de pluviômetros, existe várias técnicas que podem ser utilizadas, propondo fatores de ajuste que são aplicados nos dados de radar “corrigindo-os”. De forma geral, os fatores de ponderação geralmente consideram as distâncias relativas entre os instrumentos de medidas e os tipos de precipitação bem como outros erros sistemáticos conhecidos nas medidas de radar como o perfil vertical de refletividade, ecos de terreno, atenuação, evaporação entre outros (ROSSA et al¹⁴, 2005, SMITH¹⁵, 1990, BRAGA & MASSAMBANI¹⁶, 1997 apud KAISER 2006).

Collier (1986) fez uma análise da chuva horária acumulada em uma rede telemétrica e calibrou os dados de radar por essa rede, para a aplicação em um sistema de previsão de inundação. Para calibrar o radar, foi utilizado um fator de correção baseado na

¹³ DONZELLI, V. & MEZZASALMA, P. Measurement accuracy in rain gauge-radar adjustment techniques. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDROLOGICAL APPLICATIONS OF WEATHER RADAR, 1995, São Paulo. Proceedings... São Paulo, p. 52-61. 1995.

¹⁴ ROSSA, A. et al. (2005) Use of radar observations in hydrological and NWP models. COST 717 – Final Report. Disponível em: <<http://www.smhi.se/cost717/doc.html>>. Acesso: 30/02/2009.

¹⁵ SMITH, P. L. (1990). Precipitation measurement and hydrology: panel report. In: ATLAS, D. (org.). Radar in Meteorology: Battan Memorial and 40th Anniversary Radar Meteorology Conference. Boston: American Meteorological Society, p. 607 – 618.

¹⁶ BRAGA Jr., B.; MASSAMBANI, O. (ed.) (1997). Weather radar technology for water resources management. São Paulo: IRTCUD/USP, IHP-UNESCO. Disponível em: <<http://www.unesco.org/phi/libros/radar/content.html>>. Acesso: 25/02/2009.

proporção entre R (chuva do radar) e G (chuva do posto). O estudo concluiu que, para se obter uma boa precisão na medida da chuva pontual, é necessária uma rede muito densa de postos pluviométricos. Entretanto, se existir uma rede com poucos postos, calibrando os dados de radar meteorológico, é possível obter uma precisão semelhante ou superior.

Hipólito et al (1995) apresentaram o “Sistema de Alerta a Inundação” em tempo real, para a bacia do rio Alenquer, em Lisboa, onde utilizaram, para a previsão de cheias, dados observados e previstos pelo radar meteorológico calibrados pela rede telemétrica, acoplado a um modelo hidrológico de transformação chuva-vazão. Para a calibração da chuva do radar foi empregado um estimador linear, denominado filtro de Kalman, baseado nas medidas do presente e do passado, que procura eliminar erros aleatórios. O modelo de previsão de chuva do radar é baseado em uma técnica de extrapolação linear que compara duas imagens e estima o vetor deslocamento da chuva. Concluíram que apesar da necessidade de melhorias no algoritmo de previsão, os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, o que permitiu a implantação em Portugal da primeira versão operacional do sistema de alerta à inundação baseado nas informações do radar meteorológico.

Hunter (1996) concluiu que, em muitos eventos, os ajustes na taxa de precipitação do radar, utilizando uma rede de 50 postos pluviométricos junto com o filtro de Kalman, ainda produziam valores questionáveis. Entretanto, testes preliminares mostraram melhorias na estimativa da chuva mesmo quando poucos postos foram utilizados. Para a aplicação dessa correção, também é necessário um estudo local sobre os efeitos desse ajuste em diferentes condições meteorológicas.

Barge et al (1979) discutem o uso conjunto de dados de radar e pluviômetro para auxiliar o trabalho de hidrólogos operacionais na previsão e determinação correta de cheias. Compararam os resultados de radar, estimados pela equação de Marshall-Palmer, e pluviômetros em uma bacia hidrográfica no Canadá. Com vinte dias de dados obtiveram um fator de correção médio ($G = P/Ra$) de 1,15 e desvio padrão de 2,95. Ao analisar um evento de 6 dias de duração constataram, porém, valores de G variando de 0,28 a 3. A explicação para estes valores foi a constatação de núcleos convectivos que foram medidos pelo radar e não pelos pluviômetros.

Muitos outros trabalhos em nível internacional foram elaborados propondo ajustes para os dados de radar.

Nos trabalhos de revisão bibliográfica, verificou-se a existência de um grande número de trabalhos, com enfoques distintos, estudando a relação entre as medidas feitas

por radar e pluviômetros. Nota-se a grande efervescência de idéias e muitas controvérsias. Constata-se a necessidade de mais pesquisa para consolidação de um maior número de resultados operacionais.

Nesta mesma linha, trabalhos publicados no Brasil também possuem sua relevância. Calheiros e Antonio (1979) foram os pioneiros a quantificar a precipitação do radar e compará-la com uma rede de postos pluviométricos utilizando dados do radar de Bauru.

Antonio (1984) investigou o comportamento das divergências entre as informações obtidas por radar e por pluviógrafos em função da distância, para três áreas de integração (16, 44 e 120 km²) e para intervalos de tempo variando de 10 minutos até 24 horas. As informações do radar foram convertidas para intensidade através da equação de Marshall-Palmer e das equações propostas por Calheiros (1982). Os resultados apresentados pelo autor indicam que, para grandes distâncias (maiores que 100 km), as correções propostas por Calheiros são significativas, na faixa intermediária as equações são muito semelhantes. Ele sugere que uma discretização maior destas equações pode influir numa melhora dos resultados. Quanto maiores as áreas e os tempos de integração da chuva, menores os valores encontrados da relação P/Ra (mais próximo da unidade).

Calvetti et al (2003) comparou os campos de precipitação na região metropolitana de Curitiba gerados a partir de dados do radar do SIMEPAR e de pluviômetros disponíveis na região, para um evento de grandes proporções que ocasionou inundações. Os autores utilizaram o método ANOBES (análise objetiva estatística) para integrar as informações dos dois instrumentos de medida. Trata-se de um método que corrige as informações do radar através da ponderação das diferenças registradas pontualmente pelos dois instrumentos de medida. Para o radar usaram o CAPPI de 3 km, resolução de 4 km² e a equação de Marshall-Palmer. Foi feito um ajuste para compensar o deslocamento da tormenta entre as varreduras do radar. Os autores concluíram que o radar e a rede pluviométrica geraram informações coerentes, observaram que as correções feitas pelo método ANOBES ficaram restritas a áreas que envolvem os pluviômetros e sugerem um adensamento de rede pluviométrica para melhorar as estimativas do campo de precipitação.

Gonçalves (2005) estudou a calibração do radar meteorológico através de uma rede de pluviógrafos para a quantificação da chuva do radar em superfície e a sua aplicação em um modelo hidrológico, sendo a área de aplicação do estudo a bacia do rio Cabuçu de Baixo (Região Metropolitana de São Paulo). Para melhorar a estimativa de precipitação por radar, foi realizada a calibração dos dados de radar através de uma rede de

pluviômetros utilizando para esta calibração a técnica de Brandes, onde os dados de radar são calibrados com as observações dos pluviômetros para determinar um fator de multiplicação para cada quadrícula do radar, estes fatores são calculados para adequar a precipitação observada pelo radar meteorológico com a chuva medida nos postos pluviométricos (BRANDES 1975). Os resultados do modelo mais próximos da realidade foram encontrados após os dados de radar terem sido calibrados.

De forma geral, pode-se dizer que existem alguns pontos de extrema importância que devem ser considerados quando da aplicação ou estudos com dados de radar e pluviômetros como, por exemplo:

- As particularidades dos instrumentos de medida (pluviômetros e radar) são responsáveis por grandes diferenças entre os resultados;
- São vários os métodos para espacializar a chuva medida em pluviômetros bem como muitas técnicas para ajustar os dados de radar;
- Constatam-se dificuldades quando da proposição de um método de combinação de dados de radar e pluviômetros que considere o tipo de precipitação e adote estratégias diferentes de ajuste;
- Publicações recentes recomendam o uso conjunto de pluviômetros e de radar para composição dos campos de precipitação.

Os dados do radar meteorológico utilizados neste trabalho são provenientes do radar operado pelo SIMEPAR e foram integrados com as informações de satélites (descritas no item 2.7) e com dados provenientes de pluviômetros, também do SIMEPAR.

2.7 O Satélite Meteorológico GOES 12

A NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) é responsável pela operação dos satélites GOES e POES, conduz pesquisas e coleta dados sobre os oceanos, atmosfera, espaço, e sol. Aplica este conhecimento à ciência e a serviços os quais afetam as vidas de todos. A NOAA informa sobre condições climáticas extremas, monitora oceanos e espaço aéreo, bem como fornece informações para a proteção e utilização de oceanos e áreas litorâneas, além de conduzir pesquisas para melhorar o entendimento sobre o meio ambiente.

O GOES 12 (Geoestacionary Operational Environmental Satelites) é um satélite geoestacionário mantido pela NOAA e suas informações são distribuídas pelo National Environmental Satellite and Information Service (NESDIS). Está localizado no plano do Equador a 75° W de Longitude e a cerca de 35.800 km acima da superfície, com velocidade de giro orbital igual à velocidade de rotação da Terra. Isto permite que os satélites permaneçam continuamente sobre uma mesma posição da superfície. A Tabela 2.9 ilustra as séries dos satélites GOES e respectivas datas de lançamentos. A Tabela 2.10 contém as características técnicas dos satélites GOES.

Tabela 2.9 – Série de satélites GOES

Anterior ao Lançamento	Posterior ao Lançamento	Data de Lançamento	Operação
GOES-I	GOES-8	13 de Abril de 1994	Descontinuado
GOES-J	GOES-9	23 de Maio de 1995	Descontinuado
GOES-K	GOES-10	25 de Abril de 1997	Operacional (GOES América do Sul)
GOES-L	GOES-11	03 de Maio de 2000	Operacional (GOES Oeste)
GOES-M	GOES-12	23 de Julho de 2001	Operacional (GOES Leste)
GOES-N	GOES-13	24 de Maio de 2006	Stand By
GOES-O	GOES-14	27 de Junho de 2009	Stand By
GOES-P	GOES-15	<i>indefinida</i>	-----

Fonte: <http://www.oso.noaa.gov/goes/>

Tabela 2.10 – Características dos satélites GOES

Descrição	Características
Corpo Principal	2,0 x 2,1 x 2,3 metros
Painel Solar	4,8 x 2,7 metros
Peso (lançamento)	2.105 kg
Veículo de Lançamento	Atlas I,
Informações de Órbitas	Tipo: geosíncrona Altitude: 35.786 km Período: 1,436 minutos Inclinação: 0,41 graus
Sensores	Imager Sounder Espaço Environment Monitor (SEM) Data Collection System (DCS) Search and Rescue (SAR) Transponder

Fonte: <http://www.oso.noaa.gov/goes/>

O satélite GOES 12 fornece imagens em cinco canais espectrais uma no visível e quatro no infravermelho (Tabela 2.11).

Os sensores de infravermelho medem a energia que é emitida pela superfície terrestre e pela atmosfera e depende da temperatura. A temperatura de

brilho é obtida a partir da radiância, considerando a emissividade igual a do corpo negro. Quanto mais alta a temperatura, mais brilhante é a cena. No entanto, por convenção, as imagens são mostradas de forma invertida, ou seja, quanto mais baixa a temperatura, mais brilhante é a cena (HENDERSON-SELLERS, 1984).

Tabela 2.11 – Características do sensor imageador do GOES 12

Banda	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (Km)	Amplitude de Temperatura	Aplicação
1 (Visível)	0.55 a 0.75	1	1.6 a 100% albedo	Cobertura de nuvens
2 (Onda Curta)	3.80 a 4.00	4	4 a 335 K	Cobertura de Nuvens (noturno)
3 (Umidade)	6.50 a 7.00	8	4 a 320 K	Vapor de água
4 (I. V. 1)	10.20 a 11.20	4	4 a 320 K	Temperatura de oceanos, Vapor de água
5 (I. V. 2)	11.50 a 12.50	4	4 a 320 K	Temperatura de oceanos, Vapor de água

Fonte: <http://www.oso.noaa.gov/goes/>

Os Canais 4 e 5 captam a energia emitida pelo planeta nas chamadas “janelas atmosféricas¹⁷”. O canal 4 (11 μm) detecta a radiação proveniente das nuvens e da superfície terrestre, com pouca interferência da atmosfera. O canal 5 tem as mesmas características, porém detecta uma contribuição do vapor de água na baixa troposfera. Outra contribuição importante é obtida pelo canal 3 centrado na faixa de 6,7 μm . A maior parte da radiação recebida pelo sensor nessa faixa é proveniente de temperaturas muito frias, uma vez que o vapor de água é um absorvedor muito ativo naquela porção do espectro e, assim, qualquer radiação que alcança o sensor vem da emissão desse componente, que é muito alta na atmosfera

A radiação solar em comprimentos de ondas curtas, que é refletida pelo sistema terra-atmosfera, é detectada pelo canal visível. O brilho das imagens nesse canal está correlacionado com a espessura das nuvens e pode ser afetado pela posição angular da nuvem em relação ao sensor e ao sol. A reflectância no canal 1 está compreendida no

¹⁷ Existem regiões do espectro eletromagnético onde a atmosfera quase não afeta a energia eletromagnética, isto é, a atmosfera é transparente à energia eletromagnética proveniente do Sol ou da superfície terrestre. Estas regiões são conhecidas como janelas atmosféricas. Nestas regiões são colocados os detectores de energia eletromagnética, e portanto onde é realizado o sensoriamento remoto dos objetos terrestres (MORAES 2001).

intervalo entre 0 e 0,7 (70%), e segundo Ba & Gruber¹⁸ (2001) reflectância acima de 0,4 (40%) pode ser indicativo de condições de precipitações, após ser corrigida a refletividade pelo cosseno do ângulo zenital solar. Conforme Barret & Martin¹⁹ (1981) apud Avila (2006), quanto maior a espessura da nuvem, maior a chance de produzir chuva. As propriedades físicas e óticas das nuvens, como a refletividade e a emissividade, condicionam o tipo de onda da radiação medida pelo satélite.

A principal fonte de energia do sistema terra-atmosfera é a radiação eletromagnética proveniente do sol. O espectro de emissão solar comporta-se como o de um corpo negro que emite a 5780K, tendo, aproximadamente, 8,5% na faixa do ultravioleta (< 0,4µm), 46,5% da radiação concentrada na faixa espectral do visível (0,4 – 0,7 µm), 43% na faixa do infravermelho próximo e cerca de 2% na faixa do infravermelho médio e distante. O sistema terra/atmosfera, por outro lado, comporta-se como um corpo negro que emite a 250K e possui sua energia concentrada no espectro infravermelho termal, com pico em aproximadamente 10µm (RAO²⁰ et al, 1990 apud AVILA, 2006).

Assim, a dependência entre a energia radiante e o comprimento de onda é dada pela lei de Plack:

$$B\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \quad (8)$$

em que :

h= constante de Planck ($6,6256 \cdot 10^{-34}$ W. s²),

c= velocidade da luz ($3 \cdot 10^8$ m/s),

k= constante de Boltzman ($1,38054 \cdot 10^{-23}$ W.s/K),

λ= comprimento de onda (m)

T = temperatura absoluta (K).

A atmosfera é praticamente transparente à radiação solar e opaca à radiação terrestre, exceto na região das janelas atmosféricas que são utilizadas para o sensoriamento

¹⁸ BA, M. B. E GRUBER, A. **GOES multispectral rainfall algorithm (GMSRA)**. J. Appl. Meteorol., v. 40, n. 8, p. 1500-1514, 2001.

¹⁹ BARRET, E. C.; MARTIN, D.W. **The use of satellite data in rainfall monitoring**. London and New York: Academic Press, 1981.

²⁰ RAO, P. K.; HOLMES S. J.; ANDERSON R. K.; WINSTON J. S.; LEHR P. E. **Weather Satellites: Systems, data, and environmental applications**. Am. Meteor. Soc. Boston, 1990.

remoto por satélites, na detecção de nuvens. As janelas atmosféricas que mais têm sido empregadas na detecção de nuvens estão nos intervalos aproximados: 0,5 – 1,3 μ m, 1,6 – 1,7 μ m, 2,1 – 2,3 μ m, 3,5 – 4,0 μ m e 8,0 - 13 μ m, com respostas espectrais dos satélites mais estreitas que essas bandas para se evitar as regiões de absorção molecular pelos gases atmosféricos (RAO, *et al* 1990 apud AVILA, 2006).

Do ponto de vista das dificuldades em estimar a precipitação utilizando imagens de satélite, as mesmas concentram-se em encontrar uma relação entre a espessura ótica e/ou a temperatura de topo de nuvem e a precipitação. Adler & Negri (1988) demonstraram que precipitações intensas sempre estão associadas com topos frios de nuvens, mas que o contrário não é verdadeiro. Segundo Guillot (1995), há uma defasagem entre o máximo de precipitação e o máximo de desenvolvimento da nuvem, tanto no canal visível quanto no infravermelho. A precipitação máxima ocorre quando a convecção atinge a fase final de seu desenvolvimento (ANTÔNIO, 1998). Mesmo com a convecção menos ativa a nuvem ainda continua a crescer havendo certa defasagem antes de atingir seu desenvolvimento máximo.

Por apresentarem valores de temperatura próximos dos valores encontrados na superfície da Terra, as nuvens mais baixas como os stratus são difíceis de serem identificadas na faixa espectral do infravermelho. Em imagens na faixa espectral do visível, essas nuvens são brilhantes, contrastando com a superfície mais escura da Terra ou da água. Entretanto as nuvens do tipo cirrus são as mais problemáticas em métodos de estimativa de precipitação por satélite. Esse tipo de nuvem é praticamente transparente no canal visível, mas por ser fria e opaca nas bandas do infravermelho é mais facilmente identificável (RAO *et al*, 1990 apud AVILA, 2006).

Diversos métodos desenvolvidos para estimativa de precipitação baseiam-se no fato de que, quanto mais fria e brilhante a nuvem for, maior a possibilidade de produzir chuva. No entanto, quando são utilizadas apenas informações do canal infravermelho, nuvens do tipo cirrus podem levar a superestimativas de precipitação, sendo identificadas como precipitáveis quando não são. Neste sentido, métodos desenvolvidos por Adler & Negri (1988), possibilitam identificar esse tipo de nuvem excluindo-as das análises.

Para identificar nuvens do tipo cirrus, Ba & Gruber (2001) utilizaram a metodologia desenvolvida por Adler & Negri (1988). Este método procura determinar a declividade e o gradiente da temperatura mínima local levando em consideração os pixels vizinhos. Nuvens convectivas geralmente estão associadas a um gradiente maior e nuvens

cirrus a um pequeno gradiente. Também é utilizada a diferença entre os canais do infravermelho e do vapor d'água como indicativo de nuvens cirrus para condição de temperatura de brilho inferior a 220K no infravermelho (AVILA, 2006).

As imagens utilizadas para extração de estimativas de precipitação e conseqüente integração com os dados do radar meteorológico e pluviômetros e que serviram de base neste trabalho, foram capturadas pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR, que em 1999 instalou o Sistema de Recepção de Imagens, formado por componentes fornecidos pelas empresas Global Imaging (USA) e Systems West (USA). O Sistema foi concebido para capturar imagens geradas por satélites de órbita geostacionária e de órbita polar. Atualmente o sistema foi totalmente atualizado com componentes apenas da Global Imaging (USA).

2.8 Regressão Logística

A modelagem preditiva utilizando modelos estatísticos é de suma importância para análises de situações futuras. De acordo com Warren (1990) a predição tem um papel importante no método científico, pois quando um cientista descobre um padrão num conjunto de observações e consegue desenvolver uma hipótese, útil para explicar esse padrão, ela tem implicações preditivas para as observações futuras. As implicações podem ser testadas com dados novos ou independentes e se os dados novos estiverem de acordo com as predições, esse teste dará subsídio para a validação da hipótese. No método científico a predição é um mecanismo para testar as explicações.

A regressão logística assim como as regressões lineares e múltiplas, estuda a relação entre uma variável resposta e uma ou mais variáveis independentes. A diferença entre estas técnicas de regressão se deve ao fato de que na regressão logística as variáveis dependentes estão dispostas em categorias, enquanto na regressão linear estas variáveis são dados contínuos ou discretos. Outra diferença é que na regressão logística a resposta é expressa por meio de uma probabilidade de ocorrência, enquanto que na regressão linear obtêm-se um valor numérico (PENHA, 2002).

Segundo Montgomery e Runger (2003), a Análise de Regressão é uma técnica utilizada para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. Um dos objetivos da análise de regressão é prever os valores de uma variável resposta (ou

dependente) em função de variáveis independentes (ou explicativas), denominadas regressoras.

Na regressão logística, a variável de interesse (resposta) é dicotômica ou binária. Uma variável binária é aquela que aceita apenas dois tipos de respostas, como por exemplo, sim ou não, alto ou baixo, bom ou ruim. Na previsão, por meio da regressão logística, a decisão pela classificação em uma das duas categorias dependerá de uma série de atributos relacionados às variáveis independentes. Geralmente atribui-se o código um ao resultado mais importante da resposta que representaria a presença de uma particular característica de interesse, denominado sucesso, e zero ao evento complementar, denominado fracasso (FARHAT, 2003).

De acordo com o mesmo autor, a regressão logística é utilizada quando se deseja verificar a relação de uma variável resposta dicotômica com uma ou mais variáveis explicativas as quais podem ser tanto qualitativas como quantitativas. Mesmo quando a resposta não for originalmente binária, se for de interesse a aplicação de uma regressão logística, a variável resposta pode ser dicotomizada.

Tornando-se mais popular a partir da década de 70, os métodos empregados na regressão logística seguem os mesmos princípios gerais utilizados na regressão linear, apesar de apresentar respostas e suposições de modelos diferentes.

De forma sucinta, pode-se dizer que existem três procedimentos distintos para manipular dados binários, ordinais e nominais em regressão logística. A escolha de qual método utilizar depende do número de categorias e das características da variável resposta, como ilustra a Tabela 2.12

Tabela 2.12 – Tipos de variável resposta

Tipo	Número de Categorias	Característica
Binária	2	Dois Níveis
Ordinal	3 ou +	Ordenação natural de níveis
Nominal	3 ou +	Sem ordenação natural de níveis

Para estimativa dos parâmetros de um modelo de regressão logística é utilizado o método de máxima verossimilhança. Este método, assim como o método de mínimos quadrados, permite a estimação de parâmetros de modelos e a realização de testes de

hipóteses relativos a restrições lineares e não lineares. As estimações de máxima verossimilhança destes parâmetros são obtidas por métodos iterativos (ROSA, 2000).

Devido a variável resposta na regressão logística ser dicotômica, os resíduos não têm distribuição Normal, nem variância constante. Tem-se ainda que os resultados inferenciais da regressão logística são assintóticos, enquanto na regressão normal linear esses resultados são exatos (FARHAT, 2003).

O modelo logístico permite ajustar os dados do problema a um modelo, o que torna mais fácil sua análise. Entre as variáveis independentes pode haver fatores e/ou covariantes. Estes fatores poderão ser cruzados ou aninhados, e as covariantes poderão ser cruzadas entre elas ou com os fatores, ou aninhadas dentro dos fatores. Em linhas gerais entende-se que as covariantes são representadas por dados contínuos, enquanto os fatores são dados categóricos.

Hair et al (2005) apontam alguns motivos para se optar pela regressão logística: não é necessário supor normalidade multivariada das variáveis discriminantes e também não é necessário que as matrizes de variância-covariância sejam iguais; sendo assim uma técnica mais genérica e mais robusta, pois sua aplicação é apropriada no caso de grande variedade de situações.

Segundo Hair (op cit), a regressão logística, mesmo que tenha uma única variável estatística composta de coeficientes estimados para cada variável independente – como na regressão múltipla – é estimada de uma maneira inteiramente diferente. A regressão múltipla emprega o método de mínimos quadrados, o qual minimiza a soma das diferenças quadradas entre os valores reais e os previstos para a variável dependente. A natureza não linear da transformação logística demanda que um outro procedimento, o de máxima verossimilhança seja usado de forma iterativa para encontrar as estimativas “mais prováveis” para os coeficientes. Isso resulta no valor de verossimilhança no lugar de quadrados quando se calcula a medida de ajuste geral do modelo

Uma das vantagens da regressão logística é que é preciso saber apenas se um evento (ocorrência de alagamento ou não) ocorreu para então usar um valor dicotômico como variável dependente. A partir desse valor dicotômico, o procedimento prevê sua estimativa da probabilidade de que o evento ocorrerá ou não. Assim cada elemento é classificado de acordo com a maior probabilidade prevista de pertencer a um grupo.

O procedimento que calcula o coeficiente logístico compara a probabilidade de um evento ocorrer com a probabilidade de ele não ocorrer. Essa razão de desigualdade pode ser expressa como:

$$\frac{\text{Prob}(\text{evento ocorrer})}{\text{Prob}(\text{evento não ocorrer})} = e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p} \quad (9)$$

Os coeficientes estimados $(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_p)$ são medidas de variações na proporção das probabilidades, chamada de razão de desigualdade. Além disso, eles são expressos em logaritmos, precisando, portanto, ser transformados de volta de forma que seu efeito sobre as probabilidades seja avaliado mais facilmente.

Na regressão logística, a probabilidade de ocorrência de um evento pode ser estimada diretamente. No caso da variável dependente Y assumir apenas dois possíveis estados (1: se o elemento pertence ao grupo 1 ou 0: caso contrário) e haver um conjunto de p variáveis independentes X_1, X_2, \dots, X_p o modelo de regressão logística pode ser registrado da seguinte forma:

$$P(Y = 1) = \frac{e^{g(x)}}{1 + e^{g(x)}} \quad (10)$$

$$\text{Em que } g(X) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p$$

Os coeficientes $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_p$ são estimados a partir do conjunto de dados, pelo método da máxima verossimilhança. Esse método encontra uma combinação de coeficientes, a qual maximiza a probabilidade de a amostra ter sido observada (HOSMER e LEMESHOW, 2000). Considerando certa combinação de coeficientes $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_p$ e variando os valores de X , observa-se que a curva logística possui comportamento probabilístico no formato da letra S, o que é característica da regressão logística, representada na Figura 2.16.

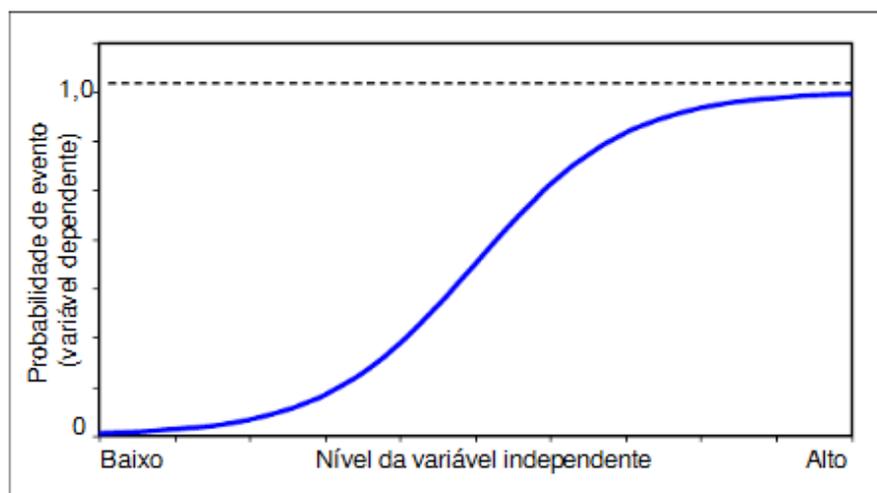


Figura 2.16 Forma da relação logística entre variáveis dependente e independente

Assim, para se estimar diretamente a probabilidade de ocorrência de um evento, pode-se estimar a probabilidade de não-ocorrência por diferença:

$$P(Y = 0) = 1 - P(Y = 1) \quad (11)$$

Sendo assim, ao se utilizar a regressão logística, a principal suposição é de que o logaritmo da razão entre as probabilidades de ocorrência e não-ocorrência do evento é linear.

Na equação da regressão logística, o “ $g(X)$ ” é a função de ligação. A função de ligação garante que a resposta seja expressa como uma probabilidade, pois esta função trabalha em um intervalo entre 0 e 1. Existem basicamente três tipos de função de ligação: logit, probit (ou normit), e gompit. Estas funções são os inversos das funções de distribuição logística, normal, e Gompertz respectivamente, como mostra a Tabela 2.13.

Tabela 2.13 – Funções de ligação

Nome da Função de Ligação	Função de Ligação	Distribuição	Função de Distribuição
Logit	$g(P_i) = \ln(P_i / (1 - P_i))$	Logística	$g(y_i) = 1 / (1 + e^{-y_i})$
Normit (probit)	$g(P_i) = \phi^{-1}(P_i)$	Normal	$g(y_i) = \phi(y_i)$
Gompit	$g(P_i) = \ln(-\ln(1 - P_i))$	Gompertz	$g(y_i) = 1 - e^{-e^{y_i}}$

A escolha de qual tipo de distribuição trabalhar depende dos dados do problema. A função escolhida pode ser a que melhor se ajusta aos dados, ou uma função que esteja

sendo utilizada por razões históricas ou que tenham um significado especial No problema. Em diversos softwares estatísticos é possível escolher a distribuição que melhor se ajusta aos dados fazendo uma comparação com base em testes estatísticos como Pearson, Hosmer-Lemeshow, e pelos valores do qui-quadrado e *P-value*. No entanto a função Logit possui como vantagem estimar os valores das *odds ratios*, e por isso é muito utilizada.

A *odds ratio* ou razão de chances permite conhecer quais chances um evento tem para acontecer se, sob as mesmas condições ele não acontecer. Ou seja, razão de chances é uma medida de associação e expressa a aproximação do quanto é mais provável (ou improvável) para o resultado estar presente entre aqueles com $x=1$ do que entre aqueles com $x=0$. Por exemplo, se y denota a presença ou ausência de uma determinada espécie e x denota se a área tem ou não floresta, o *Odds* = 2 indica que a presença daquela espécie é duas vezes mais esperada em áreas com floresta do que em áreas sem floresta. Ou seja, a presença de floresta é muito importante para aumentar a chance de ocorrência daquela espécie.

Outro exemplo que talvez possa ser mais intuitivo, seria a razão de chances de ser atropelada toda vez que se atravessa uma avenida. Mesmo que uma pessoa atravesse a avenida e não seja atropelado, existia uma chance deste evento ocorrer. Essa chance é a “razão de chances” ou “*odds ratio*”. A razão de chances de resposta é dada por $p/(1-p)$ onde p é a probabilidade de resposta, e a razão de chances é o fator multiplicativo de mudança de estado de y quando a variável independente aumenta uma unidade. O livro de Hosmer & Lemeshow (1989) contém maiores explicações sobre a interpretação e forma de cálculo das razões de chance e de seus intervalos de confiança.

Para se utilizar regressão logística binária, deve-se escolher a referência do evento. Como foi dito anteriormente a resposta será a probabilidade de ocorrência de uma das duas alternativas possíveis e, para que isto ocorra é necessário definir uma delas como referência do evento.

Uma vez definido o modelo é necessário testar a sua validade. Em regressão logística há uma série de gráficos, testes de ajuste, e outras medidas para assegurar a validade do modelo. Estas estatísticas permitem identificar as variáveis que não se ajustam bem, ou que têm forte influência sobre a estimação dos parâmetros. Para isso podem ser utilizadas as estatísticas apresentadas a seguir.

Estatística de Likelihood-ratio

De acordo com Venticinque et al (2007), uma das formas mais comuns de se avaliar o modelo como um todo é por meio da estatística de *Likelihood-Ratio* (LR). Esta estatística testa a hipótese de que todos os coeficientes, menos a constante, são iguais a 0. A significância da estatística de *Likelihood-Ratio* é testada utilizando a distribuição de X^2 com os graus de liberdade iguais ao número de variáveis independentes no modelo, não incluindo a constante.

O teste de *Likelihood-Ratio*, ou teste G, é calculado utilizando o valor da estatística de log likelihood do modelo saturado e do insaturado. Tipicamente, o modelo saturado contém o conjunto de variáveis analisadas e o modelo insaturado omite um subconjunto selecionado, embora outras restrições sejam possíveis. A estatística do teste é duas vezes a diferença do *Likelihood-Ratio* do modelo saturado para o insaturado e é testada com a distribuição de X^2 , sendo o grau de liberdade igual ao número de restrições impostas. Se um modelo contém uma constante, pode-se calcular um teste de *Likelihood-Ratio* da hipótese nula em que todos os coeficientes, exceto a constante, são iguais a 0. A fórmula da estatística G usada para testar o modelo é a seguinte:

$$G = 2*[LL(N) - LL(0)] \quad (12)$$

Onde:

LL(N) = log *Likelihood-Ratio* do modelo saturado (todas as variáveis inclusas)

LL(0) = log *Likelihood-Ratio* do modelo insaturado (somente a constante inclusa)

Quando é feita a subtração, verifica-se simplesmente o quanto as variáveis estão causando mudanças nas probabilidades de ocorrência de um evento e se essas mudanças são maiores que esperadas ao acaso (VENTICINQUE et al, 2007).

Rho² de McFadden

De acordo com Hensher & Johnson²¹ (1981) apud Venticinque et al (2007) o Rho² de McFadden é uma transformação da estatística de LR para imitar um R² da regressão linear. Seus valores estão sempre entre 0 e 1 e, quanto mais alto, melhor é o ajuste do modelo aos resultados. Entretanto, o Rho² de McFadden tende a ser muito mais baixo que

²¹ HENSHER, D. W. & JOHNSON, L. W. **Applied discrete choice modeling**. Croom Helm, London, 1981.

R^2 , porém, baixos valores não implicam, necessariamente, num ajuste pobre. Valores entre 0,2 e 0,4 são considerados satisfatórios.

P-value.

É a probabilidade de obter um valor da estatística amostral de teste no mínimo tão extremo como o que resulta dos dados amostrais, na suposição de a hipótese nula ser verdadeira (Triola, 1998). Quando o valor P for no máximo igual ao nível de significância α , a hipótese nula será rejeitada; quando o valor P for maior que o valor α a hipótese nula não é rejeitada. O valor do nível de significância α comumente utilizado é 0,05.

Pearson

Mede quão bem a observação é prevista pelo modelo. Observações que não se ajustam bem ao modelo têm um alto valor de Pearson. Em regressão linear determina o coeficiente de correlação linear, r , que mede o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados em uma amostra (Triola, 1998).

Hosmer-Lemeshow

Este teste avalia o modelo ajustado comparando as frequências observadas e as esperadas. O teste associa os dados as suas probabilidades estimadas da mais baixa a mais alta. Então faz um teste qui-quadrado para determinar se as frequências observadas estão próximas das frequências esperadas (Hosmer & Lemeshow, 1989).

Neste trabalho a regressão logística foi utilizada na geração da previsão probabilística de alagamentos.

2.9 Redes Neurais Artificiais

O funcionamento do cérebro humano sempre foi motivo de muitas pesquisas e exaustivos trabalhos que se estendem aos longos dos anos. Cientistas procuram desvendar o mistério que leva ser humano a ter diversos sentidos como: controle motor, reconhecimento de padrões e percepção. Pensando nisso, matemáticos, neurofisiologistas e cientistas de diversas áreas contribuíram para o desenvolvimento de novas formas de

aplicação de redes neurais artificiais na sociedade atual, desenvolvendo fórmulas matemáticas que simulam a fisiologia natural do neurônio.

As redes neurais são provavelmente a mais antiga técnica de inteligência artificial (IA) em uso. Este instrumento foi desenvolvido na década de 40 por Walter Pitts e McCulloch, o primeiro matemático e o segundo neurofisiologista, tendo como idéia principal elaborar uma analogia entre neurônios biológicos (Figura 2.16) e circuitos eletrônicos, capazes de simular conexões pelo uso de resistores variáveis e amplificadores (LUDWIG JR & MONTGOMERY, 2007).

Neste mesmo sentido, Haykin (2001) e Freeman & Skapura (1991), expõem que as redes neurais artificiais são fruto da tentativa de representar matematicamente o funcionamento do cérebro, que possui uma estrutura complexa, não linear e paralela

Para ilustração, Haykin (2001), utiliza como exemplo o reconhecimento de faces, a partir de um estímulo visual. Assim que o estímulo visual é pré-processado o cérebro efetua em aproximadamente 100 a 200 ms a tarefa de classificação da face, que pode, por exemplo, reconhecer uma face familiar em um cenário totalmente não familiar.

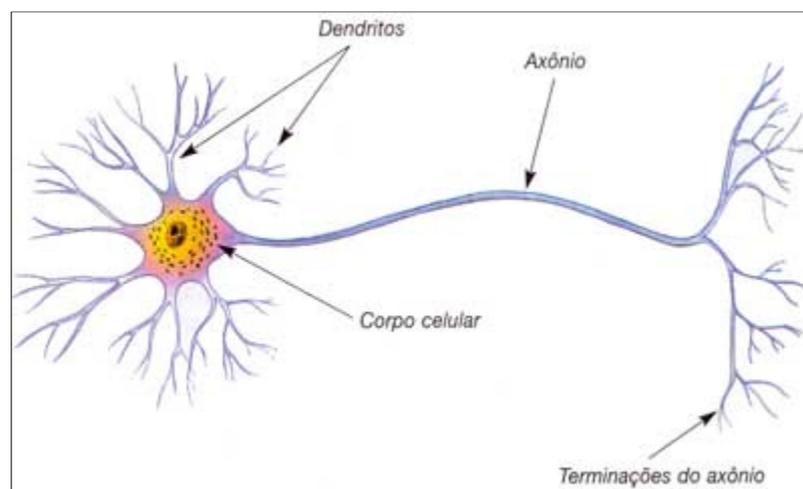


Figura 2.16 Neurônio biológico

Uma rede neural artificial é composta de neurônios artificiais, que são criados e interligados a fim de efetuar uma tarefa em particular executada pelo cérebro. Desta forma existem duas características comuns ao funcionamento do cérebro de acordo com Haykin:

Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Ela se assemelha ao cérebro em dois aspectos:

1. O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente através de um processo de aprendizagem;
2. Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido. (HAYKIN 2001, p. 28)

Ainda de acordo com o mesmo autor, o processo pelo qual o conhecimento é processado é conhecido como algoritmo de aprendizagem. Este algoritmo faz as mudanças de pesos das ligações sinápticas de um neurônio com o outro na estrutura da rede neural artificial. Desta forma também é possível que a própria rede altere sua topologia, o que é motivado pelo fato que neurônios reais também morrem e novas conexões sinápticas crescem.

Um dos benefícios das redes neurais é que a representação de um universo não-estacionário (onde as estatísticas mudam com o tempo), ou seja, a rede pode ser projetada para modificar seus pesos sinápticos em tempo real. Também se deve considerar que uma rede neural implementada na forma física (hardware), tendo potencial de ser tolerante a falhas, devido a natureza distribuída com que as informações são armazenadas na rede. Neste sentido, se um neurônio ou suas conexões fossem danificadas, haveria perda de qualidade, porém a resposta global da rede, provavelmente, não se degradaria seriamente (LUDWIG JR & MONTGOMERY, 2007). Ainda, as RNAs apresentam como vantagens as características de adaptabilidade, generalização e tolerância a ruídos. Estas características são extremamente importantes quando aplicadas a problemas geográficos, dada a natureza complexa e ruidosa dos mesmos.

Ludwig Jr. & Montgomery (2007), comentam ainda que uma desvantagem das redes neurais é fato delas, normalmente, serem uma “caixa preta”, ou seja, torna-se impossível saber por que uma rede chegou a um resultado ou, no caso de uma rede de múltiplas camadas, saber qual a relevância de um peso sináptico para um determinado resultado ou qual o significado físico de um peso sináptico. A análise do erro médio quadrático apresentado ao se introduzir os dados para validação torna-se o critério para conhecer se a rede funciona corretamente.

Kohonen (2001) propõe a divisão das redes neurais em três categorias: redes de transferência de sinal, redes de transferência de estado e redes competitivas.

Nas **redes de transferência de sinais** a saída da rede dependerá, única e exclusivamente, do valor de entrada. Estas redes são usadas para transformação de sinais. São exemplos deste tipo de rede aquelas “alimentadas adiante”, como os Perceptrons de

Múltiplas Camadas - Multi-Layer Perceptron (MLP) (RUMELHART et al., 1986) e as redes de função de base radial - Radial Basis Function (RBF) (BISHOP, 1995). Essas redes são usadas como identificadores e classificadores de padrões, controle, avaliação de dados de entrada, etc.

As **redes de transferência de estado** têm como base os efeitos de relaxação. A retroalimentação e a não-linearidade são tal que garantem que o estado de atividade rapidamente convirja para um de seus valores estáveis. Os valores de entrada acionam o estado inicial de atividade, a rede então inicia o processamento até chegar no estado final. São exemplos deste tipo de rede, as redes de Hopfield (FAUSETT, 1994) e a máquina de Boltzman (HAYKIN, 2001). As principais aplicações destas redes são: como função de memória associativa e em problemas de otimização, embora também sejam usadas no reconhecimento de padrões.

As **redes de aprendizagem competitiva** estão baseadas no processo competitivo de aprendizagem entre suas unidades. Uma das principais aplicações destas redes é a descoberta de agrupamentos de dados. Estão incluídas nesta categoria as redes SOM (Self Organizing Map – Mapa Auto-organizável) (KOHONEN, 2001) e ART - Adaptative Resonance Theory (FAUSETT, 1994). A aprendizagem não supervisionada e competitiva é um processo adaptativo onde os neurônios, numa rede neural artificial, tornam-se gradualmente sensíveis a diferentes categorias de entrada e a conjuntos de amostras num domínio específico do espaço de entrada.

Esta tese concentrou-se nesta última categoria, mais especificamente no SOM. Nas seções seguintes estão descritos com mais detalhes, a arquitetura, o algoritmo de aprendizagem e as aplicações da rede SOM.

2.9.1 Mapas Auto-Organizáveis

O Mapa Auto-Organizável de Kohonen é uma RNA (Rede Neural Artificial) com duas camadas (Kohonen, 2001) e aprendizado não supervisionado. A camada de entrada I e a de saída U . A entrada da rede corresponde a um vetor no espaço d -dimensional em \mathcal{R}^d , representado por $x_k = [\xi_1, \dots, \xi_d]^T$, $k = 1, \dots, n$, sendo n o número de vetores de entrada. Cada neurônio j da camada de saída possui um vetor de código w , também no espaço \mathcal{R}^d , associado ao vetor de entrada x_k , $w_j = [w_{j1}, \dots, w_{jd}]^T$.

Os neurônios da camada de saída estão interconectados por uma relação de vizinhança que descreve a estrutura do mapa. Por exemplo, na Figura 2.17 tem-se um mapa com a camada de saída U , bidimensional, retangular, de dimensões $N \times M$. Nesta figura somente estão representados os vetores de código w , conectados ao neurônio j .

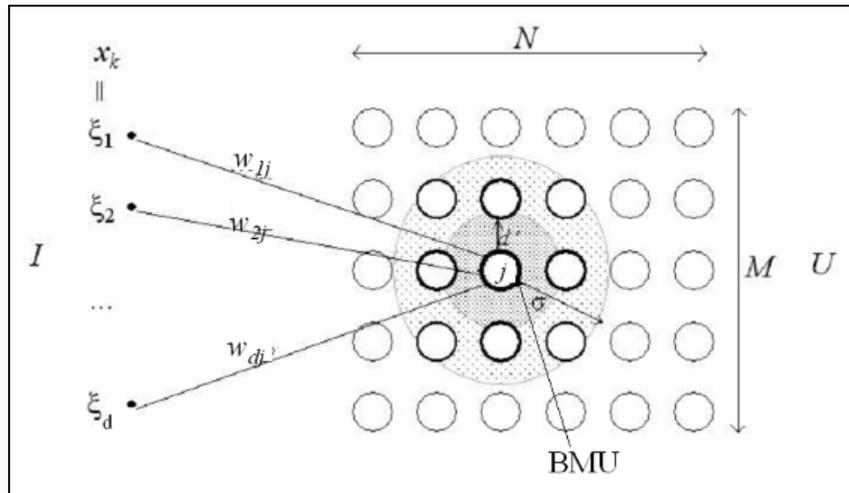


Figura 2.17 Exemplo de um Mapa Auto-organizável bidimensional $N \times M$, com entrada x_k .

O SOM foi idealizado a partir da analogia com a região do córtex cerebral humano. Descobriu-se que esta parte do cérebro aloca regiões específicas para atividades específicas e que, para uma determinada ativação cerebral, o grau de ativação dos neurônios diminuíam à medida que se aumentava a distância da região de ativação inicial (Kohonen, 2001).

Existem diferentes topologias para estruturação de um Mapa Auto-Organizável, sendo que a estrutura mais comum é a de duas dimensões. Na Figura 2.18 observa-se uma rede SOM unidimensional (a), uma rede bidimensional com organização hexagonal dos neurônios, com 6-vizinhos (b) e uma rede bidimensional com disposição retangular dos neurônios, com 4-vizinhos (c).

Desde o seu surgimento, em 1982, o SOM vem sendo aplicado numa ampla variedade de problemas de engenharia, economia, medicina, etc. Destacam-se as potencialidades de visualização de dados multivariados, análise de agrupamentos, mineração de dados, descoberta de conhecimento e compressão de dados (Kohonen, 2001).

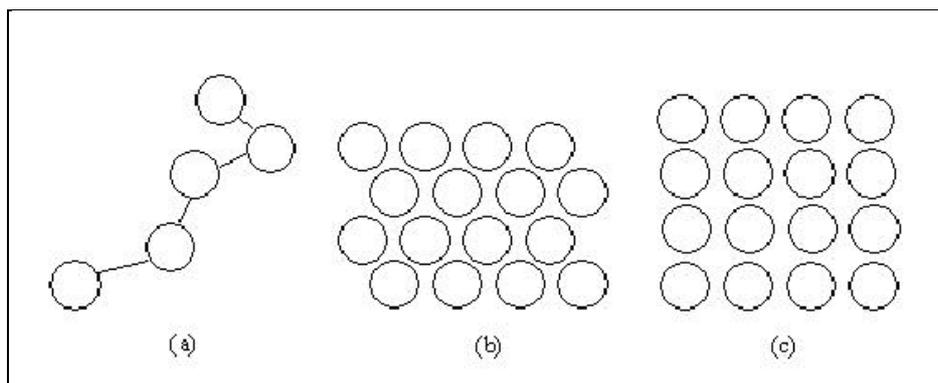


Figura 2.18 Diferentes topologias para estruturação dos mapas auto-organizáveis: a) unidimensional; b) bidimensional hexagonal; c) bidimensional retangular

2.9.2 O processo de Aprendizagem

O algoritmo básico de treinamento do SOM consiste de três fases. Na primeira fase, competitiva, os neurônios da camada de saída competem entre si, segundo algum critério, geralmente a distância euclideana, para encontrar um único vencedor, também chamado de BMU (Best Match Unit). Na segunda fase, cooperativa, é definida a vizinhança deste neurônio. Na última fase, adaptativa, os vetores de código do neurônio vencedor e de sua vizinhança são ajustados.

A relação de vizinhança entre os neurônios é estabelecida segundo alguma função. O principal objetivo da função de vizinhança é controlar o nível de atuação dos neurônios em torno do neurônio vencedor do processo competitivo. Seguindo o modelo neurobiológico tem-se que o nível de atuação dos neurônios vizinhos decai à medida que o mesmo se distancia do BMU.

De acordo com Ludwig Jr & Montgomery (2007), o princípio fundamental do algoritmo utilizado pelo SOM é a *aprendizagem competitiva*, ou seja, ao se apresentar uma entrada à rede, os neurônios competem entre si e o vencedor tem seus pesos ajustados para responder melhor ao supracitado estímulo. É também simulado um processo de cooperação entre o neurônio vencedor e seus vizinhos topológicos, que também recebem ajustes. Desta forma as características estatísticas intrínsecas contidas em um vetor de sinais de entrada, irão estimular alguma determinada localização espacial na rede. Mais especificamente, aquela que contenha um grupo de neurônios sintonizados àquele estímulo. Sendo assim, pode-se classificar esta rede como um *paradigma topológico*.

A teoria existente por trás deste algoritmo é de que no cérebro humano, entradas sensoriais diferentes são mapeadas em regiões específicas do córtex cerebral. A isto se

pode denominar de *distribuição de probabilidade codificada por localização* (LUDWIG JR & MONTGOMERY, 2007).

2.9.3 Estrutura do Algoritmo dos Mapas Auto-Organizáveis

Toda a descrição do algoritmo da rede será baseada nas informações contidas no livro de Ludwig Jr & Montgomery (2007).

O algoritmo responsável pela organização da rede inicia o processo arbitrando pequenos valores aleatórios aos pesos sinápticos, para que nenhuma organização prévia seja imposta ao mapa. Em seguida, dar-se-ão os processos de competição, cooperação e adaptação sináptica.

Processo Competitivo

Tendo como base um vetor de entrada representado por

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (13)$$

selecionando aleatoriamente dentre os demais exemplos de treinamento, é apresentado à rede sem que se especifique a saída desejada. Um neurônio y deverá responder melhor a esta entrada, ou seja, será o neurônio vencedor. O critério para a escolha do neurônio vencedor pode se basear em qualquer métrica que informe a distancia entre o vetor de entrada e o vetor de pesos dos neurônios. É freqüente o uso da distancia euclidiana. Assim o neurônio que apresenta a menor distancia euclidiana entre o vetor de entrada e o seu vetor de pesos é o vencedor. Considerando que o vetor

$$w = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}]^T \quad (14)$$

represente os valores dos pesos sinápticos de um neurônio i no instante t e o vetor $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, represente um exemplo de treinamento apresentado à rede no mesmo instante t , a distancia euclidiana entre w_i e x será dada pela seguinte expressão:

$$d_i(t) = \sum_{j=1}^N (x_j(t) - w_{ij}(t))^2 \quad (15)$$

em que:

$d_i(t)$ = distancia euclidiana entre o vetor de pesos do neurônio i e o vetor de entrada, na interação t ;

i = índice do neurônio;

j = índice do nó de entrada;

N = número de sinais de entrada (numero de dimensões do vetor x);

$x_j(t)$ = sinal de entrada no nó j na interação t ;

$w_{ij}(t)$ = valor do pesos sináptico entre o nó de entrada j e o neurônio i na entrada t ;

Processo Cooperativo

O neurônio vencedor indica o centro de uma vizinhança topológica de neurônios cooperativos. Estudos demonstram que a *interação lateral* entre um neurônio biológico estimulado e seus vizinhos topológicos decresce suavemente na medida em que a distancia lateral aumenta. O neurônio artificial, por analogia, tem a mesma propriedade, ou seja, o parâmetro *vizinhança topológica* h_{ik} , que indica o grau de interação ou cooperação entre o neurônio i e seu vizinho k , é simétrico em relação ao neurônio vencedor k e decresce monotonicamente com o aumento da distancia lateral l_{ik} até que, no limite em que l_{ik} tende ao infinito h_{ik} tende a zero. A função gaussiana atende a tais condições sendo apresentada abaixo.

$$h_{ik} = e^{\left(\frac{-l_{ik}^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (16)$$

O termo l_{ik}^2 no caso de uma grade bidimensional, é a distancia euclidiana entre os neurônios i e k . o parâmetro σ é denominado de largura efetiva da vizinhança topológica e deve diminuir com o passar do tempo, o que implica em valores de h_{ik} menores ao longo do tempo, caracterizando uma vizinhança mais restrita e, portanto, mais especializada. O valor de σ é, normalmente, uma função exponencial com a seguinte forma;

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)} \quad (17)$$

em que σ_0 é o valor inicial de σ , i é o numero de interações e τ_1 é uma constante de tempo.

Processo Adaptativo

Da mesma forma que as outras redes neurais, o aprendizado de um mapa auto-organizável se dá pelo ajuste dos pesos sinápticos.

Considerando-se um peso sináptico w_{ik} entre o nó de entrada j e o neurônio i , o ajuste Δw_{ik} que este deve sofrer, será regido pela equação a seguir:

$$\Delta w_{ik} = \eta(t) \cdot h_{ik}(t) \cdot (x_j - w_{ij}) \quad (18)$$

em que o termo h_{ik} é o parâmetro vizinhança topológica na interação t , no qual o índice k se refere ao neurônio melhor classificado k .

O parâmetro taxa de aprendizagem, $\eta(t)$, geralmente é definido pela expressão:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)} \quad (19)$$

onde τ_1 é uma constante de tempo e η_0 é o valor inicial adotado, o qual deve ser maior que zero e menor que um.

É fácil constatar, ao observar a equação acima, que a taxa de aprendizagem decresce gradualmente ao longo do tempo. A finalidade é evitar que dados novos, apresentados após um longo treinamento, venham a comprometer seriamente o conhecimento que já está sedimentado. O mesmo ocorre com o cérebro humano: quanto mais idoso se torna, menor é a capacidade de aprender.

Convém, também, observar que se não houvesse os parâmetros $\eta(t)$ e h_{ik} , não haveria possibilidade de aprendizado, ainda que, para o neurônio vencedor, uma vez que o ajuste aplicado faria com que os valores dos seus pesos sinápticos na interação t , se igualassem aos valores das entradas na interação $(t - 1)$ e assim sucessivamente.

Pensando em uma rede de kohonen e seguindo os passos descritos nos itens anteriormente, pode-se resumir as etapas do algoritmo em 7 (sete) passos como descrito a seguir:

- 1) Definir os pesos iniciais dos arcos aleatoriamente;
- 2) Definir os valores de $\sigma(0)$, τ_1 , $\eta(0)$ e o valor do erro;
- 3) Inserir exemplos de treinamento;
- 4) Encontrar a distancia euclidiana para cada neurônio;

- 5) Encontrar o neurônio vencedor;
- 6) Para cada neurônio da rede fazer:
 - a) Calcular a largura efetiva $\sigma(t)$;
 - b) Calcular a distancia lateral l^2 ;
 - c) Calcular a vizinhança topológica h ;
 - d) Calcular a taxa de aprendizagem $\eta(t)$
 - e) Calcular os valores Δw para cada arco do neurônio e seu respectivo ajuste (novo valor de w);
- 7) Voltar ao passo 3 até que as distâncias euclidianas satisfaçam o erro definido;

Esta rede e estes procedimentos foram utilizados no trabalho para previsão probabilística de ocorrência de alagamentos e do número esperado de alagamentos (NEA).

2.10 Relevância do Uso das Previsões Probabilísticas

De acordo com Leite (2011), as previsões hidrometeorológicas não são capazes de expressar, com toda a extensão e fidelidade, o comportamento futuro da atmosfera e dos recursos hídricos devido à existência de múltiplas incertezas nos dados e modelos utilizados. Essa noção de incerteza, sempre presente nas previsões, revela o verdadeiro papel reservado a essas informações, ou seja, o de reduzir e não eliminar as incertezas sobre o futuro. Essa concepção afasta a ilusão de certeza introduzida pelo formato dominante de previsão determinística, que muitas vezes confunde o usuário, levando-o à tomada de decisões sub-ótimas (KRZYSZTOFOWICS²², 2001) apud LEITE et al, 2011).

De acordo com Morgan e Henrion (1990), a incerteza não só deve ser reconhecida como incorporada ao processo decisório visando minimizar as conseqüências de fenômenos naturais adversos. Além disso, os processos decisórios relacionados a eventos hidrometeorológicos extremos, como o caso do alerta de alagamentos, apresentam comumente descontinuidades e assimetrias em sua função resultado, constituindo-se em processos fortemente impactados com a incorporação das incertezas. Assim, as previsões probabilísticas, em contraponto às determinísticas comumente utilizadas, possuem o potencial de agregar maior valor aos processos decisórios sensíveis (LEITE et al, 2011).

²² KRZYSZTOFOWICZ, R., The case for probabilistic forecasting in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1-4 (Aug), pp. 2-9, 2001.

Nas previsões probabilísticas, as incertezas devem tomar a forma de probabilidade preditiva, entendida como uma medida numérica do grau de acerto acerca da ocorrência de um evento, condicional a todas as informações (dados, modelos e julgamentos) utilizadas no processo de previsão (KRZYSZTOFOWICS²³, 2001) apud LEITE, 2008). Uma vantagem adicional da utilização dessas previsões é a consideração de que a probabilidade preditiva evolui no tempo, conforme a interação da capacidade preditiva dos modelos, calibração dos parâmetros e comportamento combinado dos dados de entrada. Essa atualização dinâmica das incertezas pode agregar ganhos adicionais ao resultado, conforme a sensibilidade do processo decisório.

Leite (2008) em seu estudo sobre a gestão do valor da informação hidrometeorológica faz uma descrição ampla sobre a relevância do uso de previsões probabilísticas e comenta que as vantagens da previsão probabilística sobre a determinística têm sido intensamente discutidas nos últimos tempos. O entendimento consensual é o de que as previsões probabilísticas são mais completas, pois expressam as incertezas e permitem a derivação da melhor estimativa sob o ponto de vista do usuário, ao contrário das previsões determinísticas, que são incompletas e só expressam a melhor estimativa sob o ponto de vista do previsor.

Além disso, as previsões probabilísticas são apontadas como cientificamente mais honestas, pois admitem e expressam as incertezas; elas permitem a emissão de avisos e alertas baseados em riscos; elas favorecem a tomada de decisão racional do usuário; elas agregam potencial para benefícios econômicos adicionais para toda a sociedade; e evitam mal entendidos nas atribuições de responsabilidade entre previsor e tomador de decisão, desacoplando os processos de previsão e uso das informações (KRZYSZTOFOWICZ²⁴, 1998 e 2001 citado por LEITE, 2011).

Considerando a sua relevância e importância, este trabalho possui como base para geração, análise e interpretação dos resultados, o uso de previsões probabilísticas, especificamente para a ocorrência de alagamentos no Município de Curitiba.

²³ KRZYSZTOFOWICZ, R., The case for probabilistic forecasting in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1-4 (Aug), pp. 2-9, 2001.

²⁴ KRZYSZTOFOWICZ, R. "Probabilistic hydrometeorological forecasts: toward a new era in operational forecasting", **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1998, v. 79, n. 2 (Feb), pp. 243-251.

2.11 Avaliação de Modelos Probabilísticos

Tendo como premissa que tanto o modelo de regressão logística como o de redes neurais gera, entre outros resultados, a probabilidade de um determinado evento ocorrer (neste estudo os alagamentos) atualizando o prognóstico a cada período de tempo (diariamente neste estudo), tem-se o caso da geração de previsões probabilísticas, onde as incertezas assumem a forma de probabilidade preditiva, conforme discutido por Krzysztofowicz (1998) apud Leite (2008).

Krzysztofowicz (1998) citado por Leite (2008), comenta que a implementação operacional de previsões hidrometeorológicas probabilísticas exige uma nova racionalidade para avaliar, interpretar e comunicar as informações geradas. A racionalidade determinística usada tradicionalmente pelos previsores deve ser suplantada pela racionalidade probabilística. A noção de certo ou errado associado a uma previsão individual não é mais aplicável, ou seja, a qualidade de acerto só pode ser avaliada estatisticamente, para um conjunto de previsões (KRZYSZTOFOWICZ, 1998). De acordo com Jolliffe e Stephenson²⁵ (2003) e Katz e Murphy²⁶ (1997) apud Leite (2008), apresentam alguns métodos, baseados em índices e gráficos, aplicáveis à investigação da qualidade das previsões probabilísticas para variáveis binárias, categorizadas e contínuas. Exemplos abrangem o índice de Brier generalizado, o índice de probabilidade ordenada discreta (RPS) ou contínua (CRPS), os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento, e o histograma de análise de ordem e ainda a Curva ROC (Receiver Operating Characteristic). A preocupação com a confiabilidade da previsão justifica-se na medida em que a mesma afeta diretamente o valor derivado dessas informações (MURPHY, 1977, KRZYSZTOFOWICZ²⁷, 1983) e esforços no desenvolvimento de metodologias de recalibração, aplicáveis em especial às previsões por conjuntos, vêm sendo empreendidos.

O fato das informações disseminadas de forma probabilística possuir compreensão mais complexa e exigir nova racionalidade de avaliação têm se constituído para alguns usuários em argumento recorrente para limitar a expansão desse tipo de previsão (LEITE, 2008). Pesquisas nesse sentido têm sido desenvolvidas para reconhecimento do problema e

²⁵ JOLLIFFE, I. T., STEPHENSON, D. B. (eds), 2003, **Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science**. Chichester, England, John Wiley & Sons.

²⁶ KATZ, R. W., MURPHY, A. H., 1997a, *Economic value of weather and climate forecasts*. Cambridge, Cambridge University Press

²⁷ KRZYSZTOFOWICZ, R., A methodology for evaluation of flood forecast-response systems: 2. theory, *Water Resources Research*, 1983, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1431-1440.

proposição de estratégias de superação (MORGAN e HENRION²⁸, 1990, MURPHY²⁹ *et al.* 1980, PATT³⁰, 2007 apud LEITE 2008). De acordo com o mesmo autor, ponto de convergência é que tanto o pessoal técnico quanto o grande público em geral podem compreender uma informação em termos de probabilidades, em especial, se sua disseminação é precedida de explicação e treinamento. Outro fator de investigação é a adequação do formato de comunicação das incertezas à audiência, o qual precisa ser ajustado à capacidade de abstração e entendimento do usuário.

Especificamente neste trabalho foram utilizados como métodos de avaliação das previsões probabilísticas, a curva ROC e os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento. Em função disso, abaixo serão discriminados apenas estes métodos.

2.11.1 Curva ROC (Receiver Operating Characteristic)

A curva ROC foi desenvolvida no contexto de detecção de sinais eletrônicos e problemas com radares, durante a Segunda Guerra Mundial (Zweig & Campbell, 1993). Seu objetivo era quantificar a habilidade dos operadores dos radares (chamados originalmente de *receiver operators*) em distinguir um sinal de um ruído (Reiser & Faraggi, 1997). Esta habilidade era chamada *receiver operating characteristic* (ROC).

Quando o radar detectava algo se aproximando, cabia ao operador decidir se o que estava sendo captado era, por exemplo, um avião inimigo (o sinal), ou algum outro objeto voador irrelevante, como uma nuvem ou um bando de aves (o ruído) (Collinson, 1998). Na década de 60, curvas ROC foram utilizadas em psicologia experimental e, nos anos 70, a metodologia amplamente se disseminou em vários ramos da pesquisa biomédica, área em que seu objetivo tornou-se basicamente auxiliar a classificação de indivíduos em doentes ou não doentes. Posteriormente a isso, a curva ROC começou também a ser utilizada na previsão de tempo e na meteorologia.

A característica operacional relativa, ROC (Mason 1982), está sendo considerada pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) como um método recomendado para indicar a qualidade das previsões probabilísticas de tempo e clima.

²⁸ MURPHY, A. H. **Decision-making models in the cost-loss ratio situation and measures of the value of probability forecasts**, Monthly Weather Review, 1976, v. 104, n. 8 (Aug), pp. 1058-1065.

²⁹ MURPHY, A. H., LICHTENSTEIN, S., FISCHHOFF, B., et al., 1980, Misinterpretations of precipitation probability forecasts, **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 61, n. 7 (Jul), pp. 695-701

³⁰ PATT, A., 2007, Evaluating the value of seasonal climate forecasts for subsistence farmers: lessons from NOAA applications research in Zimbabwe. In: WMO, 2007, **Elements for life**, Chapter V.2, Geneva, Switzerland, Tudor Rose.

Sobre isso, existe uma extensa literatura. Alguns trabalhos bastante conhecidos aplicando a curva ROC na área de meteorologia são de Mason (1982, 2004), Mason & Graham (1999), Harvey et al (1992), Stanski et al (1989), Swets (1986, 1988, 1996), Kharin & Zwiers (2003), Metz (1978) entre outros.

Como indicador global do desempenho de um teste diagnóstico cujo resultado é uma escala numérica, a curva ROC é uma descrição simples e completa dos efeitos de qualquer ponto de corte possível sobre a sensibilidade e especificidade do teste. A curva ROC informa sobre a habilidade do teste em refletir a real situação, ou a sua capacidade preditiva de forma precisa e válida numa escala padronizada e fácil de interpretar (SWETS, 1988). Além disso, descreve as características de detecção inerentes ao teste e o receptor da sua informação, pode operar em qualquer ponto da curva por meio de um ponto de corte apropriado (METZ, 1978).

A questão do teste diagnóstico baseia-se nas conseqüências da tomada de decisão em relação à definição do ponto de corte. Um teste de diagnóstico cujos resultados são valores contínuos têm a distribuição dos mesmos de forma sobreposta entre os indivíduos realmente afetados e não afetados. Diferentes escolhas para um ponto de corte têm como conseqüência vários tipos de decisões corretas e incorretas. A escolha de um determinado ponto de corte classifica arbitrariamente os indivíduos com resultados abaixo desse valor como negativos e os com resultados mais altos como positivos. Valores mais altos para o ponto de corte tornam menores as freqüências de falsos positivos e verdadeiros positivos e, por outro lado, aumentam as freqüências de decisões verdadeiras negativas e falsas negativas. Um ponto de corte adequado deve ser escolhido de forma a contemplar um compromisso entre as conseqüentes vantagens e desvantagens (METZ, 1978).

Vários pontos de corte possíveis estão associados a valores correspondentes de sensibilidade e especificidade. Ao traçar o gráfico da sensibilidade e especificidade no eixo das ordenadas em função dos valores de probabilidade prevista para cada ponto de corte plausível, é possível visualizar a localização de um ponto de corte adequado para determinada aplicação. A Figura 2.19 ilustra os diversos tipos de critérios que podem ser utilizados para definir o ponto de corte.

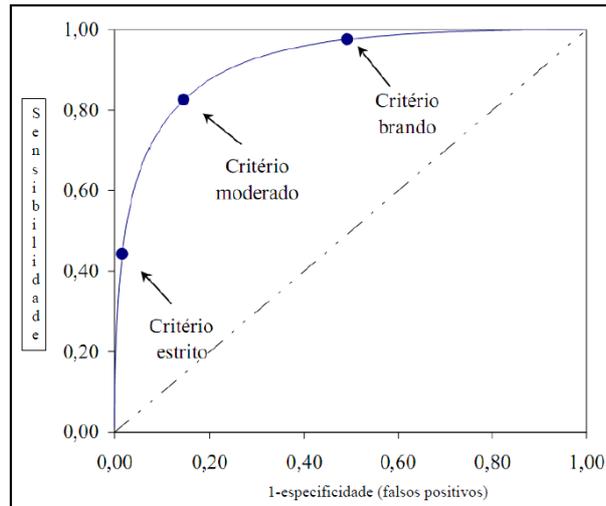


Figura 2.19 Curva ROC para uma dada capacidade de discriminação, com a variação do ponto de corte (critério de decisão)

O valor do ponto de corte é definido com um valor que pode ser selecionado arbitrariamente pelo pesquisador entre os valores possíveis para a variável de decisão, acima do qual, por exemplo, uma determinada situação é classificada como positiva (teste positivo, ocorrência do alagamento ou inundação) e abaixo do qual é classificada como negativa (teste de diagnóstico negativo, não ocorrência do alagamento ou inundação).

Para cada ponto de corte são calculados valores de sensibilidade e especificidade, que podem então serem dispostos no gráfico. Um classificador perfeito corresponderia a uma linha horizontal no topo do gráfico, porém esta dificilmente será alcançada. Na prática, curvas consideradas boas estarão entre a linha diagonal e a linha perfeita, onde quanto maior a distância da linha diagonal, melhor o sistema (Figura 4.23). A linha diagonal indica uma classificação aleatória, ou seja, um sistema que aleatoriamente seleciona saídas como positivas ou negativas, como jogar uma moeda para cima e esperar cara ou coroa. Finalmente, a partir de uma curva ROC, pode-se selecionar o melhor limiar de corte para obter o melhor desempenho possível.

O gráfico da curva ROC convencional é traçado com a sensibilidade no eixo das ordenadas contra o complemento da especificidade (1-E). A curva passa inevitavelmente pelo canto inferior esquerdo do gráfico ($S = 0, 1-E = 0$), porque é possível classificar todos os resultados como negativos, e pelo canto superior direito ($S = 1, 1-E = 1$) porque também é possível classificar todos os resultados como positivos. Assim, se o teste fornece alguma informação na tomada de decisão, os pontos intermediários da curva devem estar

localizados acima da diagonal principal da área ROC (METZ, 1978). Idealmente, a curva deve ser convexa e sempre crescente.

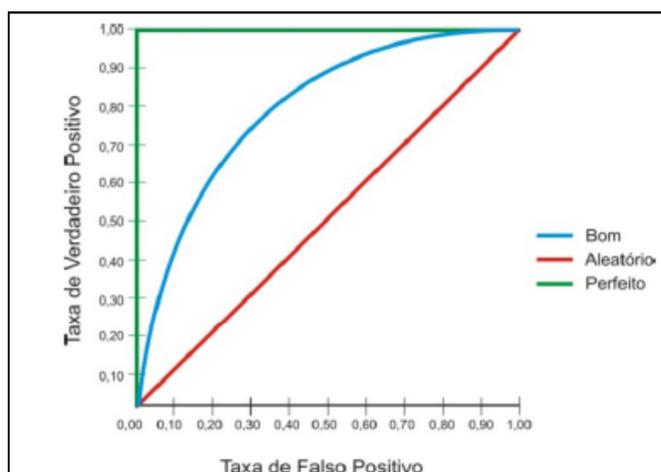


Figura 2.20 Exemplos de diferentes curvas ROC (Perfeita, Boa e Aleatória)

Como os valores de sensibilidade e especificidade são independentes da prevalência, a curva ROC fornece informação sobre a capacidade de detecção do teste de forma independente da prevalência da condição testada e do ponto de corte escolhido (METZ, 1978; SWETS, 1988).

De acordo com Brooks³¹ (2004) apud Leite (2008), em sua discussão sobre a emissão ou não do alerta de evento severo (considerado um problema de ordem binária), é possível associar uma curva de características operacionais à condição presente do processo de previsão, definida no espaço *POD X POFD* (Probabilidade de Detecção X Probabilidade de Falsa Detecção). Sob o pressuposto de que ambas as distribuições de probabilidades da ocorrência do evento e da não ocorrência são gaussianas e de mesma variância, é possível, de forma facilitada, calcular a curva ROC, dado a probabilidade climatológica do evento p e a distância, em termos de números de desvios padrão, entre as médias das duas distribuições gaussianas.

De acordo com os mesmos autores, essa distância é uma medida da capacidade de discriminação entre a ocorrência ou não do evento e constitui-se em um indicador da qualidade global de um sistema de alerta. Outro procedimento para levantamento da curva ROC, conforme discutido por Harvey Jr³². *et al.* (1992) citado por Leite (2008), é partir

³¹ BROOKS, H. E. Tornado-warning performance in the past and future: a perspective from signal detection theory. **Bulletin of the American Meteorological Society**. 2004, v. 85, n. 6 (Jun), pp. 837-843.

³² HARVEY JR., L. O., HAMMOND, K. R., LUSK, C. M., *et al.*, The application of signal detection theory to weather forecasting behavior. **Monthly Weather Review**. 1992, v. 120, n. 5 (May), pp. 863-883.

dos pares de medidas de desempenho *POD* e *POFD* extraídos do sistema predictor e ajustar uma curva tipo ROC através do Método da Máxima Verossimilhança de Dorfman.

Considerando-se o problema de emissão de alertas, de acordo com essa abordagem baseada nas características operacionais do processo de previsão, o ajustamento operacional é realizado por meio da alteração do limite de determinado predictor a partir do qual se emite o alerta, o que significa um deslocamento sobre a mesma curva ROC. Por outro lado, o ajustamento tecnológico é realizado por meio do estabelecimento de uma nova curva ROC, na qual a relação entre *POD* e *POFD* se torne mais favorável (LEITE, 2008).

Além das avaliações qualitativas a partir da curva ROC, diversas técnicas foram desenvolvidas e propostas para avaliar as suas propriedades estatísticas desde o início da década de 1980. O indicador estatístico mais popular para descrever a curva ROC é a estimativa da “**área sob a curva**” adequada e suavizada, que varia de 0,5 (nenhuma acurácia aparente) a 1,0 (acurácia perfeita), a medida que a curva pode se estender em direção ao canto superior esquerdo da área do gráfico.

Para aplicações com dados meteorológicos, de acordo com Joliffe & Stephenson (2003), esse método fornece basicamente três benefícios para a avaliação de eventos meteorológicos:

- Um puro índice de precisão, no sentido da capacidade inerente do sistema para a discriminação de um estado a partir de outro.
- Estimativas quantitativas de previsão das probabilidades de resultados (por exemplo, as taxas de acerto e falso alarme) para qualquer decisão que o sistema possa utilizar e as interações das quais os limites do sistema variam.
- Um índice do limite de decisão que torna possível incorporar as probabilidades climatológicas e os valores de benefícios e custos das várias metodologias de previsão para determinar o limiar ideal para o sistema de previsão em uma determinada situação.

2.11.2 Área sob a Curva ROC

A área sob a curva ROC tem sido descrita por diversos autores como a representação da probabilidade de um caso com necessidade de tratamento, escolhido aleatoriamente, ser classificado corretamente ou com necessidade maior do que um caso

sem necessidade de tratamento, também selecionado aleatoriamente (HANLEY & McNEIL, 1982). Tem sido proposto que a curva ROC seja uma medida mais significativa do valor de acurácia do teste de diagnóstico do que a “acurácia geral” descrita como a porcentagem de casos classificados corretamente. Isto porque, diferentemente da acurácia geral, a curva ROC não é dependente da prevalência de uma doença na população. Além disso, dois testes com a mesma porcentagem de casos corretamente classificados, mas com sensibilidade e especificidade diferentes não resultarão na mesma curva ROC (METZ, 1978).

Os valores ideais da área sob a curva ROC podem variar dependendo de sua aplicação. Swets (1988) sugere que se pode confiar que o teste apresenta boa acurácia, no caso de previsão de chuva, quando a área abaixo da curva ROC é de **0,75 a 0,90**.

Dentre os métodos para cálculo de áreas abaixo de uma curva ROC, podem ser considerados os seguintes:

- (i) regra do trapézio;
- (ii) estimativa de máxima verossimilhança;
- (iii) a partir do declive e termo de interceptação da representação dos dados originais em papel de probabilidades *binormal*;
- (iv) aproximação à estatística *U* de Wilcoxon-Mann-Whitney.

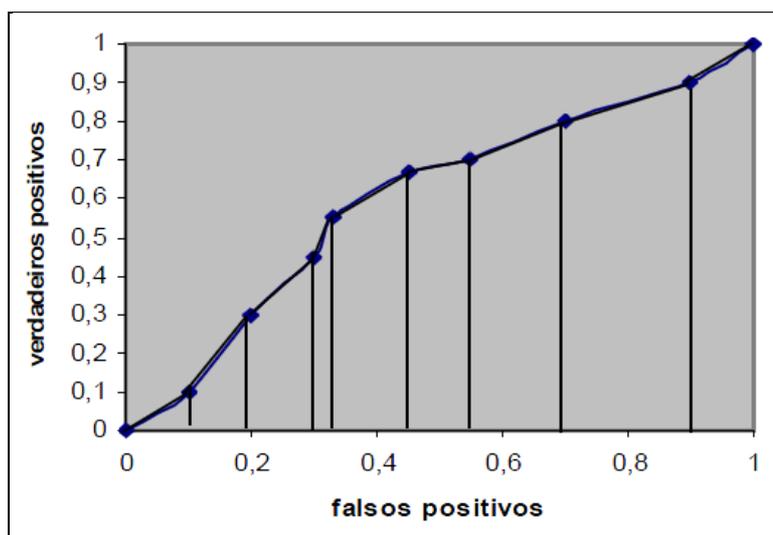


Figura 2.21 Trapézios da Curva ROC formando a área sob a curva

Neste trabalho, para o cálculo da área abaixo da curva ROC foi utilizado a regra do trapézio (Figura 2.21).

2.11.3 Diagrama de Confiabilidade, Discriminação e Refinamento (*Reliability, Discrimination and Sharpness Diagram*)

Um processo de verificação de previsões pode assumir grande dimensionalidade e ser orientado tanto para seleção de medidas específicas (*measures-oriented approach*) quanto para a análise das características estatísticas da distribuição conjunta de probabilidades entre previsões e observações (*distributions-oriented approach*) (KATZ e MURPHY, 1997 apud LEITE e ROTUNNO FILHO, 2006).

Conforme métodos de verificação de previsões orientados para a análise das distribuições de probabilidade, discutidos por Joliffe e Stephenson (2003) e Katz e Murphy (1997), para o caso de previsões probabilísticas, pode-se investigar os aspectos de qualidade traduzidos nos diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento.

De acordo com Wilks (1995, p.287),

O diagrama de confiabilidade é freqüentemente utilizado para avaliar as previsões probabilísticas para eventos binários, tais como a probabilidade de precipitação mensurável. No diagrama de confiabilidade, é gerado um conjunto regular de probabilidades previstas que vai de 0 a 100% definidas em intervalos de 10%. A freqüência relativa observada de ocorrência dos eventos é calculada e plotada. O diagrama é bem adequado para avaliar a capacidade de calibrar as previsões para eventos binários, mas o uso desse diagrama com as previsões multicategoria não é simples.

Sendo assim, entende-se que a confiabilidade traduz o grau de concordância entre probabilidades previstas e subsequentes freqüências relativas observadas.

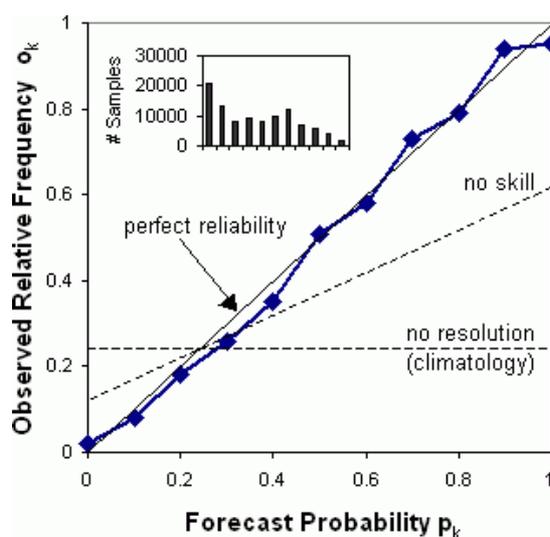


Figura 2.22 Exemplo de diagrama de confiabilidade

Na Figura 2.22 é importante notar que a confiabilidade é indicada pela proximidade da curva traçada com a diagonal. Se a curva está abaixo da linha, isto indica superestimativa (probabilidades previstas muito altas), e pontos acima da linha indicam subestimativas (probabilidades previstas muito baixas).

O diagrama de discriminação reflete a capacidade de um determinado sistema de previsão de distinguir claramente as situações de evento e situações de não evento (Wilks, 1995). A Figura 2.23 ilustra diferentes tipos de resultados para o gráfico de discriminação.

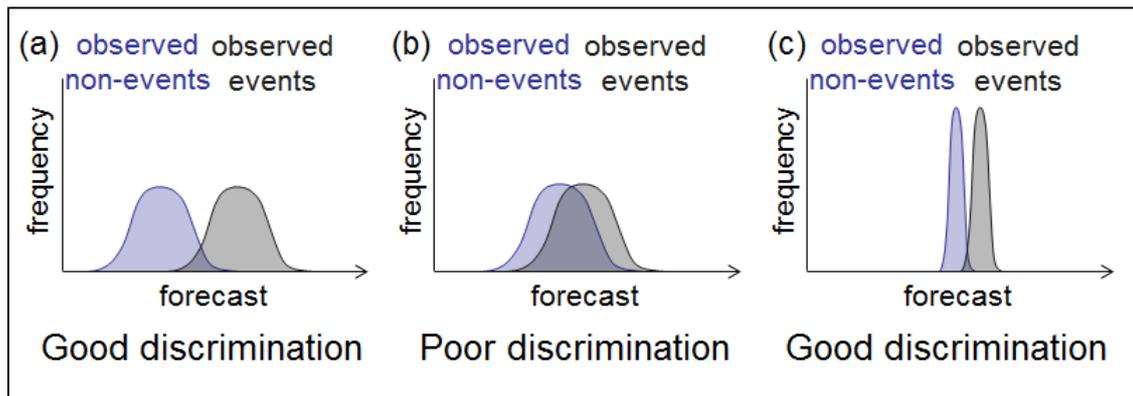


Figura 2.23 Diferentes tipos de resultados para o diagrama de discriminação

O diagrama de refinamento (sharpness) demonstra o grau com que o sistema provê previsões probabilísticas próximas aos extremos, ou seja, zero ou um (ocorrência e não ocorrência de evento). Trata-se de um aspecto da qualidade da previsão aplicado apenas para a previsão probabilística.

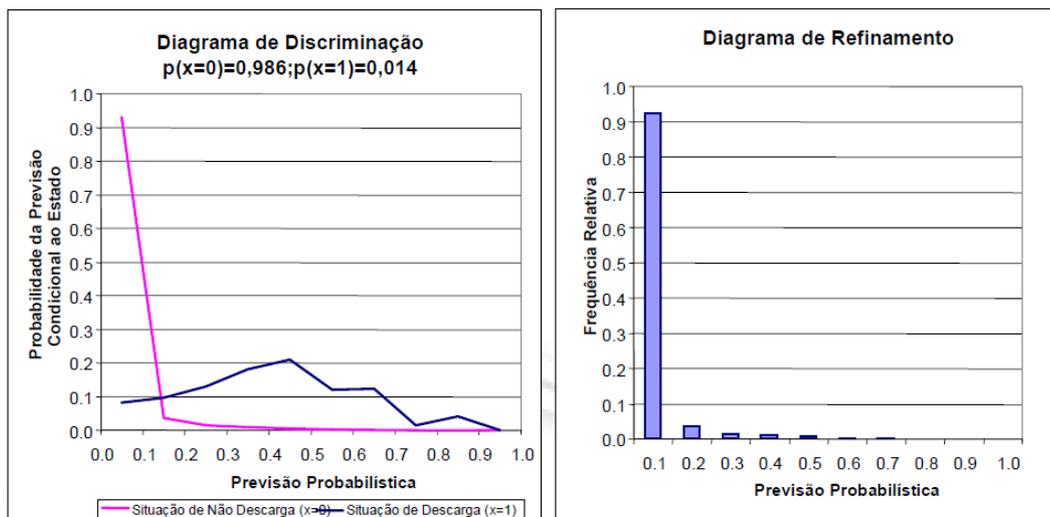


Figura 2.24 Exemplo de diagrama de discriminação e refinamento
 Fonte: Leite e Rotunno Filho (2006)

2.11.4 Avaliação da Melhor Estimativa Determinística

Um processo de previsão probabilística pode gerar estimativas determinísticas utilizadas na comunicação das informações geradas e em processos decisórios ainda não preparados para incorporação das incertezas. As estimativas mais utilizadas são a média e mediana da distribuição prevista. No problema tratado neste trabalho a melhor estimativa considerada foi o número esperado de alagamentos (NEA).

Para a avaliação da melhor estimativa, buscou-se investigar métodos comumente aplicados a previsões quantitativas. Neste caso, podem ser utilizadas diversas medidas entre elas as relativas à acurácia, acurácia relativa à climatologia (*skill*) e existência de erro sistemático (bias) entre outras (KATZ E MURPHY 1997).

No âmbito deste estudo, foram analisadas as medidas clássicas de acurácia, ou seja, o EMQ e o SSEMQ (JOLLIFFE e STEPHENSON 2003). O EMQ é uma medida que penaliza os erros maiores em relação aos menores, sendo particularmente sensível aos grandes desvios. O índice SS (*skill score*) quantifica a variação relativa do erro médio quadrático (EMQ), relativamente a um EMQ de referência. Quanto maior o SS, maior o ganho (em percentagem). A fórmula utilizada para cálculo do SS e especificamente utilizada neste estudo para avaliar o Número Esperado de Alagamentos é a seguinte:

$$SS = 1 - \frac{EMQ_{nea}}{EMQ_{ref}} \times 100\% \quad (20)$$

Onde

$$EMQ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (n_{obs} - nea)^2 \quad (21)$$

em que:

EMQ = erro médio quadrático;

n_{obs} = número observados de alagamentos;

nea = número esperado de alagamentos;

N = número de observações;

A análise conjunta dessas medidas de qualidade permite avaliar o grau de correspondência entre previsões e observações em diversas circunstâncias, subsidiando a comparação entre a utilização do NEA com a utilização da climatologia ou persistência por exemplo.

CAPÍTULO 3

3 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS-OPERACIONAIS E METODOLÓGICOS

Após as discussões descritas no embasamento teórico da pesquisa, descreve-se neste capítulo o roteiro metodológico utilizado para atingir os objetivos propostos. Este roteiro está compartimentado de tal forma que inicialmente é feita uma descrição sobre a base cartográfica e os dados utilizados e em um segundo momento, os métodos utilizados na pesquisa.

3.1 Base Cartográfica

A base cartográfica adotada para o desenvolvimento da pesquisa teve três fontes principais, sendo elas:

- i) Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA, atualmente Instituto das Águas do Paraná;
- ii) Coordenação da Região Metropolitana de Curitiba – COMEC;
- iii) Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba – IPPUC;

As informações adquiridas junto a estes órgãos foram compiladas, e posteriormente convertidas utilizando como referência o sistema de projeção cartográfico UTM (Universal Transversa de Mercator), Datum SAD 69 e fuso 22s.

A escala adotada para o desenvolvimento desta pesquisa foi de 1:10.000.

3.2 Dados de Alagamentos

A coleta de dados referentes aos pontos/endereços afetados pelos alagamentos no município de Curitiba foi realizada junto ao Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC). Esses dados, no entanto possuem como fonte primária a Defesa Civil Municipal de Curitiba e para que fosse possível entender como este órgão elabora suas políticas direcionadas para a gestão ambiental urbana, sobre a definição dos eventos extremos e sobre como a coleta de dados é realizada, uma reunião com os técnicos deste órgão foi marcada.

A título de informação, a Defesa Civil Municipal de Curitiba está vinculada a Secretaria de Defesa Social e sua coordenação é feita pelos agentes da Guarda Municipal. A prefeitura municipal possui a Central de Atendimento e Informações – “156”, sendo o “Contact Center” desenvolvido e gerenciado pelo ICI (Instituto Curitiba de Informática), com o objetivo de viabilizar um sistema de comunicação entre o cidadão e a Prefeitura de Curitiba, permitindo o atendimento da demanda de informações e solicitações da população. Possui ainda o “153” – Disque Guarda Municipal - que é o telefone da Guarda Municipal e também o “190”, telefone da polícia.

O procedimento para armazenamento e compilação dos dados é o seguinte: quando um cidadão realiza uma chamada para um dos três telefones citados, o mesmo é identificado e faz-se a solicitação de seu endereço. Tais informações são armazenadas por um sistema chamado “SISGESGUARDA” (Sistema de Gerenciamento da Guarda Municipal) e posteriormente, repassadas para o órgão responsável por resolver a solicitação. No caso de chamadas informando sobre qualquer ocorrência atendida pela Defesa Civil (alagamentos, queda de árvores, risco de deslizamento, erosão, incêndio, entre outras) as informações são repassadas para a Defesa Civil Municipal, a qual via agentes da Guarda Municipal atendem as solicitações visitando os endereços informados.

Após os atendimentos serem efetivados, tais informações são repassadas para o IPPUC que, via o endereço informado quando da chamada e do atendimento, extrai as coordenadas e espacializa os dados. Tais dados são espacializados utilizando como referência o Sistema UTM e o Datum SAD 69.

Os dados disponíveis no IPPUC e coletados para este trabalho são do ano de 2005 até 2010. Justifica-se a escolha por este recorte temporal a própria disponibilidade dos dados, já que anteriormente a 2005 existem apenas poucos registros armazenados em forma de relatório para o ano de 2004. Apenas a partir de 2005, em função do interesse de funcionários da Defesa Civil Municipal e do IPPUC no sentido de mapear as ocorrências registradas pela Defesa Civil, que os dados começaram a ser compilados para posteriormente serem espacializados e utilizados com objetivo de entender em quais áreas do Município se concentravam determinado tipo de ocorrência. Sendo assim, neste trabalho está sendo utilizada, com exceção do ano de 2011, a série total de dados disponíveis. Como o trabalho tem interesse nos alagamentos, foram extraídas da base disponibilizada apenas as ocorrências relacionadas aos alagamentos.

A Tabela 3.1 ilustra quais informações são disponibilizadas sobre cada ponto em que ocorreu o alagamento. Salienta-se que os dados sobre alagamentos são pontuais. Sabe-se, no entanto, que os alagamentos envolvem áreas e não pontos. Mas, neste caso, a Defesa Civil registra a ocorrência e a representa de forma pontual. Atualmente existe um sistema (ainda em teste) também desenvolvido pelo ICI, no qual o agente que atenderá a ocorrência poderá mapear a área alagada. De qualquer forma, o que existia disponível até o final do ano de 2010, era os dados pontuais.

Este modelo de tabela vem sendo utilizado desde o ano de 2009. Anteriormente a este ano, a tabela era praticamente igual com exceção do campo “Hora” que não constava. Após serem coletados os dados, os mesmos foram importados para o software ArcGIS 9.3, no qual pode-se elaborar as análises espaciais de distribuição por bairro, núcleos regionais de defesa social (NDRS) e por bacia hidrográfica. Os resultados são apresentados em forma de gráfico no capítulo de resultados.

Tabela 3.1 – Modelo da estrutura da tabela

Bairro	Data e Hora	Natureza	Rua	Nº	Coord X	Coord Y
CIC	01/02/2010 02:15	Alagamento	Walter Oto Guaita	1412	667199,73	7179087,16
Boqueirão	02/10/2010 05:55	Alagamento	Do tratorista	42	678908,66	7177905,65
Uberaba	02/12/2010 22:05	Alagamento	Odenir Dissenha	284	679182,56	7186618,77

Org.: Marciel Lohmann, 2010

Para um melhor entendimento e mapeamento das áreas mais afetadas no município de Curitiba optou-se por se utilizar o método do “Estimador de Densidade por Kernel” que trata-se de um método bastante difundido na bibliografia e é uma medida de um suavizador de pontos (número de eventos por unidade de área), que permite a análise espacial da dispersão ou concentração de um fenômeno espacial.

De acordo com Bailey e Gatrell (1995), o estimador de Kernel (Figura 3.1) foi originalmente desenvolvido para obter a estimativa de densidade de probabilidade univariada ou multivariada de uma amostra observada. Estimar a intensidade de um padrão de pontos é como estimar uma densidade de probabilidade bivariada. Pode-se adaptar a estimativa bivariada de Kernel para se obter uma estimativa de intensidade do padrão de pontos.

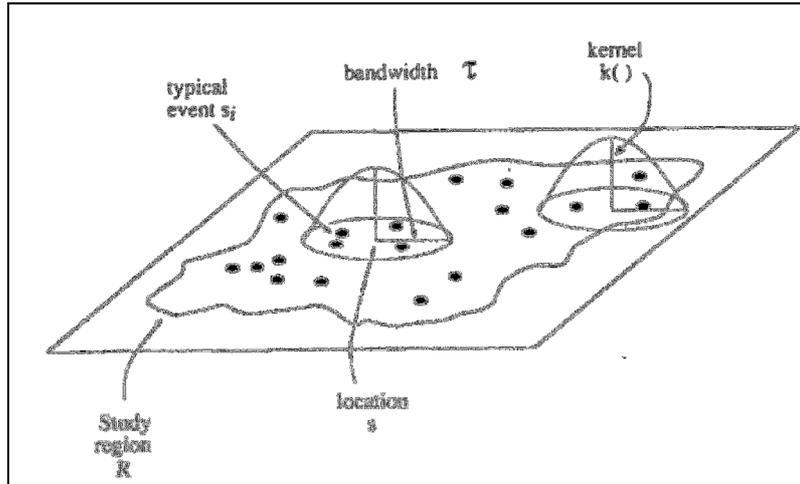


Figura 3.1 Estimador de Kernel para um padrão de pontos
 Fonte: Bailey e Gatrell (1995)

De acordo com a Figura 3.1, suponha que s represente uma localização em uma região R e s_1, \dots, s_n são localizações de n eventos observados. Então, a densidade estimada, λ , na localização s é estimada segundo a equação:

$$\hat{\lambda}_r(s) = \sum_{h_i \leq \frac{3}{\pi\tau^2}} \left(1 - \frac{h_i^2}{\tau^2}\right)^2 \quad (22)$$

onde h_i é a distância entre o ponto s e a localização do evento observado s_i , e a soma só acontece para os pontos que estão a uma localização h_i que não ultrapasse τ . A região de influência dentro da qual os eventos contribuem para o cálculo da intensidade é um círculo de raio τ com centro em s . Observando a fórmula, verifica-se que na localização s , a uma distância de zero, o peso é $3/\pi\tau^2$ e cai suavemente para o valor zero quando a distância é τ . Utilizando este método, elaboraram-se os cartogramas de densidade de alagamentos para os anos de 2005 a 2010, assim podendo-se analisar a evolução na escala espaço-temporal das localidades mais afetadas. Tal procedimento foi elaborado utilizando-se da extensão “Spatial Analyst” do ArcGIS 9.3. O módulo “Density” de Kernel foi inicialmente testado com diversos valores para o raio de abrangência e tamanho de pixel de saída. A partir dos resultados, o raio que melhor se adequou foi de 2000m e com o tamanho de pixel de saída de 100m. Posteriormente foram estabelecidas quatro classes de valor, de maneira que cada classe represente 25% dos valores totais (Muito Baixo; Baixo; Moderado; Alto).

3.3 Análise de Frequências

A partir dos dados coletados na Defesa Civil e IPPUC, e com o objetivo de caracterizar e compreender a dinâmica de ocorrência dos alagamentos em Curitiba optou-se por tratar os dados utilizando como unidade espacial a bacia hidrográfica. Para tanto, foram elaborados gráficos utilizando o software Excel.

Foram elaborados os seguintes gráficos:

- i. Número total de ocorrências de defesa civil versus o número de alagamentos;
- ii. Número total de alagamentos em Curitiba nos anos de 2005 a 2010;
- iii. Número total de alagamentos mensais nos anos de 2005 a 2010;
- iv. Número total de alagamentos por bacia hidrográfica nos anos de 2005 a 2010;

Tendo como base estes mesmos dados, objetivou-se ainda entender a dinâmica dos alagamentos em cada bacia hidrográfica que integra o município de Curitiba, já que o número de ocorrência é bem diferenciado nas mesmas. Além disso, parte-se do princípio de que tal dinâmica está intrinsecamente associada esta unidade espacial.

Para tanto, foram elaborados gráficos de distribuição de frequência. A distribuição de frequência é uma tabela resumida na qual os dados são organizados em grupos de classe ou categorias convenientemente estabelecidas e numericamente ordenadas.

As distribuições de frequências são séries heterógrafas, isto é, séries na qual o fenômeno ou fato apresenta graduações ou subdivisões. Embora fixo, o fenômeno varia de intensidade.

Nas distribuições de frequência, os dados são agrupados segundo um critério de magnitude, em classe ou pontos, permanecendo constante o fato, local e tempo, de tal forma que se possa determinar a percentagem ou número, de cada classe. É um tipo de apresentação que condensa uma coleção de dados conforme as frequências ou repetições de seus valores.

Levando em consideração tais observações, foi calculada a frequência acumulada do número de alagamentos ao longo do dia por bacia hidrográfica, a fim de identificar em quais horas do dia as ocorrências foram mais frequentes. Tal análise levou em consideração apenas os dados dos anos de 2009 e 2010 em função de que tal informação não era coletada anteriormente a esse período. Apenas a partir de 2009 é que um maior número de informações referentes a cada ocorrência começou a ser coletada entre elas o

horário da ocorrência, importante nesse estudo para identificação do período do dia em que os alagamentos são mais frequentes.

Ainda, foi calculada a frequência acumulada do número simultâneo de alagamentos em dias de ocorrência de alagamento por bacia hidrográfica. Tal análise possibilitou mostrar o número de ocorrências por dia apenas nos dias em que houve ocorrências. Os resultados foram apresentados na forma de gráficos.

3.4 Dados de Chuva

Estudos hidrometeorológicos pressupõem uma boa qualidade na identificação e quantificação da precipitação em bacias hidrográficas além da boa calibração dos sistemas de medição.

Neste sentido, um dos grandes desafios da meteorologia é alcançar o valor mais próximo da realidade de precipitação em uma determinada área. Sistemas convectivos, por exemplo, podem gerar precipitações com valores acima de 50 mm em uma hora em áreas com menos de 10 km de diâmetro. Portanto, se a rede não for suficientemente densa, a identificação desta chuva pode ser prejudicada.

Áreas densas de pluviômetros são normalmente encontradas em regiões urbanas e em grandes cidades. Bacias hidrográficas inteiras podem ser representadas por um grupo de três ou quatro estações e em diversas vezes ter subdimensionado o total acumulado na bacia. Ou então, se a chuva ocorrer em uma pequena área onde existe um pluviômetro a precipitação será superestimada (CALVETTI et al 2006, 2003, BENETI et al, 2006, PEREIRA FILHO, 2004).

Em geral, as estimativas de precipitação são feitas com a espacialização de dados de pluviômetro distribuídos ao longo de certa área. Embora esses sensores possuam uma boa capacidade de estimativa de intensidade, o problema reside na representatividade espacial que é muito baixa.

Trabalhos de estudos de algoritmos e técnicas de interpolação foram aplicados a redes de pluviômetros para criar isoietas sobre bacias hidrográficas (Ribeiro da Silva et. al³³, 2007 apud Calvetti et al 2006, Souza et. al³⁴, 2004 apud Calvetti et al 2006). Em geral,

³³ RIBEIRO DA SILVA, K., PAIVA, Y. G., CECÍLIO, R. A., PEZZOPANE, J. E. M. (2007): **Avaliação de Interpolados para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim-ES**. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis-SC.

os métodos são satisfatórios para chuvas com distribuição uniforme e com redes densas de medição.

Mas para tratamento operacional e acumulações de curto prazo, por exemplo, 6 horas, a distribuição das chuvas é bastante irregular e há necessidade de medições de altíssima resolução. Por isso, redes de pluviômetros de alta densidade (4km x 4km) são operacionalmente inviáveis em função do alto custo como também pela manutenção e controle de qualidade dos dados e de sensores.

Em função disso, nos últimos anos são utilizadas estimativas de precipitação por radar e satélite como meios alternativos de identificação da distribuição espacial da precipitação e para estudos de eventos de chuva extrema sobre bacias hidrográficas.

Levando em consideração tais idéias, neste trabalho, optou-se por se utilizar como base os dados de chuva estimada a partir da integração das informações provenientes de radar meteorológico, satélite e pluviômetros, utilizando o método de Análise Objetiva Estatística (ANOBES).

As estimativas por radar meteorológico foram obtidas por meio da aplicação da relação chuva e refletividade (relação ZR) de Marshall-Palmer ($Z=200R^{1.6}$, onde Z é a refletividade e R a precipitação) em produtos CAPPI, ou seja, um plano projetado a 3 km de altura constantes sobre a superfície terrestre.

A aplicação da relação ZR é feita em imagens gerada a cada 5 minutos. Após a relação ZR, faz-se a acumulação da precipitação em uma hora, aplicando-se a correção dos efeitos de advecção dos fenômenos precipitantes. A acumulação diária de precipitação será a resultante da acumulação das estimativas horárias de precipitação por radar.

O radar meteorológico utilizado foi o do SIMEPAR que é um radar banda S, Doppler, modelo DWSR- 95S/EDGE, da Enterprise Electronic Corporation (EEC), instalado no município de Teixeira Soares-PR, e em operação desde 1998. A cobertura qualitativa deste radar tem raio de 480 km e abrange todo o Paraná, Santa Catarina, parte do sul de São Paulo e norte do Rio Grande do Sul. A área quantitativa (com estimativas de precipitação e vento) é de 200 km de raio, cobrindo todo o centro e leste do Paraná, conforme mostra a Figura 3.2.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das características técnicas. Atualmente o sistema de aquisição dos dados está configurado de tal forma a permitir a definição de

³⁴ SOUZA, F. T. de, Ebecken, N. F. F. (2004): Preparação de dados de Chuvas Intensas utilizando técnicas de Mineração de Dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol 9 N. 1.

rotinas de coleta de dados que apresentem alta resolução espacial (área mínima de 1km²) e temporal (com atualização de 5 a 10 minutos) das informações de precipitação e vento radial. Após a coleta, os dados são armazenados em banco de dados para visualização, análise, e integração com informações de relâmpagos, satélites e dados de hidrometeorológicos de superfície (CALVETTI et al 2007).

Em situações de ocorrência de precipitação na área quantitativa do radar (200km de raio) são medidos dados volumétricos a cada 10 minutos de intervalo, com a utilização de duas estratégias de varredura:

- Modo de vigilância: com uma elevação da antena em 0.0° para avaliação da presença de nuvens de precipitação na área total (qualitativa, raio de 480km);
- Modo chuva: para a medição volumétrica com informações de refletividade e velocidade radial Doppler (8 elevações da antena, de 0,35° a 6,89°). Por meio das elevações é possível calcular um plano constante acima da superfície de refletividade para obter as estimativas de precipitação (CAPPI).

Tabela 3.2 – Características técnicas do radar DWSR-93/EDGE do SIMEPAR

Frequência de Operação	2,7 a 2,9 GHz
Potência de Pico (mínimo)	850 kW
Largura do Pulso	0,8 e 2,0 μs
Freq. De Repetição de Pulso	250 Hz a 93 Hz
Polarização	Linear horizontal (possib. Dual)
Ganho de Antena	45 db nominal
Largura do Feixe	0,9°
Lóbulos secundários	23 db abaixo do lóbulo principal
MDS – Mínimo Sinal Detectável	-111 dBm

Fonte: Calvetti et al (2007).

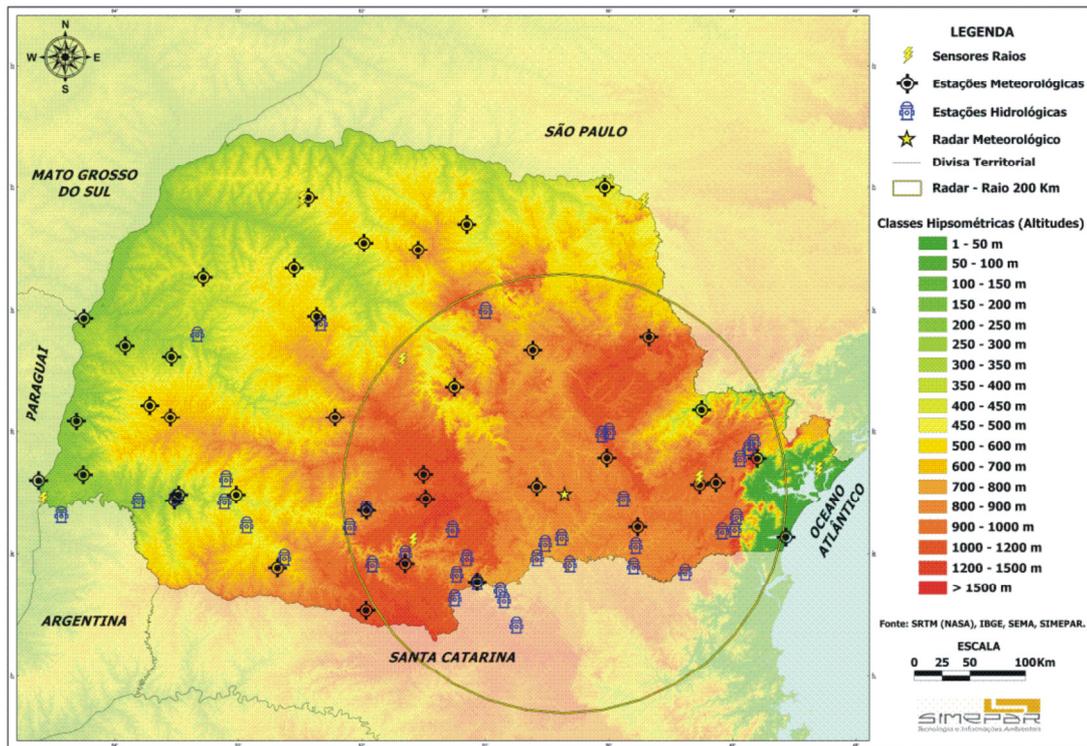


Figura 3.2 Distribuição das estações meteorológicas e hidrológicas telemétricas no Paraná e área de cobertura do radar no modo quantitativo (200 km).
Elab.: Marciel Lohmann, 2010.

Os campos de precipitação por radar foram acumulados em uma hora utilizando o método de advecção de Tremback³⁵ et al (1987) para corrigir falhas de interpolação provocadas pelos efeitos da propagação dos sistemas meteorológicos de modo a preencher os espaços que não puderam ser medidos (CALVETTI et al 2006).

Para a estimativa de precipitação por satélite, foi utilizada a técnica *Convective-Stratiform Technique* (CST), desenvolvida por Adler e Negri (1988) e recalibrada com dados obtidos durante o programa LBA/TRMM com sensores TMI (Microwave Imager) e dados do radar TOGA (Negri e Adler³⁶, 2002, Pereira Filho³⁷ 2002, apud CALVETTI et al 2006).

A técnica CST consiste na identificação de sistemas convectivos e estratiformes numa área determinada de cobertura do satélite e, utilizar diferentes parametrizações na

³⁵ TREMBACK, C.J., J. POWELL, W.R. COTTON, and R.A. PIELKE. The forward in time upstream advection scheme: Extension to higher orders. *Mon. Wea. Rev.* 1987. 115, 540-555.

³⁶ NEGRI, A.J., XU, L., e ADLER, R.F. A TRMM-Calibrated infrared rainfall algorithm applied over Brazil. *Journal of Geophysical Research*. 2002. 107, 15pp.

³⁷ PEREIRA FILHO, A. J., A. NEGRI e P. T. NAKAYAMA. An intercomparison of gauge, radar and satellite rainfall in the tropics. **1st Workshop on Precipitation Measurements**, IPWG/CGMS/WMO, Madrid, Spain. 2002.

conversão da temperatura de brilho em precipitação. Primeiramente, uma análise de valores mínimos de temperatura de brilho em imagens no canal infravermelho (~11µm) do satélite GOES-12 é feita para detectar nuvens convectivas. Neste procedimento inclui-se a filtragem das finas camadas de nuvens cirrus (nuvens altas e rasas em forma de filamentos) não precipitantes. As nuvens estratiformes são identificadas baseando-se nos modos de temperatura de cada sistema de nuvens depois de identificadas as nuvens convectivas. Desta forma, pode-se obter estimativas de precipitação para uma grande área de cobertura do satélite GOES-12 com razoável resolução espacial (4 x 4 km²) e temporal (a cada 30 min e/ou 3h).

A rede telemétrica hidrometeorológica é constituída atualmente por 38 estações meteorológicas e 42 estações hidrológicas, no Paraná (Figura 3.2). As estações hidrológicas medem precipitação e nível de água a cada 15 minutos, com transmissão via satélite a cada 4 horas; as estações meteorológicas medem dados horários de temperatura, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e radiação solar global, com transmissão horária.

Para a integração das estimativas de radar, satélite com a rede de pluviômetros foi utilizado o método de análise objetiva estatística (ANOBES), que de acordo com Calvetti et al (2006), Beneti et al (1998, 2002, 2006) e Pereira Filho (2004) é um dos mais eficientes esquemas de interpolação de dados. Este método foi inicialmente desenvolvido em 1963 e posteriormente recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (WMO) em 1970, para interpolação de dados hidrometeorológicos. Este método de interpolação (Daley³⁸, 1991 apud Calvetti et al 2006), embora simples e dedutível matematicamente, foi pouco aplicado operacionalmente até recentemente, por causa das limitações de processamento computacional. Com o advento de computadores com grande capacidade de processamento e armazenamento, e a um custo baixo, estas restrições ao uso do método ANOBES foram superadas.

O método ANOBES apresentado a seguir foi adaptado por Pereira Filho (1996) para ser utilizado com dados da rede de radares de última geração NEXRAD (ou WSR-88D) dos Estados Unidos da América. Posteriormente, este método foi aplicado com sucesso na reanálise de chuva acumulada horária da rede NEXRAD sobre uma bacia hidrográfica do Bureau of Reclamation em Oklahoma (Pereira Filho et al., 1998) e

³⁸ DALEY, R. **Atmospheric Data Analysis**. Cambridge University Press. 1991, 457pp.

atualmente está sendo aplicado e já implementado no SIMEPAR (Beneti et al.,2006, Calvetti et al., 2006).

A equação de Análise Objetiva Estatística (ANOBES) é dada por:

$$P_a(x_r) = P_b(x_r) + \sum_{n=1}^N W_n [P_o(x_n) - P_b(x_n)] \quad (23)$$

onde,

$P_a(x_r)$ é a precipitação analisada;

$P_b(x_r)$ é a precipitação estimada pelo radar (“background”);

$P_o(x_n)$ é a precipitação medida pelo pluviômetro (“observação”);

$P_b(x_n)$ é a precipitação estimada pelo radar no pluviômetro;

W_n é o peso *a posteriori* a ser determinado pela configuração de dados da rede;

N é o número total de pluviômetros;

x_r e x_n são as respectivas posições dos pontos de grade do radar e dos pluviômetros.

Para derivar os pesos, assume-se que os erros de observação e a precipitação estimada pelo radar (“background”) não têm correlação e não tenham viés. A variância esperada do erro da análise, derivada a partir da equação descrita abaixo, é minimizada em relação aos pesos W_n . A precipitação integrada é derivada da soma das estimativas obtidas pela análise objetiva estatística dividida pela somatória do quadrado das diferenças de cada campo analisado.

$$P_{Est}(x_i, y_i) = \frac{P_{Rad}(x_i, y_i) \times E_{Rad}^{-2}(x_i, y_i) + P_{Sat}(x_i, y_i) \times E_{Sat}^{-2}(x_i, y_i)}{E_{Rad}^{-2}(x_i, y_i) + E_{Sat}^{-2}(x_i, y_i)} \quad (24)$$

Onde

$$E_{Rad}(x_i, y_i) = (P_{Rad}(x_i, y_i) - P_{Obs}(x_i, y_i)) \quad (25)$$

$$E_{Sat}(x_i, y_i) = (P_{Sat}(x_i, y_i) - P_{Obs}(x_i, y_i)) \quad (26)$$

Assim a integração é ponderada pelas diferenças entre as estimativas de precipitação por radar e satélite e a precipitação medida na rede de pluviômetros. Desta forma, pretende-se obter o padrão espacial das medições por sensoriamento remoto e ponderá-la pela melhor medição volumétrica da intensidade de chuva obtida pela rede de pluviômetros.

Testes utilizando esta técnica foram feitos por Calvetti et al (2007) e Beneti et al (2006), mostrando que a integração das informações torna-se importante não apenas para a análise de sistemas isolados de precipitação, mas também para sistemas frontais fornecendo estimativas mais apropriadas para estudos hidrológicos em bacias hidrográficas. Calvetti et al (op cit), comenta que janeiro é um mês de muitos eventos rápidos de chuva e de intensidade forte a extrema (acima de 50 mm). Não raras vezes não é possível identificar tais fenômenos devido a variação espacial e temporal das chuvas. Mesmo assim, a integração das informações proporcionou o melhor campo de precipitação utilizando as melhores características dos sistemas de medição.

Para este trabalho, foram compilados os dados de estimativas de precipitação horária de janeiro de 2005 a dezembro de 2010. Tais dados estavam disponíveis em pontos de grade de 10x10km e de 4x4km para o estado do Paraná. Foram selecionados apenas os pontos que estavam inseridos nas bacias que drenam para a bacia do rio Iguaçu na RMC (Região Metropolitana de Curitiba). Decidiu-se utilizar as duas grades para avaliar se haveria ganho de qualidade nos resultados finais.

Os dados em formato netCDF (Network Common Data Form) foram extraídos das matrizes de 10x10 e 4x4km e transformados em arquivos texto (txt) para que pudessem ser utilizados em softwares de mais fácil compreensão. Para tal procedimento, foram utilizados programas desenvolvidos com a linguagem de programação “Python³⁹”.

Para a grade de 10x10km selecionaram-se 36 pontos e para grade de 4x4km foram 238 pontos. Para cada ponto obteve-se o valor de chuva estimada horária para o período compreendido, podendo-se assim montar as séries horárias. A Figura 3.3 ilustra as duas grades sobre Curitiba.

³⁹ O Python é uma linguagem de programação de alto nível criada por Guido Van Rossum, cuja primeira versão foi publicada em 1991. O Python suporta vários paradigmas de programação, como a programação estruturada, a programação orientada a objetos e também alguns elementos da programação funcional, mas nenhuma destas escolhas é imposta ao utilizador, sendo possível utilizar o paradigma que se achar mais adequado. A linguagem Python é referida usualmente como uma linguagem de “scripting” pois é usualmente aplicada nessas tarefas, mas não existe uma diferença de fundo entre um “script” e um programa, sendo o primeiro entendido como um programa simples. Um uso comum do Python é o de servir de linguagem de controle de componentes escritos em outra linguagem (como o C++), no entanto o Python não está limitado a tarefas simples, podendo ser usado em programas de qualquer dimensão. (SILVA, J. L. **Introdução à linguagem de programação Python.** 2008. Encontrado em http://www.fc.up.pt/pessoas/jsilva/python/curso_python.pdf)

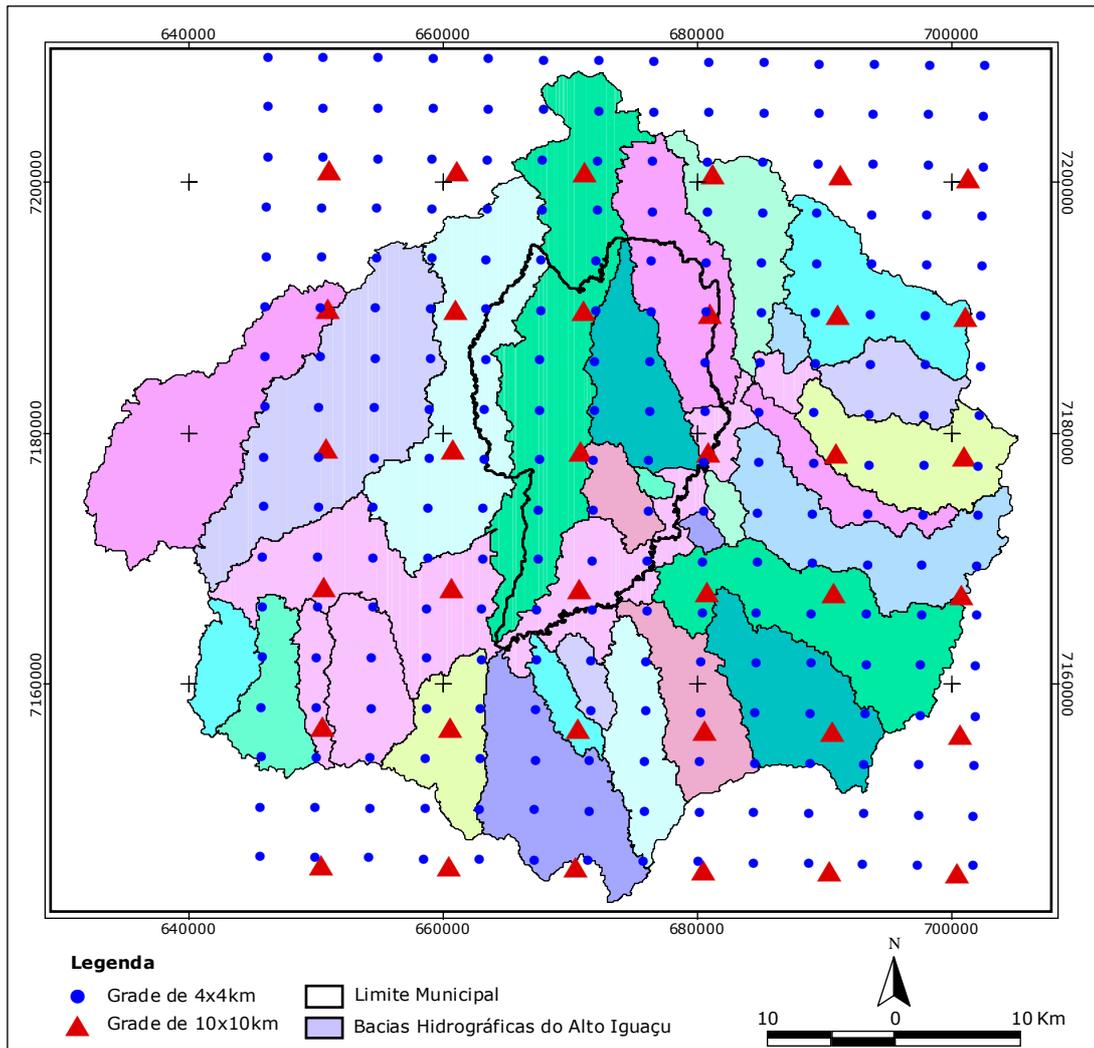


Figura 3.3 Grade de 10x10 e 4x4km

Para a avaliação inicial dos dados e de sua relação com os alagamentos em Curitiba, optou-se por se trabalhar tendo como base a unidade espacial bacia hidrográfica. Como a análise está restrita aos limites de Curitiba (em função de os dados de alagamentos existirem apenas para Curitiba), selecionaram-se apenas as bacias que estão dispostas dentro dos limites do Município, sendo elas: i) Bacia hidrográfica do rio Barigui; ii) Bacia hidrográfica do rio Belém; iii) Bacia hidrográfica do rio Atuba-Bacacheri; iv) Bacia hidrográfica do rio Iguaçu; v) Bacia Hidrográfica do Ribeirão dos Padilhas e vi) Bacia hidrográfica do Passaúna (Figura 1.2)

Para tanto, em função de serem bacias de tamanho pequeno, as duas grades não estarem dispostas de maneira satisfatória em todas elas e, utilizar uma média aritmética simples para mensurar o valor de chuva, optou-se por calcular a chuva média para cada bacia.

Quando trata-se de propriedades médias é importante utilizar-se de métodos que garantam uma boa estimativa do que está acontecendo sobre a região a cada momento. Na literatura são descritos vários métodos para tal tipo de contabilidade, como média aritmética dos postos mais próximos, o método de Thiessen, e o método das isoietas. De acordo com Breda (2008), em geral, o procedimento do cálculo de uma propriedade média, consiste em realizar uma média ponderada entre dados de estações próximas, cabendo ao método atribuir um determinado peso para cada posto, com relação à área em que se deseja descobrir o valor médio de alguma propriedade.

Sendo assim, utilizaram-se os métodos de *Thiessen* e do *Inverso da Distância ao Quadrado* para o cálculo da chuva média na bacia. O método *do Inverso da Distância ao Quadrado*, também denotado por r^{-2} neste trabalho, consiste de acordo com Breda (2008), em utilizar uma média ponderada pelo inverso da distância ao quadrado, entre o posto em questão e postos próximos (neste caso os pontos de grade), de modo que os dados medidos nas estações mais próximas sejam mais influentes no cálculo da propriedade média para a toda a bacia.

A escolha de tais métodos se deu em função dos mesmos serem extensivamente discutidos em trabalhos científicos e ainda utilizados para o cálculo de chuva média para diversas bacias de maneira operacional proporcionando bons resultados.

A equação abaixo, descreve a formulação matemática deste procedimento, sendo P o valor calculado da propriedade, no caso precipitação, r_i a distância entre o posto de referência e o posto i , p_i a precipitação ocorrida no posto i , e N o número de postos utilizados para o cálculo.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{p_i}{r_i^2} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{r_i^2} \right)} \quad (28)$$

O método de Thiessen (Tucci, 1993), considera que cada estação possui um peso proporcional a sua área de influência sobre a bacia. A equação demonstra a formulação matemática deste método, onde P é o valor de precipitação médio, p_i é a precipitação no posto i , e δ_i é seu respectivo peso, e N é o número de postos empregados no cálculo.

$$P = \sum_{i=1}^N \delta_i p_i \quad (29)$$

O somatório dos pesos que exercem influência em uma dada região deve ser sempre igual a 1, e o mesmo é calculado pela fração de sua área de influencia sobre a área da região.

A diferença entre os dois métodos é que em Thiessen utilizou-se apenas os pontos de grade mais próximos a bacia, enquanto que em r^{-2} são considerados todos os pontos para todas as bacias, embora também seja atribuído peso maior aos pontos mais próximos.

Com os dados de chuva calculados para cada bacia utilizando os dois métodos e, com o intuito de identificar qual a influência de dias anteriores ao que ocorreu o alagamento, convencionou-se utilizar o dia da ocorrência e três dias anteriores a este, por entender que a ocorrência de alagamentos é dinâmica, ou seja, podem ocorrer com chuvas torrenciais ou ainda ter influência de chuvas ocorridas em dias anteriores. Para tanto, foi calculada a chuva acumulada de 6 em 6 horas obtendo-se 16 valores. Foram elaborados gráficos de barras, plotando a chuva de 6 em 6 horas para cada dia em que ocorreram alagamentos em Curitiba. A Figura 3.4 é um exemplo dos gráficos elaborados. Tais gráficos serviram ainda para avaliar as diferenças entre os valores calculados utilizando Thiessen e r^{-2} .

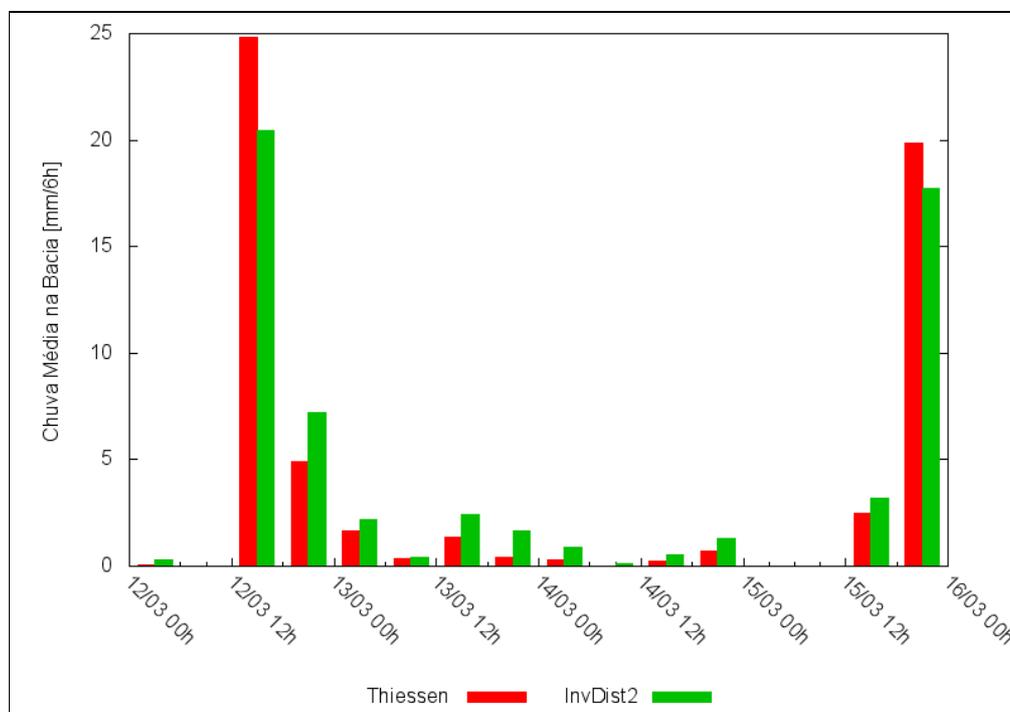


Figura 3.4 Exemplo de gráfico elaborado para identificar a dinâmica da chuva no dia da ocorrência e em três dias anteriores na bacia do rio Barigui; Dia 15/03/2007

3.5 Disseminação das Previsões de Probabilidade

Para caracterizar a ocorrência de alagamentos em Curitiba, neste trabalho optou-se por apresentar duas variáveis representativas para esta distribuição que são:

- (1) Probabilidade de ocorrência de alagamentos (PROB);
- (2) Número esperado de alagamentos (NEA).

A variável PROB pode ser representada por:

$$PROB = 1 - P[NA = \emptyset] \quad (30)$$

Onde:

NA = Número de alagamentos

A variável NEA pode ser representada por :

$$NEA = \sum_{i=0}^{NMA} P[NA = i]i \quad (31)$$

Onde:

NMA: Número máximo de alagamentos

Com tal definição, a variável PROB foi calculada utilizando-se de regressão logística e rede neural do tipo SOM, e o NEA foi calculado apenas via rede neural.

3.6 Software Estatístico

O software selecionado para trabalhar com os dados de precipitação foi o Minitab. Este software foi criado em 1972 por três professores da Pennsylvania State University com o objetivo de mostrar as aplicações da estatística tornando seu estudo mais interessante.

O Minitab tornou-se rapidamente uma referência no meio acadêmico, sendo utilizado, atualmente, em mais de 4.000 universidades e tendo mais de 300 livros de estatística utilizando em seus exemplos este programa. A partir de 1990 os

desenvolvedores do programa incluíram em seus objetivos o atendimento das necessidades da indústria e negócios.

Sendo assim, algumas metodologias estatísticas necessitam de cálculos mais complexos e sua utilização só é viabilizada por meio da utilização de algum programa estatístico. Este é o caso da Regressão Logística cuja técnica será detalhada no item a seguir.

3.7 A Regressão Logística

Com o objetivo de identificar a previsão da probabilidade de ocorrência de alagamentos nas bacias hidrográficas, inicialmente elaborou-se diversos testes com as três funções de ligação (Logit, Normit e Gompit). Os resultados de tais testes foram compilados e pode-se então escolher qual a melhor função de ligação bem como qual o melhor método (Inverso da Distância ao Quadrado ou Thiessen) para o cálculo da chuva média.

Os dados de entrada foram constituídos pelas séries de chuva acumulada de 6 em 6 horas para 4 dias, gerando portanto, 16 valores consecutivos de chuva (16 dimensões de chuva acumulada), sendo que o primeiro valor refere-se a chuva acumulada de 6h no início do 3º dia anterior ao da ocorrência e assim sucessivamente até o último valor que refere-se a chuva acumulada das 18 até as 24h do dia da ocorrência. A última coluna da tabela possui valor 0 (zero) ou 1 (um). Esta coluna tornou-se necessária em função de o modelo preditivo logístico trabalhar com variáveis binárias, ou seja, o cálculo do coeficiente logístico compara a probabilidade de um alagamento ocorrer (1) com a probabilidade de ele não ocorrer (0). A Tabela 3.3 mostra o exemplo de tabela construída que serviu de base para entrada no Minitab.

Tabela 3.3 – Exemplo de tabela construída que serviu de base para entrada no Minitab

Ano	Mês	Dia	6|3	12|3	18|3	....	6|0	12|0	18|0	24|0	Sit.
2005	1	5	0	0	0	....	0,91	0,01	7,08	1,03	1
2005	1	6	0	0	1,62	....	0	0	6,52	1,5	0
2005	1	7	10,17	1,64	3,96	....	1,25	0	0,57	0,18	1

Data
Chuva Ac. de 6 em 6h
Sit. de ocorrência

Para um determinado modelo preditivo, existem basicamente duas fases que devem ser seguidas. A primeira de “Calibração” e a segunda de “Verificação”. A calibração tem por finalidade promover ajustes de alguns parâmetros do modelo para que os resultados simulados tenham comportamento semelhante aos reais ou experimentais. Já a verificação, considerando que modelos são construídos a partir de uma série de pressupostos e simplificações sobre o comportamento do sistema real, consiste em avaliar se esses pressupostos e simplificações foram corretamente implementados no modelo computacional. A partir disso pode-se então, calcular a acurácia do modelo gerado e avaliar seus resultados via determinado método ou teste.

Para a calibração, foram utilizados os dados de 01/01/2005 a 31/12/2009 e para a verificação os dados de 01/01/2010 a 31/12/2010. Tal definição se deu em função da necessidade de se utilizar um período maior de dados para que o modelo possa ser treinado e, a partir de seu resultado, testado utilizando-se um período menor de dados. Ainda, levou-se em consideração para tal definição, a relação entre o número de ocorrências totais de alagamentos em cada ano e o número de dias com ocorrência para cada ano (Tabela 3.4). Como o número de dias com ocorrência em cada ano permaneceram muito próximos com exceção do ano de 2007, optou-se então por se utilizar o ano de 2010 para testar o modelo.

Tabela 3.4 – Relação entre número de ocorrências de alagamentos e de dias com ocorrência de alagamentos

Anos	2010	2009	2008	2007	2006	2005
Número de Ocorrências	297	492	251	514	522	277
Dias com Ocorrências	57	66	47	34	52	47

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

Com tais considerações a cerca de quais períodos deveriam ser utilizados para a calibração e verificação do modelo, partiu-se para a geração das previsões probabilísticas para cada dia do período considerado na calibração.

Para tanto, no software MINITAB, existe a ferramenta de regressão logística binária. Utilizando-se desta ferramenta gerou-se as previsões probabilísticas de ocorrência de alagamentos para cada dia, utilizando-se as três modalidades de funções de ligação, ou

seja, “Logit, Normit/Probit e Gompit” e ainda os dados de chuva calculados via método de Thiessen e r^2 .

Os resultados foram gerados individualmente para cada bacia hidrográfica (Barigui, Belém, Iguaçu, Atuba e Ribeirão dos Padilhas) e ainda para o município de Curitiba. Não foi considerada a bacia hidrográfica do Passaúna em função de possuir um número praticamente insignificante de ocorrência de alagamentos.

A idéia de gerar os resultados por bacia e também para o município de Curitiba está centrada no fato de poder avaliar e selecionar se deveria ser gerado um modelo para cada bacia ou então um modelo geral para Curitiba e posteriormente aplicado nas diferentes bacias hidrográficas. Ainda, por experiências relatadas, nem sempre o melhor modelo calibrado gera os melhores resultados na verificação e vice-versa.

3.8 Mapas Auto-Organizáveis (SOM)

Como todas as redes neurais, as de Kohonen são formadas por um conjunto de elementos simples, chamados neurônios, organizados em estruturas mais complexas, que funcionam em conjunto: a rede.

Cada neurônio é uma unidade de processamento que recebe estímulos (de fora do sistema ou de outros neurônios) (Figura 3.5), e produz uma resposta (para outros neurônios ou para fora do sistema). Tal como os neurônios do cérebro, os das redes neurais são interligados entre si por ramificações através das quais os estímulos são propagados. O processo de aprendizado consiste em reforçar as ligações que levam o sistema a produzir respostas mais eficientes.

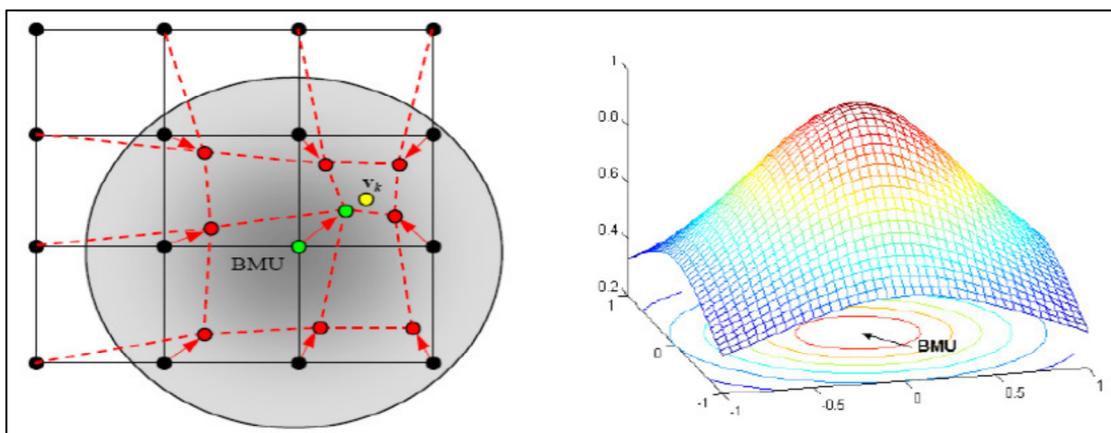


Figura 3.5 Ilustração da adaptação dos pesos de uma rede de Kohonen (Zuchini, 2003)

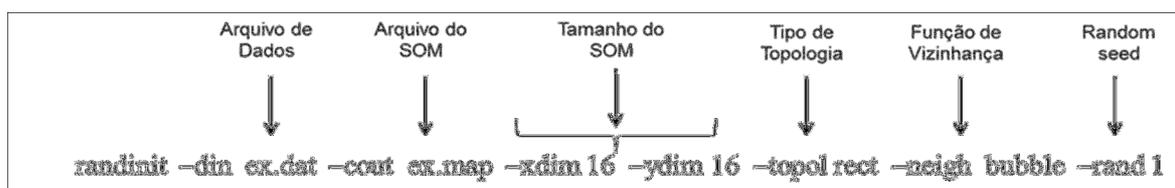
Para a geração das previsões probabilísticas de alagamentos via a rede SOM, foi definido o mesmo conjunto de preditores utilizados para o modelo regressivo logístico, sendo constituídos pelas séries de chuva acumulada de 6 em 6 horas para 4 dias ou seja, chuva ao longo de 96 h, a partir de sua decomposição em 16 valores recursivos de 6 horas (diferenças entre a chuva acumulada no tempo t e $t-6$).

Com tais dados partiu-se para a inicialização do SOM, em que foram feitas diversas simulações e mensurados os erros. O conjunto de pesos iniciais geralmente é gerado aleatoriamente com valores pequenos e ao longo das simulações este valor deve ser alterado até encontrar o menor erro.

Este procedimento teve como objetivo escolher a topologia adequada, definir o número de interações para a rede e ainda gerar as curvas (Codebooks) que, baseadas nos dados de entrada, visam reproduzir os padrões, neste caso, os padrões de chuva para 4 dias. Existem metodologias, para definição de todos estes procedimentos, no entanto, normalmente estas escolhas são feitas de forma empírica através de inúmeros testes e avaliações (LUDWIG JR E MONTGOMERY, 2007). Por isso, a definição da configuração de redes neurais é ainda considerada uma arte que requer certa experiência por parte de seus usuários.

Neste momento, foram utilizados para o treinamento da rede, além da série de dados organizada, ou seja, do dia 01/01/2005 até 31/12/2009, dez (10) séries aleatórias, com o intuito da prevenção de tendências associadas à ordem de apresentação dos dados. Em determinadas situações, pode ser necessário pré-processar os dados, através de normalizações, escalonamentos e conversões de formato para torná-los mais apropriados à sua utilização na rede. Para este estudo não foi necessário utilizar-se deste pré-processamento.

Os procedimentos foram executados utilizando o pacote de treinamento SOM desenvolvido por Kohonen, tendo como base o sistema operacional Linux bem como todas as funções para inicialização do SOM, treino e mensuração do erro, chamado de erro de quantização. A Figura 3.6 mostra algumas linhas de comando utilizadas no SOM.



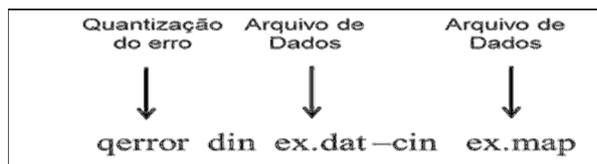
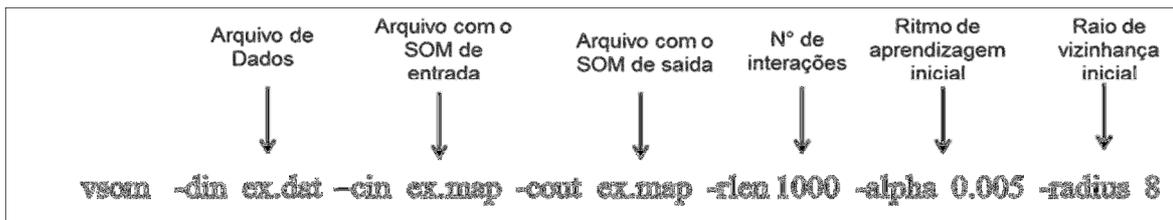


Figura 3.6 Exemplo de linhas de comando utilizadas para inicialização do SOM e mensuração dos erros.

Após estes procedimentos e mensuração dos erros, constatou-se que os erros associados tanto a série padrão como para as séries aleatórias eram praticamente iguais, ficando decidido que seria utilizada apenas a série padrão, já que não houve tendências associadas à ordem de apresentação dos dados. Durante este procedimento, teve-se o cuidado de observar e evitar o que é conhecido como problema de “over-training”, ou seja a rede se especializa no conjunto de dados do treinamento e perde a capacidade de generalização.

A Figura 3.7, mostra em forma de gráfico os erros associados a um determinado número de codebooks após o término do treinamento. Observa-se que o erro é maior quando o número de codebooks é pequeno e vai diminuindo na medida em que o número de codebooks é aumentado. No entanto, a partir de um certo limiar, neste caso acima de 300 codebooks, o erro praticamente torna-se estável.

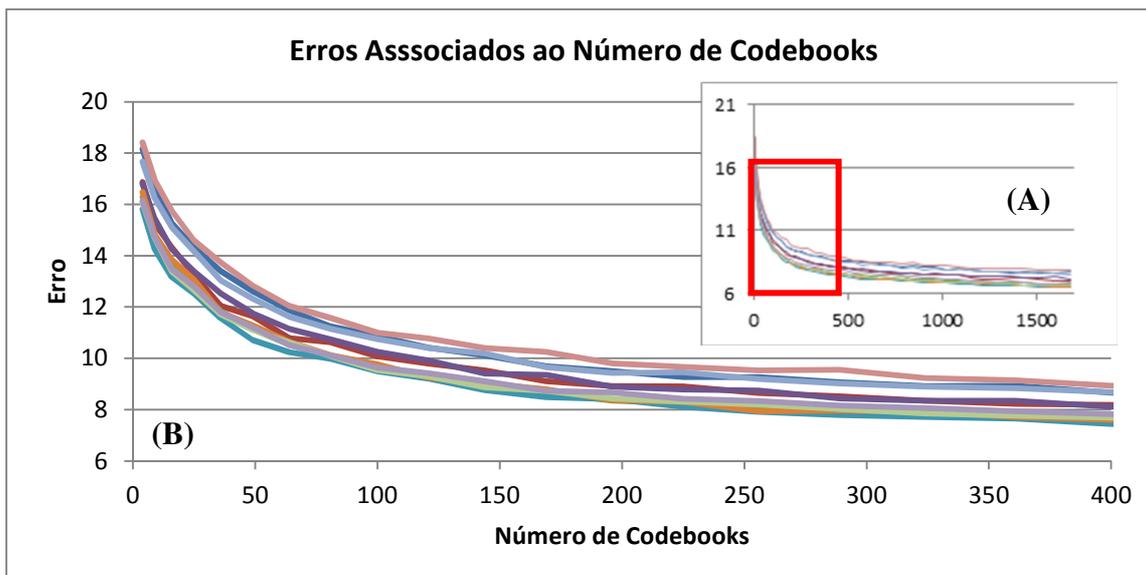


Figura 3.7 Gráfico dos erros associados a definição do número de codebooks em diferentes simulações. Em (B) visão aumentada do gráfico (A).

Como os codebooks são traduzidos como os padrões de chuva, torna-se inviável utilizar um número muito elevado de codebooks e também um número muito pequeno. Observando-se a relação entre erro e número de codebooks, após os treinamentos, testes e mensurações dos erros, definiu-se que seriam considerados e gerados 8 arquivos de codebooks (saída) com topologia retangular, 4 com dimensão de 10 x 10, portanto, 100 (cem) codebooks (padrões de chuva) e mais 4 com dimensão de 16 x 16, portanto 256 codebooks.

Sabe-se que o objetivo do codebook é a formação de padrões que representem as características de certo momento e que seu uso é baseado na comparação entre um elemento do codebook e o arquivo de entrada através de sua distância euclidiana. O codebook escolhido para representar o evento será então o de menor distância.

Tendo-se como base estes 8 arquivos de codebooks, partiu-se para a fase de aprendizagem e geração das previsões probabilísticas

Para a fase de aprendizagem e previsão, foi utilizada a aprendizagem do tipo fuzzy em que a função de pertinência foi a gaussiana, ajustada dinamicamente conforme a amostra apresentada. Para tanto, foram utilizados dois programas. O primeiro chamado “POVOASOM.sh” e o segundo chamado “PREVESOM.sh”, ambos escritos em linguagem “Fortran” e produzidos por Leite (2008).

O Povoasom.sh utiliza o arquivo de codebooks e o arquivo de entrada para a rede, procurando estabelecer a relação de vizinhança entre os neurônios. O objetivo da função de

vizinhança é controlar o nível de atuação dos neurônios em torno do neurônio vencedor do processo competitivo. Explicações mais detalhadas são encontradas no item 2.9.2 e 2.9.3. Este programa tem como saída um arquivo com extensão .mtx que serviu de entrada para o segundo programa.

O Prevesom.sh utiliza como entrada o arquivo de codebooks, o arquivo.mtx gerado anteriormente e ainda o arquivo de entrada para a rede, sendo que a partir desses três arquivos calcula as probabilidades associadas a série de entrada.

Assim como na regressão logística, os série de dados utilizados foi de 01/01/2005 a 31/12/2009 para a calibração e 01/01/2010 a 31/12/2010 para verificação.

A Figura 3.8 ilustra um diagrama com as etapas seguidas desde a inicialização da rede até a previsão probabilística e do número esperado de alagamentos.

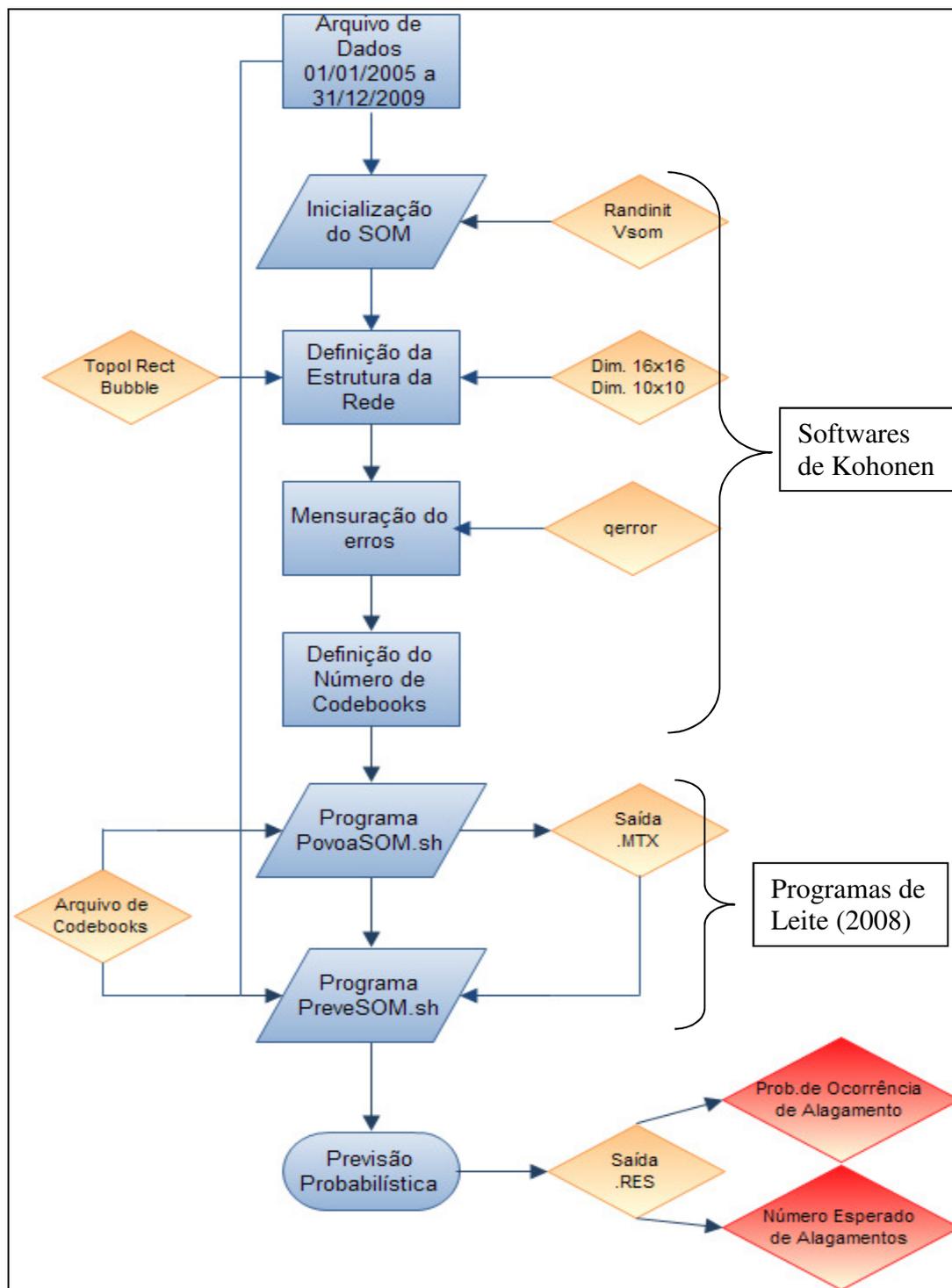


Figura 3.8 Diagrama ilustrando as etapas utilizadas para elaborar a previsão probabilística via o SOM

3.8.1 Indicadores de Desempenho

De acordo com Krzysztofowicz (2001) citado por Alvim, Breda e Sabóia (2011), nas previsões probabilísticas, as incertezas devem tomar a forma de probabilidade

preditiva, entendida como uma medida numérica do grau de acerto acerca da ocorrência de um evento, condicional a todas as informações (dados, modelos e julgamentos) utilizadas no processo de previsão.

Neste sentido, diversos métodos já testados e difundidos na literatura podem ser utilizados para avaliar a acurácia e desempenho de um determinado modelo. Neste trabalho foi utilizado como método a Curva ROC (Relative Operating Characteristic) e a área sob a curva bem como os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento, métodos discutidos nos itens 2.10.1, 2.10.2 e 2.10.3.

De acordo com Leite (2009), o aspecto fundamental embutido na utilização da Curva ROC é a possibilidade de análise do desempenho do um sistema predictor como um todo e não de uma seleção particular de situação operacional, que normalmente envolverá aspectos de qualidade conflitantes.

Assim, para a construção da Curva ROC, foi considerada a taxa POD e PoFD que são:

POD (*probability of detection*)

A taxa PoD pode ser definida como sendo a proporção de ocorrências que foram corretamente previstas. É a probabilidade condicional de que a previsão seja de ocorrência dado que o evento foi observado. Este indicador pode variar de 0 a 1 tendo seu melhor valor em 1.

PoFD (*probability of false detection*)

A taxa PoFD de falso alerta é a proporção de não ocorrências que foram incorretamente previstas. Assim como o PoD, este indicador varia de 0 a 1, porém tem-se como melhor valor o 0.

Além da avaliação via a curva ROC, foi calculada a área sob a curva (AUC), bem como utilizados os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento.

3.9 Avaliação da Melhor Estimativa

A partir do arquivo de saída do SOM, com extensão “.res”, além da previsão da probabilidade de ocorrência, é gerado ainda o número esperado de alagamentos (NEA), como a melhor estimativa quantitativa do número de ocorrências esperadas para o dia.

Para verificar e quantificar se o modelo gerado via SOM possui também capacidade de ser utilizado como predictor do número de alagamentos calculou-se o *Skill Score* (SS),

comparando o número observado de alagamentos (NOA) com o NEA. O índice SS quantifica a variação relativa do erro médio quadrático (EMQ) do NEA, relativamente a um EMQ de referência (ver item 2.11.4). Quanto maior o SS, maior o ganho (em percentagem) da utilização do NEA previsto pelo modelo.

Para calcular o SS, foram consideradas três situações para o EMQ_{ref} :

- i. NEA igual a climatologia (média do número observado de alagamentos para o período);
- ii. NEA sempre igual a 0 (zero);
- iii. NEA igual a persistência⁴⁰.

Dessa forma pode-se verificar o quanto o NEA previsto pelo modelo pode agregar em ganho (índice de melhoria) quando comparado com a climatologia, sendo sempre zero ou ainda com a persistência.

3.10 Análise de Significância dos Resultados

Em muitos problemas de ordem climatológica, os valores relevantes de uma determinada resposta ou variável aleatória são os parâmetros de uma distribuição de probabilidades, como no caso deste estudo, em que além da previsão probabilística propriamente dita, foi também calculado o NEA.

Na prática, geralmente os dados disponíveis não constituem uma amostra significativa o bastante para representar de forma adequada determinado fenômeno. Assim, um dos desafios da estatística, uma vez que na prática em meteorologia, trabalha-se com amostras finitas da variável aleatória, é o processo conhecido como inferência estatística, que tenta determinar a precisão de estimativas de parâmetros estatísticos obtidas a partir de uma dada amostra ou conjunto de dados.

Existem na literatura procedimentos teóricos para avaliação de incertezas associadas a vários parâmetros estatísticos de uma amostra. No entanto, no que tange aos parâmetros de ordem, como os quantis, mínimos e máximos, as expressões analíticas normalmente tornam-se bastante complicadas.

Efron (1979) propôs uma técnica de simulação numérica chamada *Bootstrap* para avaliar tais incertezas. O *Bootstrap* é um procedimento robusto de simulação estatística

⁴⁰ Considerando que o número de alagamentos no futuro (previsão) será igual ao número de alagamentos observado atual.

para atribuir medidas de precisão a estimativas de parâmetros estatísticos. Um dos atrativos deste método é que o mesmo é capaz de responder muitas questões estatísticas reais sem ter que lançar mão de fórmulas matemáticas complexas.

O *Bootstrap* é um método de reamostragem computacionalmente intensivo para inferência estatística, originalmente desenvolvido para fornecer medidas de vício e variabilidade de estimativas. Posteriormente ele foi estendido para a construção de intervalos de confiança, testes de hipóteses e situações inferenciais mais complexas (EFRON e TIBISHRANI, 1993). Pode ser considerado tanto uma alternativa para o processo inferencial como também uma ferramenta de diagnóstico.

Sendo assim, dada uma estimativa de um determinado parâmetro estatístico, calculado a partir de uma amostra de dados, dois dos objetivos principais do Bootstrap são: (a) estimar o erro-padrão da referida estimativa e (b) estimar um intervalo de confiança apropriado.

A reamostragem em si, consiste em sortear com reposição, dados pertencentes a uma amostra denominada “mestre”, de modo a formar novas amostras. Reamostrar permite diferentes alternativas para se encontrar desvios padrões e intervalos de confiança através da análise de um conjunto de dados. Tal reamostragem baseada nos dados da amostra mestre é denominada não-paramétrica uma vez que a distribuição de probabilidades da estatística do parâmetro a ser estimado é desconhecida. Através desta técnica é possível obter a distribuição amostral de um parâmetro a partir da amostra original.

Tem como vantagens a generalidade com que pode ser aplicada, pois requer que menos suposições sejam feitas e, geralmente fornece respostas mais precisas além de favorecer o entendimento.

Para realizar o teste utilizando a técnica Bootstrap é preciso colher uma amostra de tamanho “n” que foi denominada amostra mestre. Essa amostra deve ser coletada de maneira planejada, uma vez que se essa amostra for mal tirada e não representar bem a população, a técnica de Bootstrap não levará à resultados confiáveis.

Hesterberg et al. (2003) afirmam que a amostra mestre representa a população da qual foi retirada. As reamostras desta amostra mestre representam o que se deve obter quando são retiradas muitas amostras da população original. A distribuição Bootstrap da estatística, baseada em muitas reamostras, representa uma distribuição amostral desta estatística. Esta característica faz com que uma das utilidades da técnica Bootstrap seja checar a normalidade da distribuição original da estatística em foco.

Para a escolha deste teste estatístico teve-se como premissa que tanto para a previsão probabilística quanto para o NEA não existem situações futuras conhecidas, ou seja, necessita-se simular situações futuras a partir de dados reamostrados.

Neste trabalho, o Bootstrap foi utilizado com intuito de avaliar do ponto de vista estatístico, a significância das medidas de qualidade da previsão probabilística gerada via a rede SOM para o período de verificação dos modelos (dados gerados para o ano de 2010). Portanto, a partir dos dados reamostrados foram calculados os valores da área sob a curva ROC para a previsão probabilística e o SSEMQ (Skill Score do erro Médio Quadrático) para o NEA.

Uma vez geradas as reamostras, foi também calculado a estatística relacionada a média, desvio padrão e coeficiente de autocorrelação do número observado de alagamentos e comparada com a amostra original, sendo possível portanto, avaliar estatisticamente o quanto a reamostragem foi fidedigna.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1 Alagamentos em Curitiba – Características e Dinâmica

4.1.1 Análise do Número de Alagamentos

Os alagamentos de certa forma acompanham o processo de expansão urbana de Curitiba, ou seja, têm aumentado concomitantemente com a incorporação de novos espaços ocupados, sobretudo em áreas consideradas de risco. Em outros estudos Zanella (2006) e Deschamps (2004) têm demonstrado a falta de sincronia entre as ações antrópicas e as leis da natureza.

Analisando-se a Figura 4.1 e a Tabela 4.1, que traça um paralelo entre o número total de ocorrências de Defesa Civil registradas (queda de árvores, incêndios, deslizamentos, erosão entre outras) e apenas as que dizem respeito aos alagamentos, nota-se que do total de ocorrências para o período analisado, em média, 44,5% são de alagamentos.

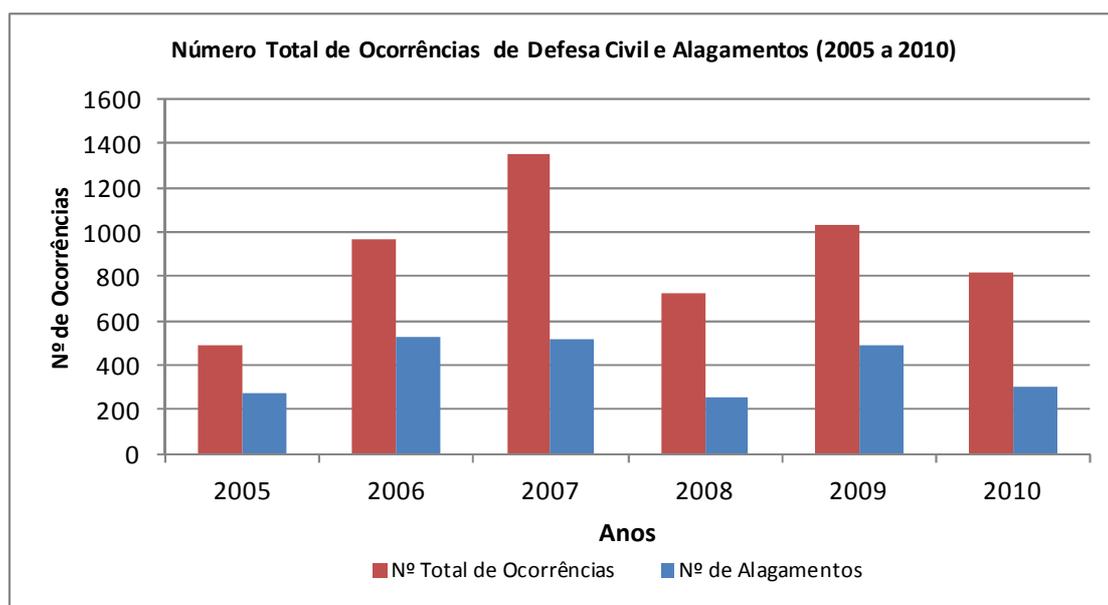


Figura 4.1 Número total de ocorrências de Defesa Civil e número de alagamentos registrados em Curitiba entre 2005 e 2010

Tabela 4.1 – Número total de ocorrências de Defesa Civil e alagamentos registrados em Curitiba entre 2005 e 2010

Ano	Nº de ocorrências	Nº de alagamentos	Percentagem de Alagamentos em Relação ao Total de Ocorrências
2005	493	277	56,19%
2006	964	522	54,15%
2007	1347	514	38,16%
2008	719	251	34,91%
2009	1033	492	47,63%
2010	821	297	36,18%
Média	896	392	44,53%

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

A Figura 4.2 ilustra o número total de alagamentos no período compreendido entre 2005 a 2010. Nota-se que os anos de 2006, 2007 e 2009 foram os que tiveram maior número de ocorrências, com 522, 514 e 492 respectivamente. No entanto, no comparativo com o número total de ocorrências, verifica-se que em 2005 e 2006 mais de 50% de todas as ocorrências registradas foram de alagamentos.

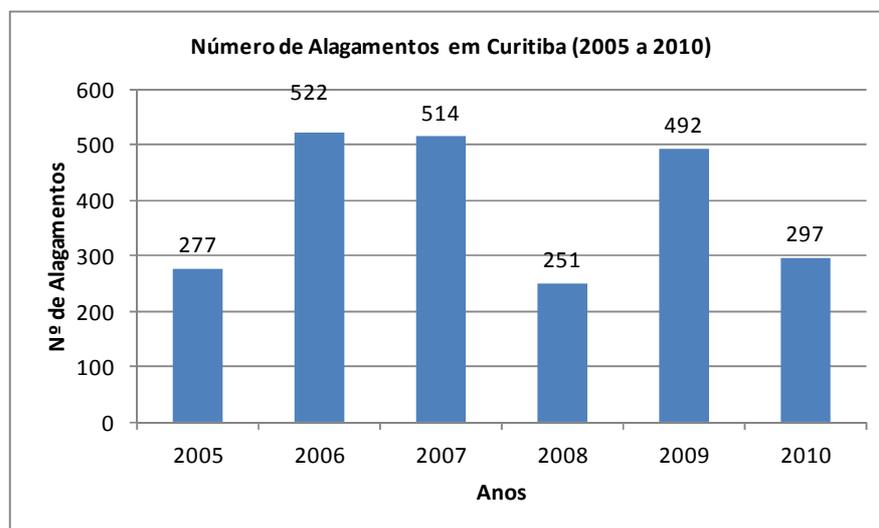


Figura 4.2 Número total de alagamentos registrados em Curitiba entre os anos de 2005 e 2010

A partir dos números apresentados, é possível verificar que os alagamentos constituem-se no principal e maior problema enfrentado pela Defesa Civil municipal, já que perante o total de ocorrências registradas para todo o período analisado, praticamente 45% estão relacionadas aos alagamentos. Isso demonstra ainda o motivo pelo qual os

órgãos públicos responsáveis por gerenciar as atividades e propor políticas públicas com intuito de mitigar os impactos advindos de tal problema têm preocupação constante quando da previsão de chuvas de maior intensidade.

Levando em consideração a importância dos alagamentos perante o cenário de problemas enfrentados em Curitiba, resolveu-se espacializar as ocorrências de alagamentos, objetivando verificar a existência de áreas freqüentemente atingidas e até mesmo se existia a concentração e/ou repetição de registros em determinadas áreas no município. As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram a espacialização dos dados, primeiramente distinguidos por ano e posteriormente de forma conjunta.

Analisando as mesmas figuras apenas de forma empírica, nota-se que não necessariamente em todos os anos repetem-se os locais em que ocorreu o alagamento, mas em algumas porções da bacia são registrados alagamentos em todos os anos, mostrando certo padrão de repetição. Sobre o fato de observar-se modificações nos locais de ocorrência, infere-se que esteja ligado principalmente ao trabalho que a prefeitura municipal de Curitiba, via secretaria de obras e de meio ambiente executa no município, desobstruindo bueiros, manilhas e bocas-de-lobo entupidas, retirando lixo das galerias pluviais e ainda desassoreamento lagos e rios, tendo com principal consequência a expectativa da redução do número de alagamentos. No entanto, é possível também verificar que em algumas porções do município há sim registros anuais de alagamentos, com padrão de repetição.

Ainda investigando a distribuição espacial dos alagamentos em Curitiba, foram elaborados os cartogramas de densidade a partir do “Estimador de Densidade de Kernel” (Figura 4.5).

A análise levando em conta os diferentes anos mostra que existe variabilidade nos padrões de densidade para cada ano, ou seja, ora a densidade é mais alta em uma determinada bacia, ora a densidade é mais baixa nesta mesma bacia. No entanto, mesmo com tal variabilidade, sob outra perspectiva, e elaborando-se uma análise levando em consideração todo o período, os cartogramas deixam evidente que algumas áreas são atingidas freqüentemente pelos alagamentos, estando as mesmas representadas por círculos brancos sobre a Figura 4.5. Tais locais são: a porção média e sul da bacia do rio Barigui, praticamente toda a bacia do Ribeirão dos Padilhas, a porção centro-sul da bacia do Atuba e a porção centro-sul da bacia do rio Belém.

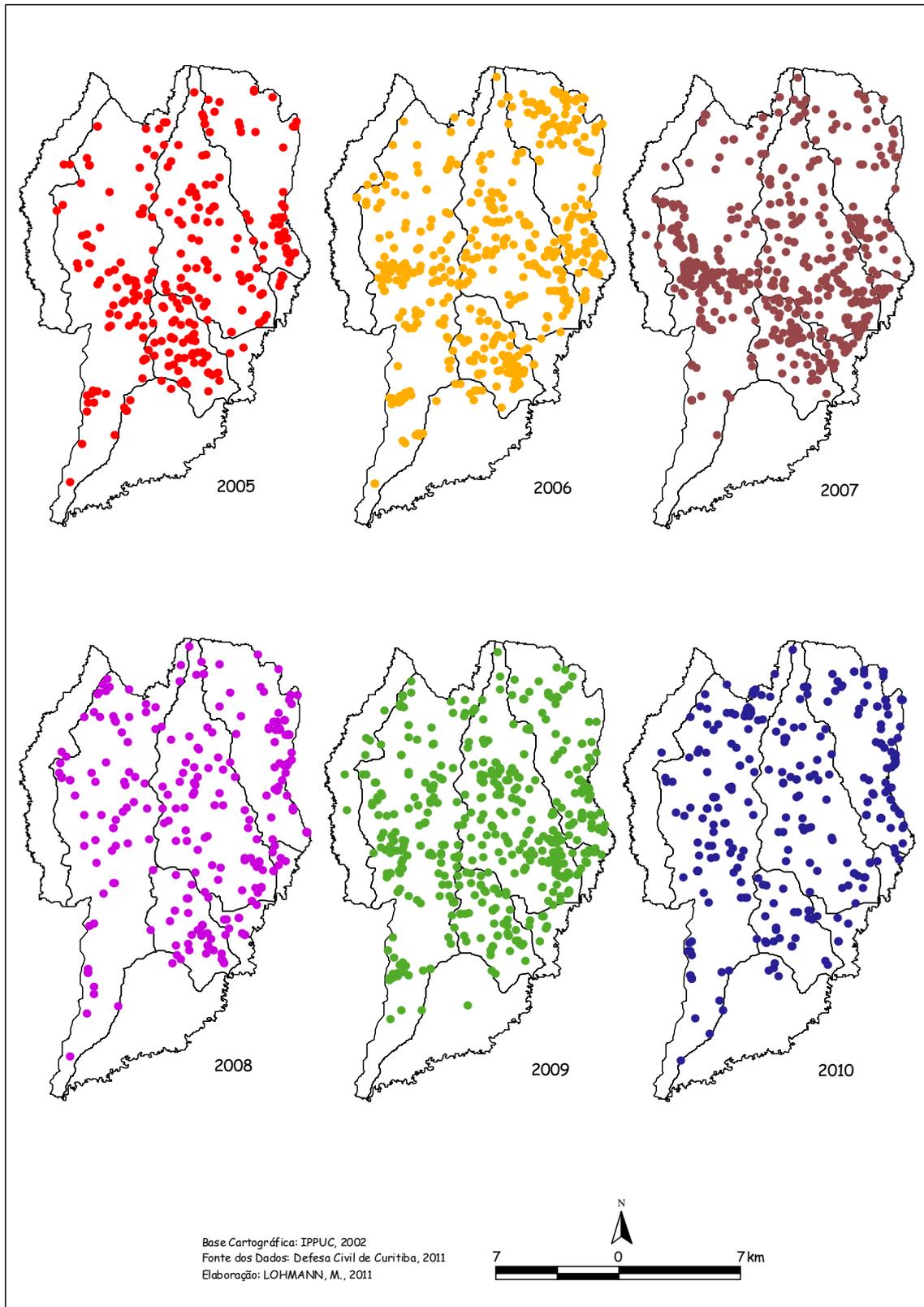


Figura 4.3 Ocorrências de alagamentos em Curitiba distinguidos por ano

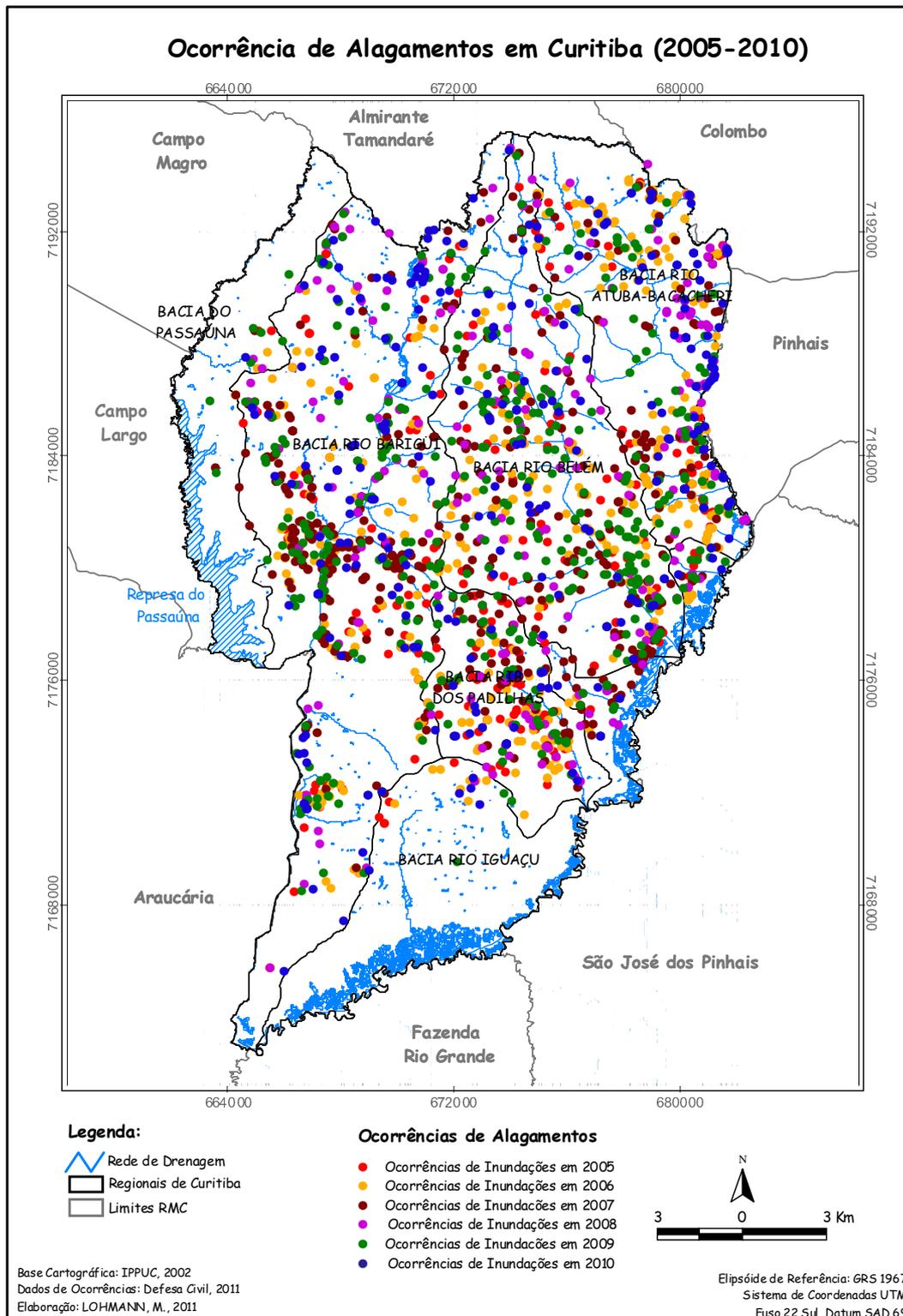


Figura 4.4 Espacialização de todas as ocorrências de alagamentos registradas em Curitiba entre os anos de 2005 e 2010

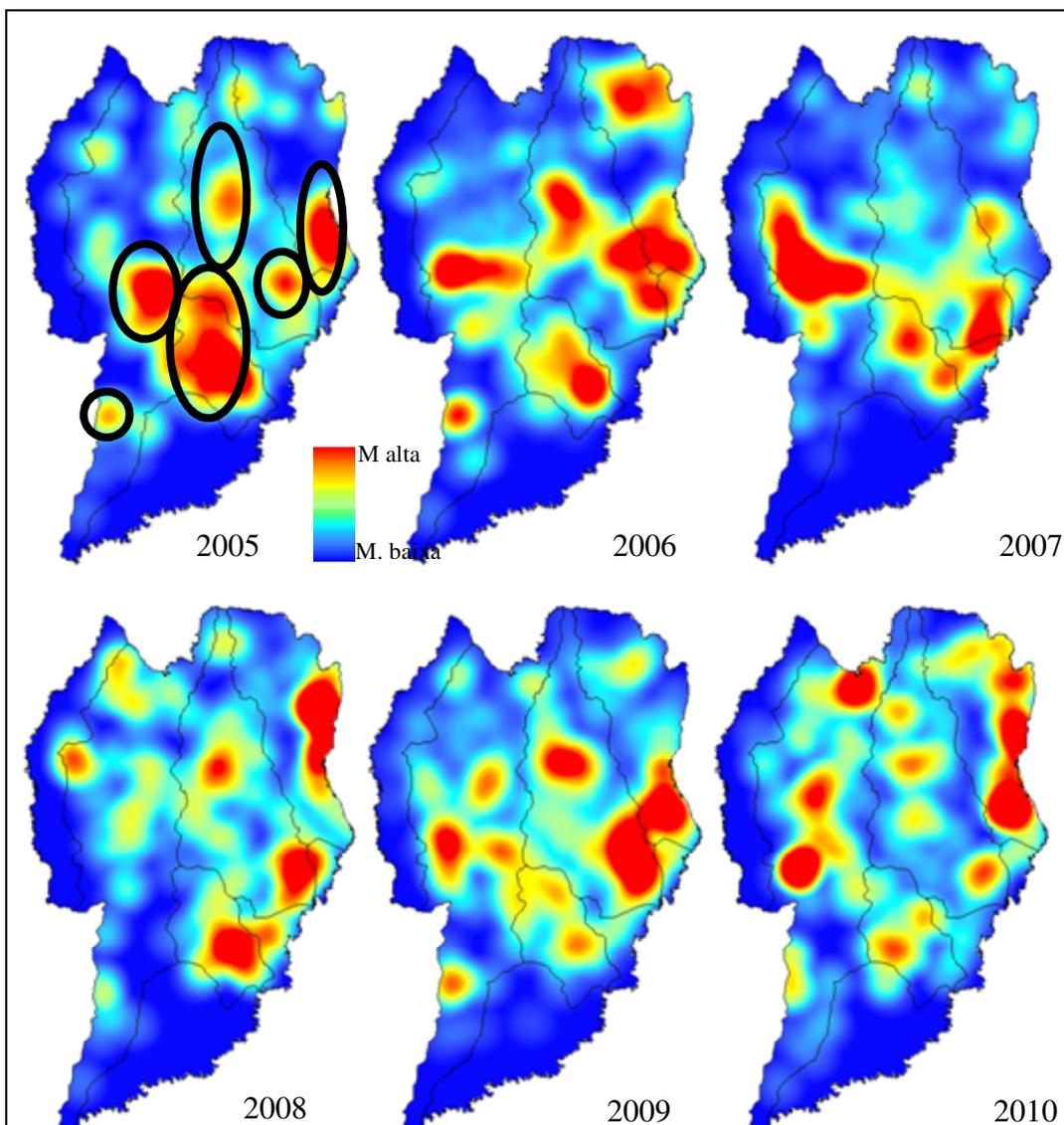


Figura 4.5 Cartogramas de densidade de alagamentos para Curitiba os anos de 2005 a 2010

De forma geral, pode-se dizer que existe variabilidade no que se refere aos padrões de densidade e de ocorrência freqüente de alagamentos em determinadas áreas de cada bacia hidrográfica, muito possivelmente atrelada ao próprio crescimento da cidade, ao uso e ocupação da cada bacia e ainda em função de suas características físicas (solo, geologia, relevo entre outras).

Por outro lado, um fato que não pode ser desconsiderado e de grande valor é que as ocorrências do passado são de suma importância para determinar a probabilidade de ocorrências no futuro, ou seja, se em um determinado local já ocorreu um alagamento, há

também probabilidade, quando comparada com outros locais, que ele volte a ocorrer novamente.

A partir das constatações de que mesmo com variabilidade pode ser identificado certo padrão de repetição de locais onde ocorrem os alagamentos em alguns anos, vislumbrou-se a motivação para proposição de um método para a espacialização do número esperado de alagamentos (NEA) por bacia hidrográfica, que teve como base a análise do histórico de alagamentos observados, conforme mostrado no item 4.6.

4.1.2 Análise do Total de Alagamentos por Bacia Hidrográfica

Tendo como base os dados de alagamentos para Curitiba, optou-se também por investigar qual a dinâmica dos alagamentos por bacia hidrográfica.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam o número de alagamentos para o período analisado por bacia hidrográfica bem como seu total. Pode-se verificar que os anos de 2006, 2007 e 2009 foram os anos com maiores números de registros. A bacia do Barigui é a mais atingida, seguida da bacia do Belém e Atuba.

Para o período analisado, na bacia do Barigui foram registrados quase 800 alagamentos, motivo de séria preocupação tanto por parte da população residente como do poder público. Infere-se que, estes números possam ainda estar relacionados a densidade populacional e a área impermeabilizada que cada uma dessas bacias possui, intensificando o problema.

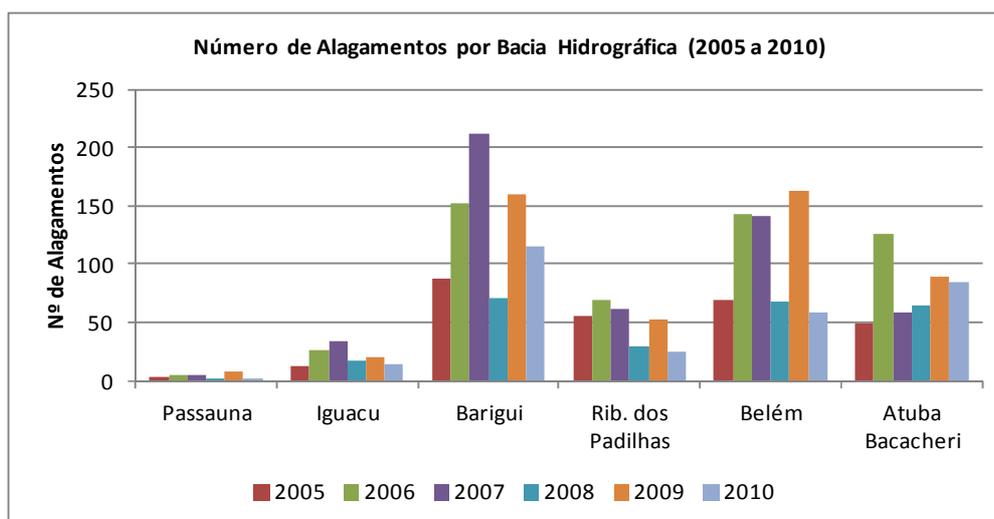


Figura 4.6 Número de alagamentos registrados por ano nas bacias hidrográficas entre 2005 e 2010

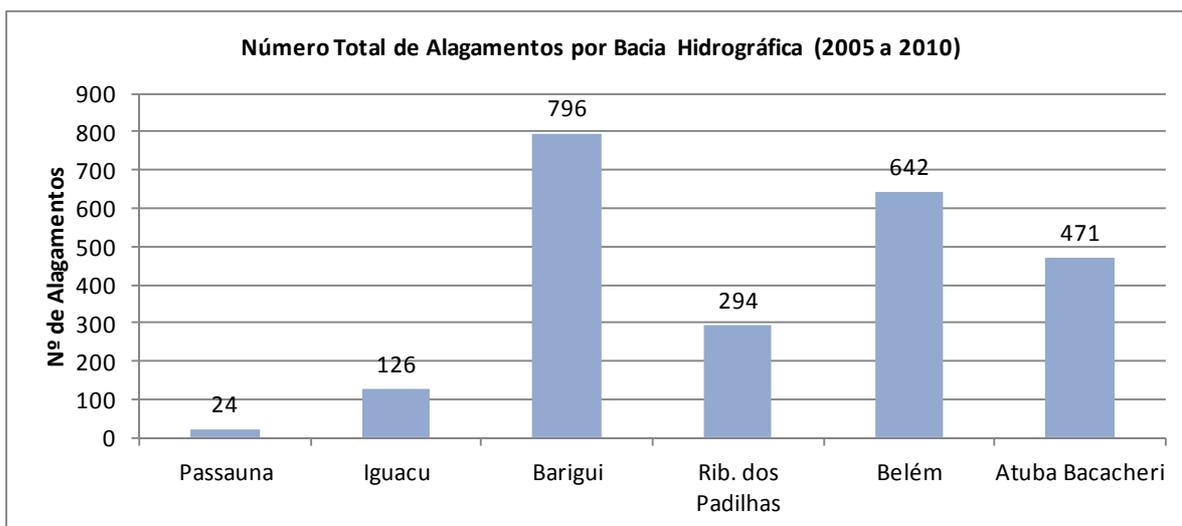


Figura 4.7 Número total de alagamentos registrados por bacia hidrográfica entre os anos de 2005 e 2010

Elaborando um paralelo com o estudo apresentado pela SUDERHSA (2007) sobre o Indicador de Agravamento de Inundações (IAI), apresentado no item 2.5.1, corrobora-se as informações já identificadas a partir das análises dos dados históricos de alagamentos, mostrando que realmente as bacias mais afetadas são exatamente a dos rios Barigui (IAI = 263%), Belém (IAI = 280%) e Atuba (IAI = 278%), pois são as que possuem maior densidade de ocupação e área impermeabilizada bem como grande densidade populacional. Tais fatores em conjunto com precipitações intensas são os principais vetores que contribuem para a ocorrência de alagamentos.

Infere-se que a cada ano que se passa, tal índice deve ainda aumentar tendo como conseqüência a diminuição da resiliência de cada uma das bacias, já que os espaços livres tendem a ser impermeabilizados e a densidade populacional tende a aumentar.

4.1.3 *Análise dos Dias com Alagamento e do Número de Alagamentos Diários*

Tendo como premissa que para algumas bacias o índice de agravamento de inundações é alto e que são estas mesmas bacias as mais afetadas pelos alagamentos procedeu-se com a análise do número de dias no ano com registro de alagamento em cada uma das bacias analisadas bem como a freqüência do número de alagamentos registrados em situação de alagamento, ou seja, o número de alagamentos simultâneos registrados em dias de evento.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que no período analisado, em todas as bacias a percentagem de dias sem registros de alagamentos fica em média

acima de 95%. Apenas nos 5% restantes há registros de alagamentos, ou seja, de forma geral, em torno de 18 dias para o período estudado tem-se registros de alagamentos.

Tabela 4.2 – Percentagem de dias sem e com ocorrências de alagamentos (2005-2010)

Nome	Dias sem ocorrência	Dias com Ocorrências
Barigui	95,9%	4,1%
Belém	92,4%	7,6%
Iguacu	97,2%	2,8%
Atuba	94,6%	5,4%
Rib. dos Padilhas	95,3%	4,7%

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

* A bacia do Passaúna não foi considerada em função do número de registros ser muito pequeno.

A partir de tais considerações e pensando nos 365 dias do ano, nota-se que a percentagem de dias com alagamentos é muito pequena, caracterizando situação rara. Apesar desse pequeno número, como discutido no item 4.1.1, os alagamentos constituem-se no maior problema enfrentado pela Defesa Civil, causando diversos estragos, perda de bens, interrupção de serviços básicos, caos no trânsito e em alguns casos até a perda de vidas.

Considerando agora apenas a percentagem de dias com ocorrência de alagamentos (última coluna da Tabela 4.4), a Figura 4.8 ilustra um gráfico que em seu eixo Y está representada a frequência acumulada e no eixo X o número de alagamentos. Fica evidente que cada bacia possui uma certa característica em relação ao número de alagamentos que ocorrem em dias de evento, sendo que a bacia do Barigui é a que destoa das demais.

Nota-se de forma clara que com exceção da bacia do Barigui, as demais possuem comportamento similar, ou seja, nos dias em que efetivamente foram registrados alagamentos, observa-se altas frequências para 1, 2 e 3 alagamentos e menores frequências para um número grande de alagamentos. Para a bacia do Barigui pode-se verificar menores frequências para números pequenos de alagamentos e maiores frequências para número de alagamentos entre 5 e 10. Isso significa dizer que nos dias com situações de alagamento nesta bacia, tem um número significativo de alagamentos, geralmente mais do que 1.

Analisando de forma conjunta a Tabela 4.2 e o gráfico da Figura 4.8 pode-se chegar a interpretações interessantes. Por exemplo:

- 1) A bacia do Barigui: possui pequena percentagem de dias com ocorrência de alagamentos (4,1%), mas apresenta número médio de alagamentos por dia de 4,2, que pode ser considerado alto;
- 2) A bacia do Belém e Atuba: possuem as maiores percentagens de dias com ocorrência de alagamentos, porém em tais dias o número médio de alagamentos é de 3,83 e 3,98 respectivamente;
- 3) A bacia do Ribeirão do Padilhas: possui 4,7% dos dias do ano com alagamentos, tendo número médio de 2,88 alagamentos nesses dias;
- 4) A bacia do Iguaçu: possui a menor percentagem tanto para os dias com ocorrência de alagamentos quanto para o número médio de alagamentos em situações de evento.

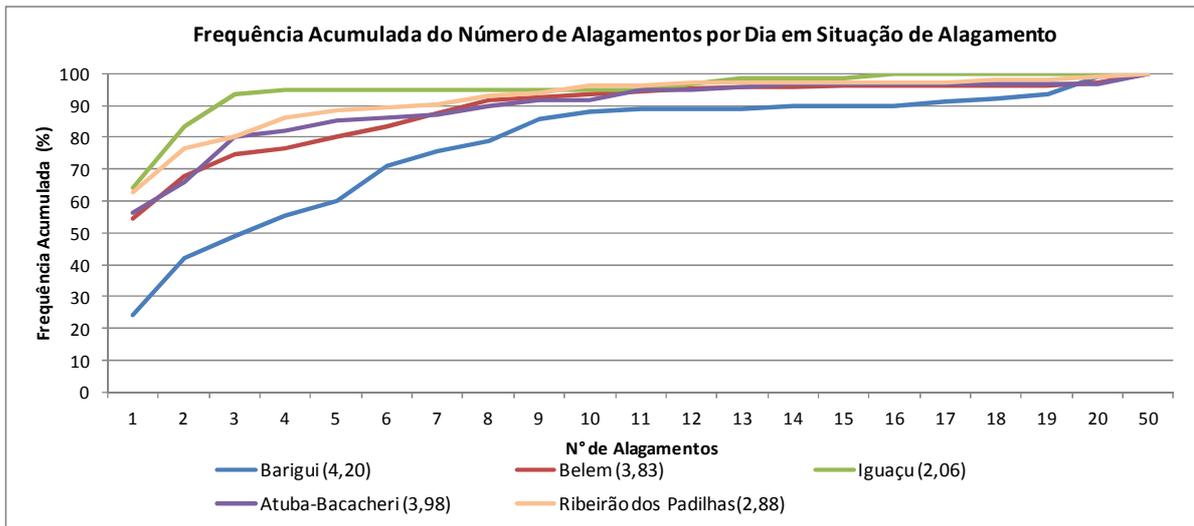


Figura 4.8 Frequência acumulada do número de alagamentos por dia em situação de alagamento (número médio de alagamentos em dias de evento)

Fazendo um paralelo para as situações apresentadas, conclui-se que possivelmente em função das diferentes características sócio-ambientais das bacias e suas respectivas áreas de drenagem, o tempo de resposta à precipitação torna-se a variável principal para explicar tal dinâmica. Por exemplo, pelo fato da bacia do rio Barigui apresentar maior área, infere-se que o tempo de resposta entre a precipitação e seu efeito é mais longo, possibilitando um maior equilíbrio para os eventos pluviométricos de maior intensidade. Por isso da menor percentagem de dias com ocorrência de alagamentos.

Para as outras bacias com exceção do Iguaçu o tempo de resposta é menor em função de possuírem menor área de drenagem e, portanto a possibilidade de ocorrer

alagamentos é maior, apresentando uma maior percentagem de dias com ocorrência de alagamentos. Claro que se em tratando de áreas urbanas como é o caso, em função das áreas impermeabilizadas e das modificações nos canais de drenagem, o tempo de resposta é alterado e por conseqüência menor. Portanto, chuvas com mesma intensidade e duração por exemplo, podem causar alagamentos nas bacias do Belém, Atuba e Ribeirão dos Padilhas e não causar na bacia do Barigui.

4.1.4 Análise Mensal dos Alagamentos

A análise mensal dos alagamentos para o período em estudo (Figura 4.9 e Tabela 4.3), mostra que há uma concentração das ocorrências principalmente nos meses de verão (dezembro a março), tipicamente os meses com maiores índices pluviométricos e com as chamadas chuvas convectivas, também conhecidas como chuvas de verão. Geralmente as chuvas convectivas apresentam características de curta duração, porém de grande intensidade (item 2.2) sendo vetor preponderante para o desencadeamento dos alagamentos.

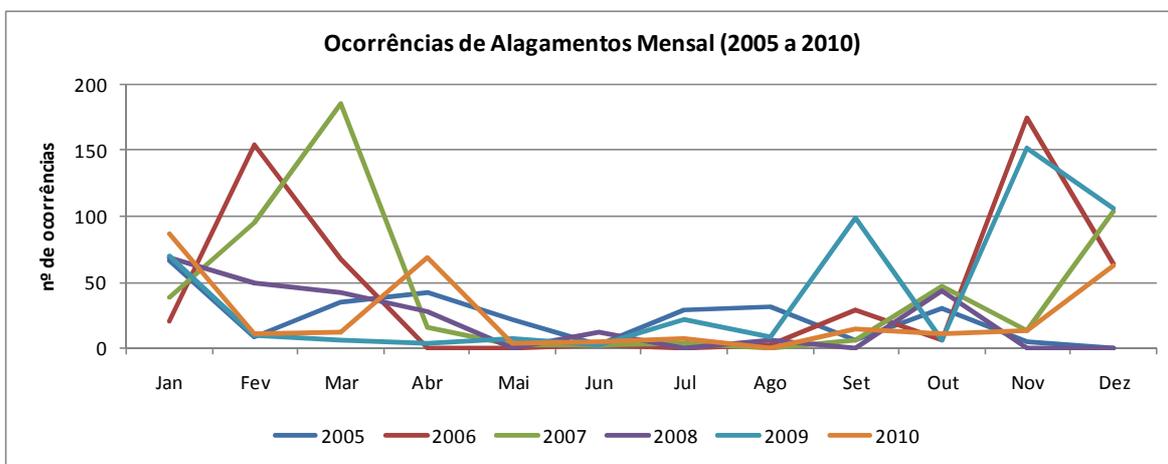


Figura 4.9 Ocorrências de alagamentos para os 12 meses do ano com período de análise de 2005 a 2010

Iniciando em novembro e concentrando-se até março, esse meses respondem por 73% de todos os alagamentos que ocorrem no ano, mostrando que o planejamento de ações bem como planos de contingência já devem estar preparados caso necessitem ser utilizados em situação de emergência.

Tabela 4.3 – Total de ocorrências de alagamentos por mês em Curitiba

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
2005	66	8	35	42	22	3	29	31	6	30	5	0	277
2006	21	154	68	0	0	3	0	2	29	6	175	64	522
2007	39	95	185	16	3	2	4	0	6	47	13	104	514
2008	69	50	42	28	0	12	0	6	0	44	0	0	251
2009	70	10	6	4	7	2	22	8	99	6	152	106	492
2010	87	11	12	69	4	5	7	0	15	11	13	63	297
Total	352	328	348	159	36	27	62	47	155	144	358	337	2353

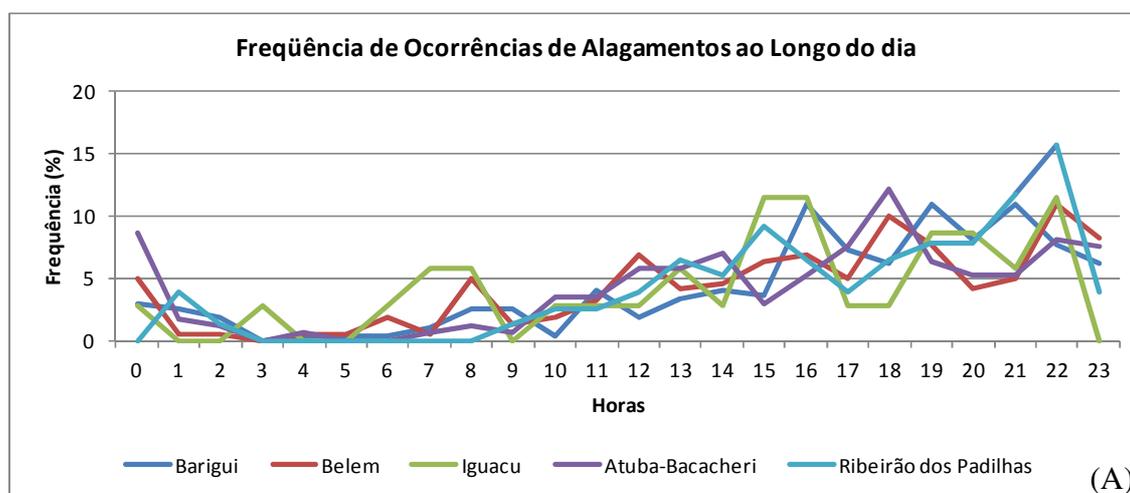
Elab.: Marciel Lohmann, 2011

Nos meses de inverno, em função da dinâmica climática ser diferente e estar mais ligada às chuvas vinculadas as frentes frias nota-se que o número de ocorrências de alagamentos é menor. Neste período, infere-se que os alagamentos são causados principalmente em função de um acumulado de chuva maior ao longo de diversos dias.

A dinâmica relacionada a chuva e sua relação com os alagamentos será detalhada no item 4.3.

4.1.5 Análise da Frequência de Alagamentos ao Longo do Dia

Após as análises discutidas no item anterior, interessou-se ainda em identificar em quais horas do dia as ocorrências de alagamentos são mais frequentes. Para tal análise, foram utilizados apenas os dados dos anos de 2009 e 2010, já que nos anos anteriores, tal informação não existia.



(A)

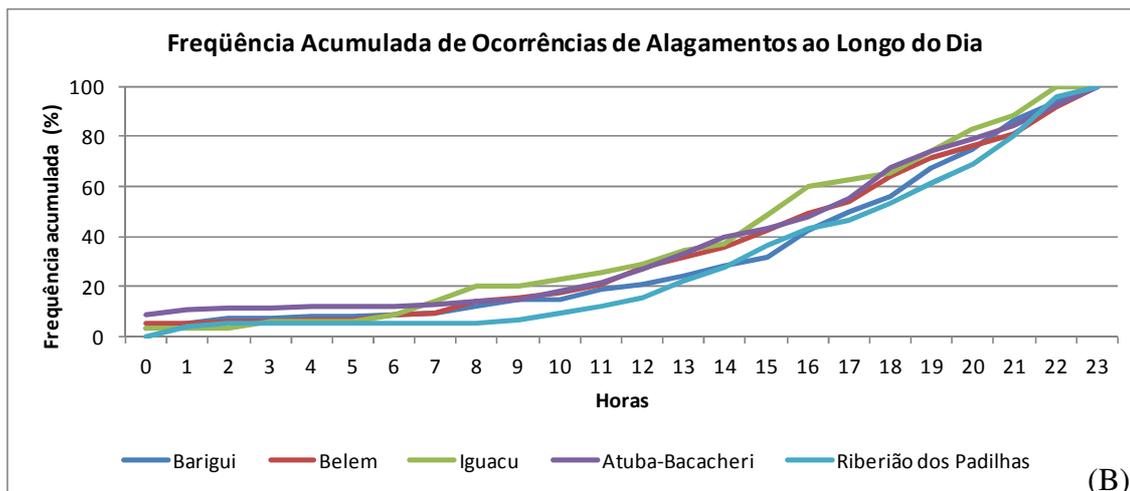


Figura 4.10 Frequência (A) e frequência acumulada (B) de ocorrências de alagamentos de hora em hora para as bacias hidrográficas

A Figura 4.10 mostra em qual período do dia há a maior frequência de alagamentos. Nota-se que a frequência é maior a partir das 12 horas (linha preta no gráfico) e aumenta a partir das 16 horas, mantendo-se quase estável até as 22 horas. Dividindo o dia de 6 em 6 horas (Figura 4.11) fica mais evidente que o período em que há a maior concentração é das 12 até as 18 horas. Na bacia do rio Barigui e Ribeirão dos Padilhas, diferentemente das outras bacias em que há um leve declínio na frequência, há uma continuidade das curvas, mostrando que os alagamentos também são frequentes depois das 18 horas do dia.

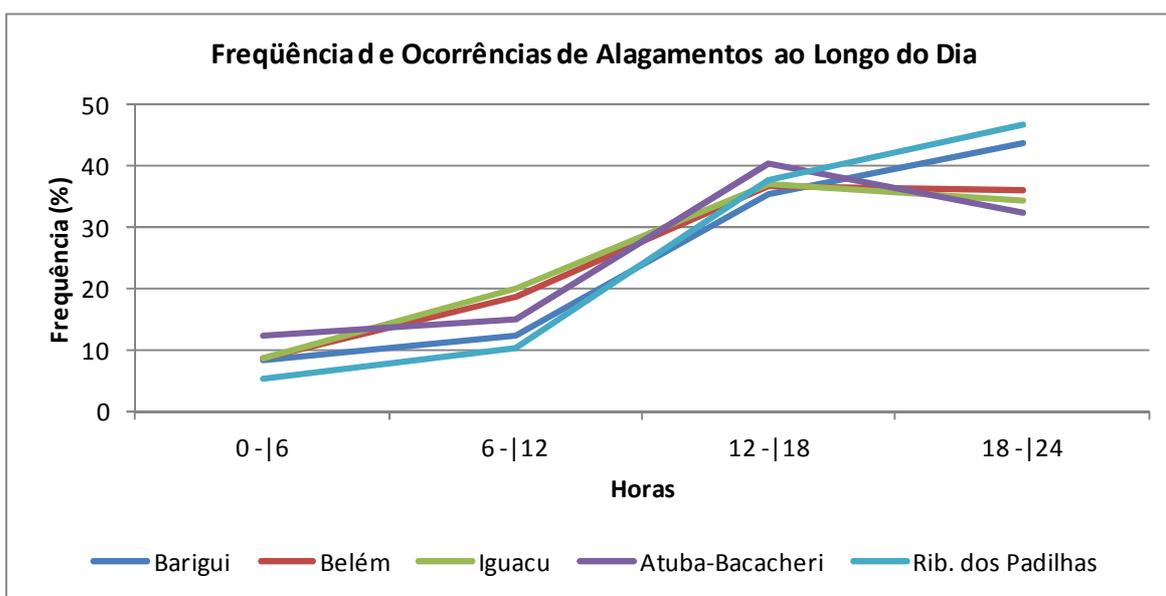


Figura 4.11 Frequência de ocorrências de alagamento de 6 em 6 horas para as bacias hidrográficas de Curitiba

Observando-se ainda o gráfico “B” da Figura 5.10 e pensando no processo de previsão, pode-se fazer uma análise preliminar da percentagem de alagamentos que ficaram descobertos pela previsão realizada em determinada hora do próprio dia. Por exemplo, se a previsão para um determinado dia for gerada as 6 horas deste mesmo dia, cerca de 10% dos alagamentos já terão ocorrido, em média. Do mesmo modo, se a previsão for gerada às 12h, aproximadamente 20% dos alagamentos já terão ocorrido. Portanto, sugere-se que para evitar alagamentos descobertos pela previsão, a mesma deve ser gerada ao final do dia anterior. Esta previsão pode ser revista ao longo do período de prognóstico caso haja registros recentes de chuvas intensas, contribuindo para uma melhoria no desempenho do sistema de previsão.

4.1.6 *Análise Preliminar da Seqüência de Chuvas que Antecederam os Alagamentos*

A partir das análises dos dados de alagamentos propriamente ditos, objetivou-se ainda conhecer preliminarmente a dinâmica ligada as chuvas que antecederam os alagamentos. Para tanto, como explorado na metodologia, foram utilizados os dados de estimativas integrados de radar, satélite e pluviômetros e são constituídos pelas séries de chuva acumulada de 6 em 6 horas para 4 dias, ou seja, chuva ao longo de 96 h, a partir de sua decomposição em 16 valores acumulados de 6 horas (diferenças entre a chuva acumulada no tempo t e $t-6$).

Os dois métodos utilizados para o cálculo da chuva média foram o método de Thiessen e o Inverso da Distância ao Quadrado.

Na Figura 4.12 está representado o comportamento da chuva nas diferentes bacias hidrográficas que integram o município de Curitiba ao longo de 4 dias. Foram analisadas a mediana⁴¹, o percentil 75 e o percentil 25. Observando-se os gráficos nota-se que existem 4 picos de chuva, ou seja, um em cada dia, sendo o do último dia de maior intensidade, representando valores maiores de precipitação. Pode-se inferir que tal aspecto deve traduzir a importância de não levar apenas em consideração a chuva ocorrida no dia do evento, mas também a chuva acumulada em dias anteriores.

⁴¹ Em estatística é uma medida de tendência central, um número que caracteriza as observações de uma determinada variável (neste caso a chuva acumulada) de tal forma que este número (a mediana) de um grupo de dados ordenados separa a metade inferior da amostra, população ou distribuição de probabilidade, da metade superior. Mais concretamente, metade da população terá valores inferiores ou iguais à mediana e metade da população terá valores superiores ou iguais à mediana.

De forma preliminar, nota-se que existe um certo padrão de chuva para as bacias, mas que a chuva de maior importância é exatamente a que ocorre no dia do evento de alagamento, com valores precipitados em torno de 20 mm para as últimas 6 horas podendo ultrapassar 60mm/6h. O pico no primeiro dia anterior ao do evento também possui importância significativa já que se verifica valores de chuva que podem ultrapassar 30 mm/6h.

Os gráficos da Figura 4.13 apresentam a chuva acumulada ao longo dos 4 dias. Observa-se um crescimento gradual das curvas que representam a mediana e os percentis, alcançando patamares superiores a 200 mm de chuva acumulados em 4 dias. Constatase que os acumulados no dia do evento e no primeiro dia anterior são os mais significativos atingindo valores em torno de 50 mm em 2 dias. De toda forma, a maior inclinação das curvas se dá para as chuvas ocorridas no dia do evento, mostrando mais uma vez a relevância da chuva ocorrida no dia do evento.

Tal discussão e análise preliminar motivaram a investigação mais detalhada dos padrões de chuva causadores de alagamentos abordada no item 4.3

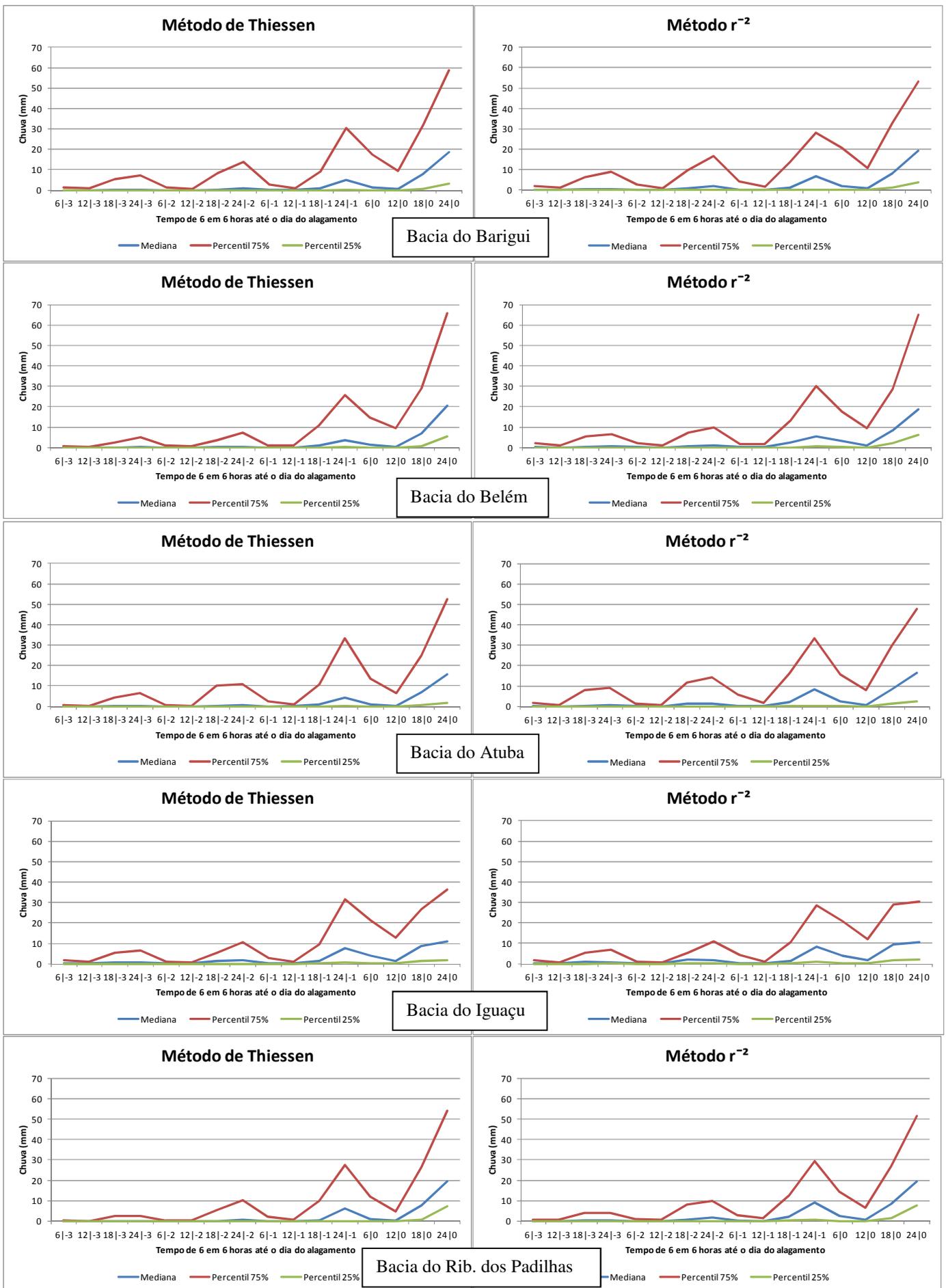


Figura 4.12 Chuva acumulada em 6 horas no dia do alagamento e nos três dias anteriores utilizando método de Thiessen e Inverso da Distância ao Quadrado para cada uma das bacias hidrográficas de Curitiba

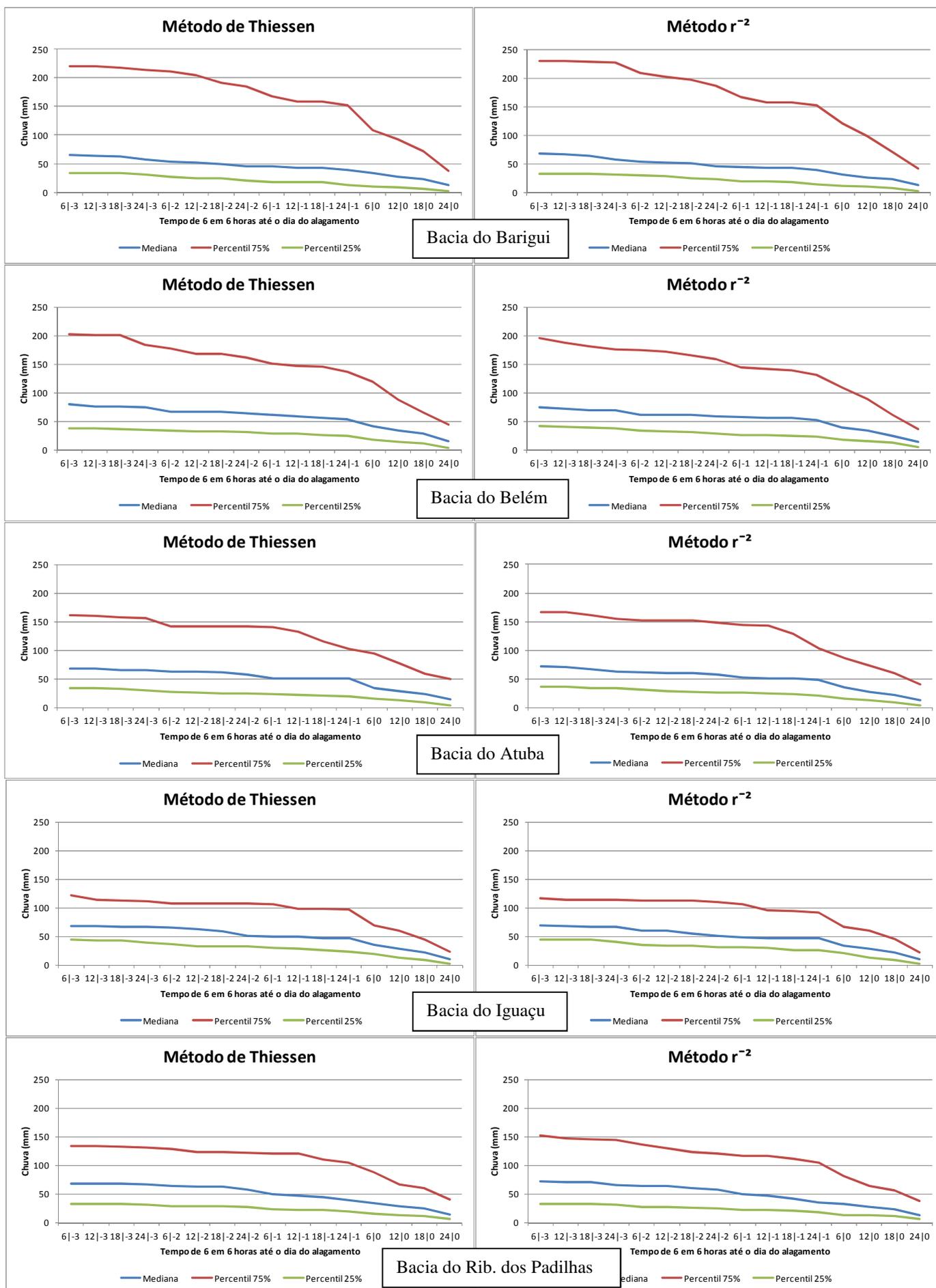


Figura 4.13 Chuva acumulada do tempo t até o dia do alagamento utilizando método de Thiessen e Inverso da Distância ao Quadrado para cada uma das bacias hidrográficas de Curitiba

4.1.7 Determinação do Número de Dias a ser Considerado na Construção dos Modelos

Com base na análise preliminar apresentada, objetivou-se nesta etapa investigar e identificar quantos dias anteriores ao dia do evento deveriam ser considerados para aplicação no modelo de regressão logística e de redes neurais.

Para tanto partiu-se da premissa de que a chuva acumulada diária teria uma relação direta com os alagamentos. Assim, procurou-se estabelecer qual a importância da chuva acumulada diária em dias anteriores ao do evento nas diferentes bacias hidrográficas. A comparação estabelecida consistiu na análise das seguintes séries de dados:

- 1) chuva acumulada diária para toda a série de dados (01/01/2005 até 31/12/2010),
- 2) chuva acumulada diária para os dias em que houve um evento de alagamento;
- 3) chuva acumulada diária 1 dia anterior ao dia do evento;
- 4) chuva acumulada diária 2 dias anteriores ao dia do evento e;
- 5) chuva acumulada diária 3 dias anteriores ao dia do evento.

De posse de tais dados, foram elaborados os gráficos que utilizam como base a Função de Distribuição Acumulada para representação dos dados. Em resumo, as séries são classificadas em ordem crescente e encontra-se a CDF (Função de Distribuição Acumulada) ajustada e os respectivos quantis em comparação com a CDF empírica através de uma fórmula de plotagem adequada à distribuição analisada.

Em relação às curvas em cada gráfico (Figura 4.14), pode-se dizer que quanto mais próximo as curvas estão da curva em preto (que representa a chuva acumulada para toda a série de dados), menor será a importância da chuva acumulada nos respectivos dias anteriores ao do evento.

Refletindo sobre um modelo que poderia melhor se adequar e explicar de forma lógica os gráficos, a curva em vermelho que representa a chuva acumulada no dia do evento deverá sempre estar distante da curva em preto já que trata-se da chuva acumulada de maior importância. A curva verde, azul e laranja que representam 1, 2 e 3 dias anteriores a ocorrência do alagamento, devem se afastar de forma gradual, devendo a curva laranja ser a que esteja mais próxima da curva em preto, mostrando que esta série já aproxima-se muito da série que representa toda a série de dados de chuva, ou a distribuição normal dos dados.

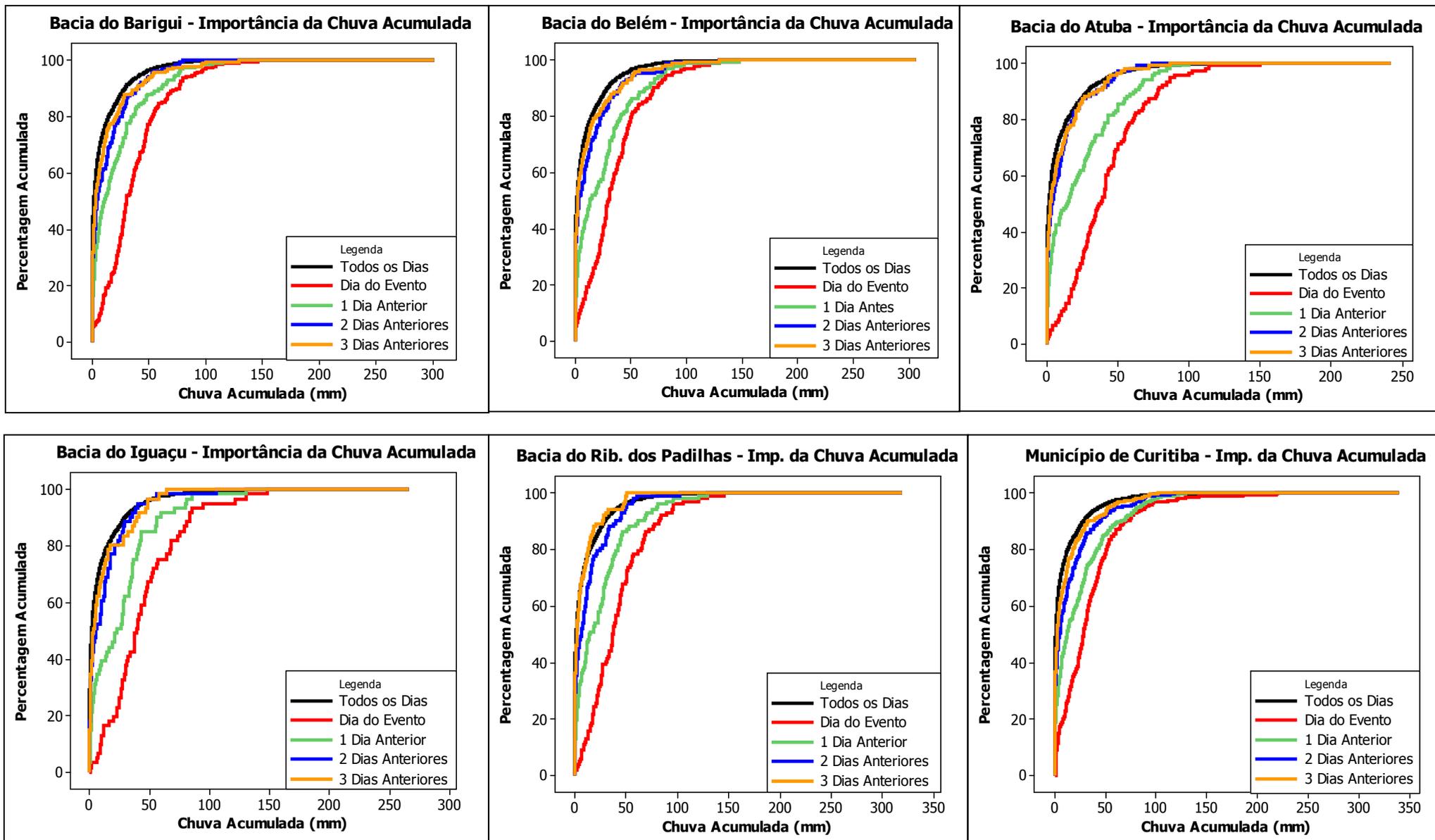


Figura 4.14 Chuva acumulada diária no dia do alagamento e em dias anteriores ao do evento nas diferentes bacias hidrográficas e Curitiba

Na bacia do rio Barigui e Belém, por exemplo, constata-se que mesmo o terceiro dia anterior ao do evento ainda possui relativa importância, mesmo que pequena, diferentemente da bacia do rio Atuba e Ribeirão dos Padilhas em que as curvas que representam o segundo e terceiro dias anteriores (curva em azul e laranja respectivamente) não possuem importância significativa para o entendimento dos alagamentos já que as mesmas aproximam-se muito da curva em preto. Isso significa que estes dois dias já apresentam uma distribuição de valores que se aproxima muito a distribuição encontrada para toda a série de dados de chuva. Conseqüentemente seriam candidatos a serem desconsiderados na análise via regressão logística e de redes neurais.

Elaborando-se essa mesma análise considerando-se não mais as bacias hidrográficas e sim o município de Curitiba como um todo, percebe-se que os resultados aproximam-se das análises feitas em relação as bacias do rio Barigui e Belém, ou seja, mesmo possuindo importância pequena, o segundo e terceiro dias anteriores devem ser considerados na análise.

É relevante realçar que essa análise investiga a importância relativa das chuvas acumuladas em 24h em relação ao dia do evento. Outros períodos de acumulação poderiam ser avaliados e revelar necessidade de maior recursividades em casos específicos.

4.1.8 Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

Ainda a fim de responder a indagação feita anteriormente de forma a obter-se como resultado um valor numérico para cada dia e sua relativa importância para o evento, aplicou-se, dentre diversos teste estatísticos possíveis, o “Teste de Kolmogorov-Smirnov⁴²”(K-S).

Sabe-se que grande parte dos problemas que podem ser encontrados na prática são solucionados primeiramente, considerando algumas suposições iniciais, tais como, assumir uma função de distribuição para os dados amostrados, neste caso, os dados de chuva acumulada diária.

Nesse sentido, surge a necessidade de se certificar se essas suposições podem, realmente, ser assumidas. Para dar suporte a esta suposição, considera-se, dentre outros, o teste de Kolmogorov – Smirnov.

O teste de Kolmogorov - Smirnov pode ser utilizado para avaliar as hipóteses:

⁴² O nome é uma referência aos matemáticos russos Andrey Kolmogorov e Vladimir Ivanovich Smirnov.

- $$\begin{cases} H_0 : \text{Os dados seguem uma distribuição de referência;} \\ H_1 : \text{Os dados não seguem uma distribuição de referência;} \end{cases}$$

Este teste analisa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada proposta para os dados, e a função de distribuição empírica dos dados. Como critério, comparou-se esta diferença com um valor crítico, para um dado nível de significância.

A estatística utilizada para o teste é:

$$D_n = \text{Maximo}_x |F_n(x) - F(x)|$$

Esta função corresponde a distância máxima vertical entre as curvas de $F(x)$ e $F_n(x)$ sobre a amplitude dos possíveis valores de x . Em D_n tem-se que:

- $F(x)$ representa a função de distribuição acumulada proposta para os dados;
- $F_n(x)$ representa a função de distribuição acumulada empírica dos dados.

As séries utilizadas foram as seguintes:

- Série de referência (S_r) – a chuva acumulada diária de 01/01/2005 a 31/12/2010;
- Série de acumulados diários (S_i) – no período de 01/01/2005 a 31/12/2010 com:

$i = 0$, para chuva no dia do evento;

$i = 1$, para chuva 1 dia anterior ao evento;

$i = 2$, para chuva 2 dias anteriores ao evento e;

$i = 3$, para chuva 3 dias anteriores ao evento;

Para realização do teste, os procedimentos adotados foram os seguintes:

1. Identificar o maior valor de chuva acumulada diária na série S_r ;
2. Construir classes com intervalo de 1 em 1 mm desde 0 mm ao valor máximo da série S_r ;
3. Calcular as frequências acumuladas nos intervalos de cada classe para S_r e para as séries S_i ;
4. Calcular as diferenças entre as frequências acumuladas de S_r e S_i em cada um dos intervalos de classe.

5. Identificar a maior diferença [D_{\max}] para cada par de S_r e S_i que será comparada com $D_{\text{crítico}}$

Se $D_{\max} \geq D_{\text{crítico}}$ rejeita-se a hipótese de igualdade das distribuições das séries;

$D_{\text{crítico}}$ trata-se de um valor que depende do tamanho da série e das características da série.

Os valores significativos e críticos para a estatística de Kolmogorov-Smirnov estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 –Valores significativos e críticos para a estatística K-S

Valor Crítico	Nível de Significância
$1,07/\sqrt{n}$	20%
$1,22/\sqrt{n}$	10%
$1,36/\sqrt{n}$	5%
$1,63/\sqrt{n}$	1%

Fonte: Cruz⁴³ (2002)

Aplicando-se a fórmula do valor crítico para cada bacia com nível de significância de 5%, obteve-se os valores críticos. Os mesmos são apresentados na Tabela 4.5

Tabela 4.5 –Valores críticos ($D_{\text{crítico}}$) para cada bacia hidrográfica e para o município de Curitiba

Nome da Bacia	Valor Crítico Nível de Significância de 5%
Barigui	0,0989
Belém	0,1052
Atuba	0,1251
Iguaçu	0,1741
Rib. dos Padilhas	0,1346
Mun. de Curitiba	0,0768

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

⁴³ CRUZ, M. **Modeling, Measuring and Hedging Operational Risk**. Jonh Wiley Trade, 2002.

O teste foi aplicado utilizando os dados de precipitação acumulados de 6 em 6 horas com o método de Thiessen e o Inverso da Distância ao Quadrado. Como os resultados para o teste de Kolmogorov-Smirnov ficaram praticamente idênticos, optou-se por apresentar apenas os resultados para os dados de precipitação produzidos via o método de Thiessen. Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados.

Tabela 4.6 – Resultados para o teste de Kolmogorov-Smirnov para as diferentes bacias e para o município de Curitiba (D_{max})

	Barigui	Belém	Atuba	Iguaçu	Rib. dos Padilhas	Curitiba*
Dia do Evento	0,6061	0,5815	0,6580	0,6567	0,6450	0,5271
1 dia anterior	0,2898	0,3085	0,3035	0,3883	0,3638	0,2774
2 dias anteriores	0,1676	0,1458	0,1535	0,1915	0,1825	0,1469
3 dias anteriores	0,1311	0,1090	0,1287	0,1775	0,1405	0,0798
4 dias anteriores	0,0639	0,0617	0,0812	0,1181	0,0537	0,0693

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

* A bacia do Passaúna não foi considerada em função do número insignificante de ocorrências.

Os resultados do teste de aderência de K-S, ao nível de significância de 5%, mostraram que a maioria dos valores de D_{max} são maiores que $D_{crítico}$, portanto passando no teste de K-S. Sendo assim constatou-se que o primeiro, segundo e terceiro dias anteriores ao dia do evento, mesmo com importância diminuída respectivamente, devem ser considerados na análise e tornam-se importantes para entender a dinâmica dos eventos de alagamentos bem como se tornam variáveis relevantes a serem consideradas na construção de modelos probabilísticos.

4.2 Resultados dos Modelos de Regressão Logística e Redes Neurais (SOM)

A aplicação e o estudo do método de regressão logística e de redes neurais, para os dados de precipitação acumulados de 6 em 6h utilizando-se do método de Thiessen e do Inverso da Distância ao Quadrado (r^{-2}), resultou um modelo numérico preditivo. Esse modelo pode tornar-se uma ferramenta com a qual os tomadores de decisão, por exemplo, podem quando em função de um determinado padrão de chuva e grande probabilidade de

ocorrência de um alagamento, emitir alertas para a população em geral, optar em interditar determinadas ruas ou ainda retirar moradores das áreas mais críticas.

Neste sentido, Leite (2008), comenta que a decisão de emissão do alerta deve ser realizada por autoridade pública municipal, ou delegada para a coordenação de defesa civil, com o objetivo primário de mitigar os impactos globais dos alagamentos, entre os quais salvar vidas e minimizar perdas econômicas. O mesmo autor ainda afirma que o alerta funciona como um gatilho para motivar a população a decidir e empreender medidas de proteção contra as inundações ou alagamentos.

A decisão de emissão do alerta pode ser orientada por diversos critérios, condicionantes de seu resultado e efetividade, e abranger as abordagens determinística e probabilística de análise da previsão. A seleção do critério e limites que determinam a emissão do alerta deve levar em consideração as conseqüências sociais, e seus efeitos econômicos e comportamentais, que são derivados do desempenho do sistema em termos de falso alerta, número de alagamentos detectados e perdidos e tempo disponibilizado para a população empreender medidas de proteção (LEITE, 2008).

Levando em consideração tais idéias e pensando na geração e avaliação de um possível sistema de emissão de alertas, neste item, serão apresentados os resultados gerados a partir da base de dados trabalhada para dois modelos, ou seja, o de regressão logística e de redes neurais (SOM). Será apresentada ainda a avaliação quanto ao melhor método para cálculo da chuva média (Thiessen ou r^2), os testes gerados para definição de qual melhor função de ligação (Logit, Normit, Gompit) deveria ser utilizada para o modelo de regressão logística, a verificação com aplicação do modelo já calibrado bem como a avaliação do desempenho dos modelos gerados para cada bacia hidrográfica e para o município de Curitiba.

4.2.1 Desempenho do Modelo de Regressão Logística

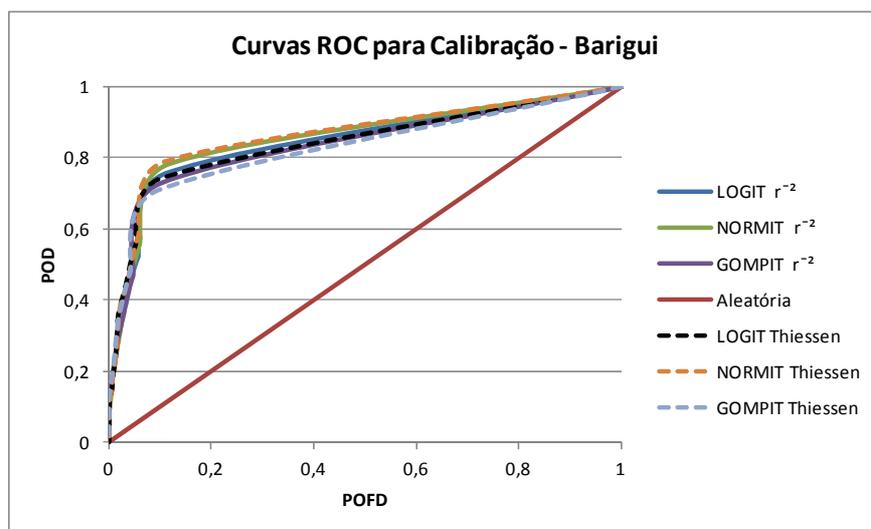
A regressão logística binária apresenta-se como um método para determinar a probabilidade de ocorrência dos valores preditos de uma variável dicotômica e a utilização de um software como o MINITAB, torna-se imprescindível devido à complexidade dos cálculos envolvidos. Portanto todos os cálculos e resultados foram gerados com auxílio deste software.

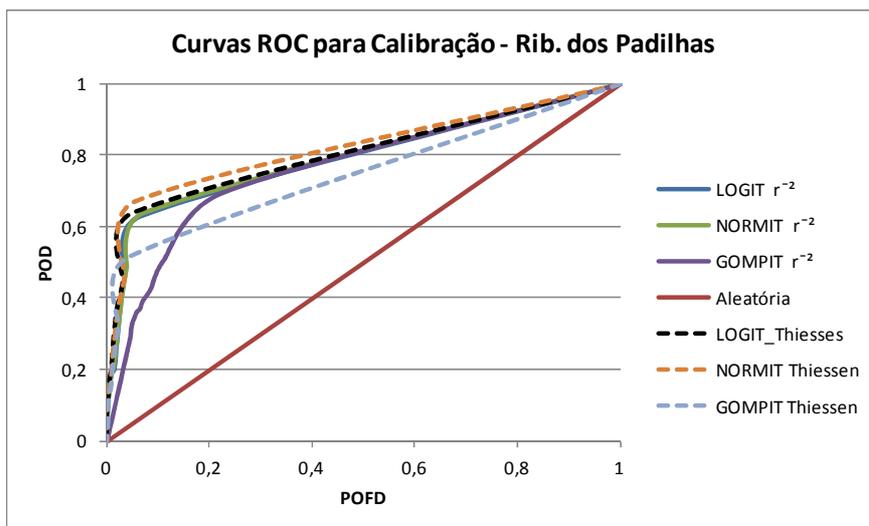
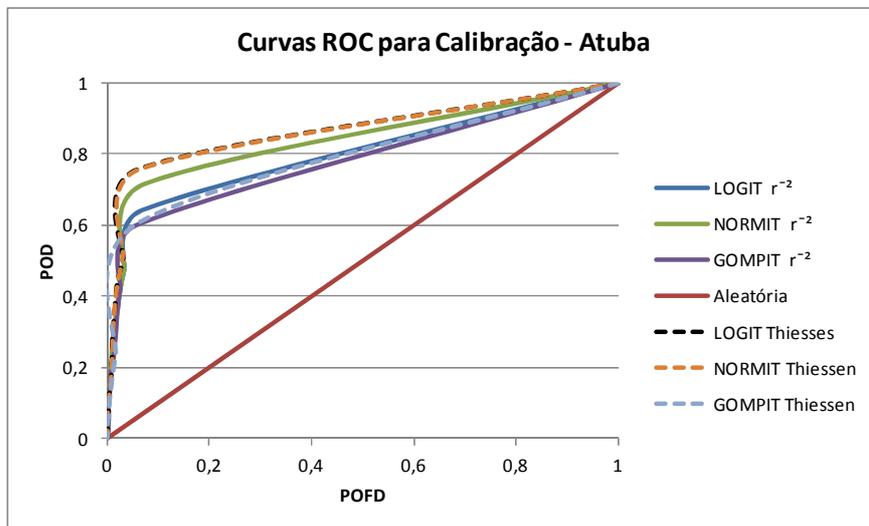
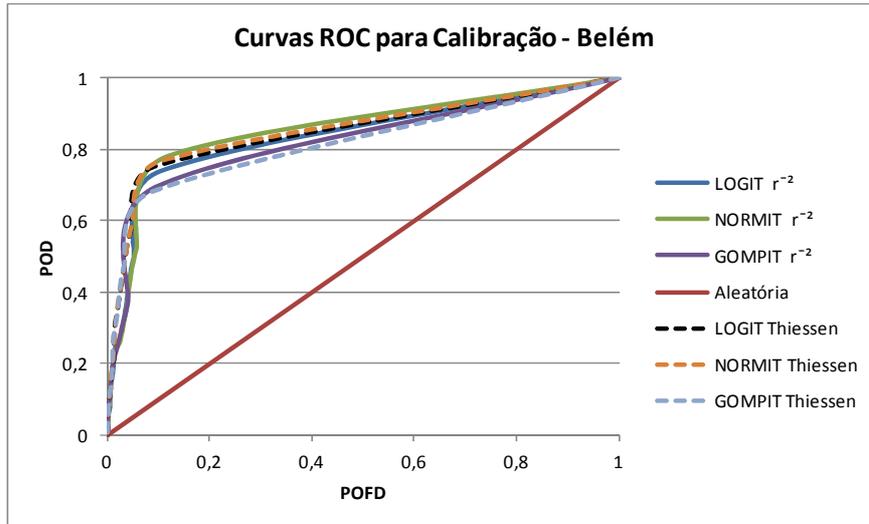
Tendo como premissa que a construção de um modelo regressivo do tipo logístico tem como objetivo fazer a previsão da probabilidade de ocorrência de alagamentos para

Curitiba, utilizou-se para sua avaliação a Curva ROC e a área sob a curva, que avaliam a acurácia e o desempenho de um modelo, tanto na calibração quanto na verificação. O modelo assim avaliado pode ser utilizado de forma operacional para a emissão de alertas de alagamentos em Curitiba em função de um determinado padrão de chuva.

Neste primeiro momento a atenção ficou voltada em investigar e avaliar qual o melhor método para cálculo da chuva média (Thiessen ou r^{-2}) e também qual a função de ligação (Logit, Normit, Gompit) possui desempenho que resulte em um bom ajuste dos dados para o modelo de regressão logística. Para tais avaliações foram construídas curvas ROC e calculada a área sob a curva, que por consequência também já serviram de base para avaliação geral do modelo de regressão logística.

A Figura 4.15 ilustra as curvas ROC para a bacia hidrográfica do Barigui, Belém, Iguaçu, Atuba, Ribeirão dos Padilhas e também para o município de Curitiba e referem-se a Calibração. O cálculo da área sob a curva está apresentado na Tabela 4.7.





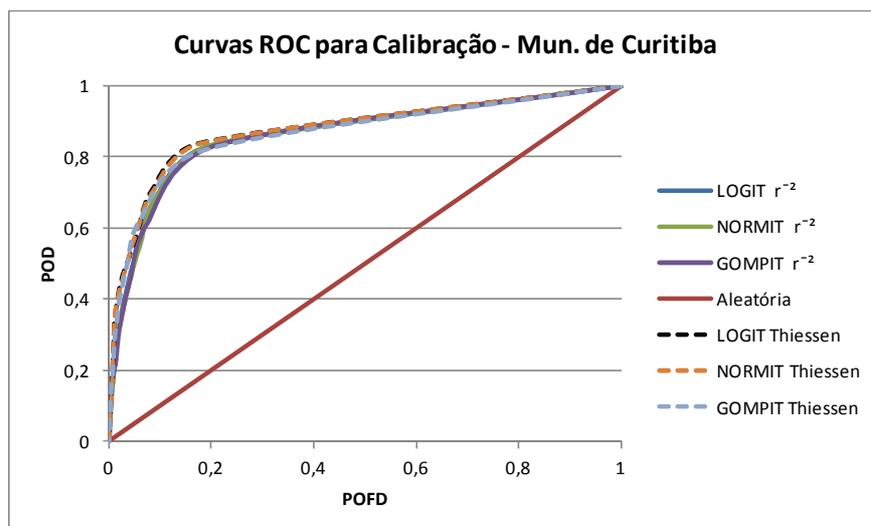


Figura 4.15 Gráficos apresentando as Curvas ROC geradas para as três funções de ligação e para os dois métodos de cálculo de chuva média no período de calibração para as bacias hidrográficas e para o município de Curitiba

Tabela 4.7 – Resultados da área sob a curva ROC para as bacias hidrográficas e o município de Curitiba para a Calibração, Regressão Logística

Função	Método	Área Barigui	Área Belém	Área Iguaçu	Área Atuba	Área Ribeirão	Área Curitiba
Logit	r^{-2}	0,835311101	0,826234821	0,671433306	0,794633464	0,787506549	0,856955105
Normit	r^{-2}	0,846477064	0,842153335	0,687975697	0,828240445	0,790815237	0,85703124
Gompit	r^{-2}	0,82385723	0,80575373	0,560756697	0,776527106	0,759128809	0,851348585
Logit	Thiessen	0,834074912	0,84195972	0,643026788	0,854510627	0,796808394	0,870434717
Normit	Thiessen	0,854957237	0,846865332	0,670201602	0,853525495	0,810476542	0,869376318
Gompit	Thiessen	0,818542022	0,808167603	0,508191107	0,775423394	0,738597479	0,856861497

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

Obs: Em vermelho os valores máximos de área

Observando-se a Figura 4.15 e a Tabela 4.7 nota-se que a chuva média calculada pelo método de Thiessen, utilizadas a para a calibração e avaliadas pela Curva ROC e área sob a curva ROC, possui melhor desempenho quando comparada com o r^{-2} , visto que, com exceção da bacia do Iguaçu em que o método r^{-2} se mostrou superior, em todas as outras bacias, inclusive para o município de Curitiba o método de Thiessen se mostrou superior.

Em média, a área sob a curva que varia de 0,5 (nenhuma acurácia aparente) a 1,0 (acurácia perfeita), ficou acima de 0,8, ilustrando que para a calibração, o método para cálculo da chuva média deve ser o de Thiessen.

Sob outra ótica, percebe-se que quando calculada a chuva média por bacia e para Curitiba, nota-se que a área sob a curva para Curitiba foi superior a 0,87, mostrando um ganho quando comparada com as bacias.

Tal diferença pode ainda possuir outra explicação que está centrada principalmente na resolução espacial em que é gerada a integração dos dados de satélite, radar e pluviômetros. Tal integração possui como resolução espacial uma célula de 4x4 km. Portanto em nível de bacia, há um número menor de células a serem consideradas no cálculo da chuva média e por consequência maior possibilidade de perda de informações. Para Curitiba como um todo, tem-se situação contrária, ou seja, maior número de células e menor perda de informações.

Neste sentido, chuvas convectivas localizadas e que se dissipam rapidamente, são identificadas e registradas com maior acurácia pelo radar meteorológico, sendo que tanto o satélite quanto o pluviômetro podem não registrar os valores de precipitação, dependendo da sua área de abrangência. Dessa forma, no processo de integração da chuva, esses dados são subestimados. Calvetti e Benetti (2007) já alertavam para este fato. Assim, possivelmente tais chuvas, por exemplo, são identificadas de melhor maneira considerando o limite municipal ao invés do limite das bacias hidrográficas.

Procurando responder qual a função de ligação (Logit, Normit e Gompit) possui melhor desempenho e ajuste dos dados para o modelo de regressão logística, como discutido no item 2.8, há três possibilidades para função de ligação, que permitem ajustar uma classe ampla de modelos de resposta binária. São elas: o inverso da função distribuição logística cumulativa (logit), o inverso da função distribuição normal padrão cumulativa (normit = probit), e o inverso da função distribuição de Gompertz (gompit = complementar log log).

É necessário escolher uma função de ligação que resulte um bom ajuste dos dados coletados. Pode-se usar a estatística da qualidade do ajuste para comparar os resultados com diferentes funções de ligação.

Com tais entendimentos avaliou-se também a função de ligação utilizando-se dos gráficos da Figura 4.15 e a Tabela 4.8, e os mesmos revelam que considerando a bacia hidrográfica como unidade, a função Normit obteve melhor desempenho em 4 bacias e a função Logit na bacia do Atuba e para Curitiba. A função Gompit não apareceu como melhor em nenhum dos casos avaliados.

Observando o gráfico da Figura 4.16, observa-se que o modelo Logit, Normit (probit) e Gompit são semelhantes, estando a grande diferença relacionada com o fato de as funções de distribuição dos modelos terem inclinações diferentes (no caso da curva da função de distribuição Normal aproxima-se mais rapidamente do eixo do que a curva da função Logística) ou configurações ligeiramente diferentes (no caso do Gompit que apresenta uma distribuição Gompertz).

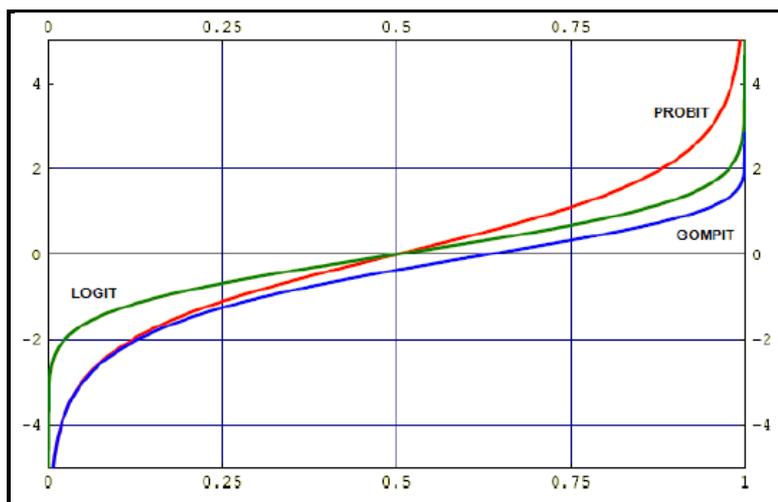


Figura 4.16 Curvas das funções Logit, Normit e Gompit

As transformações do Logit e Probit são simétricas em relação a 0,5, onde o seu valor é zero. As três transformações são semelhantes, embora a Logit seja mais linear, podendo-se considerar praticamente reta entre 0,2 e 0,8. Em relação à transformação Gompit, não é simétrica, apresentando um crescimento rápido para valores grande de probabilidade.

Resumidamente, pode-se dizer que o modelo Normit (ou Probit) é uma alternativa do modelo Logit que admite a função de distribuição Normal (standard) para expressar a relação não linear entre as probabilidades estimadas da variável dependente e as variáveis explicativas.

O modelo Normit assim como o Logit é estimado pelo método da Máxima Verossimilhança, método de estimação não linear.

Uma vantagem da função de ligação Logit é que ela provê a estimativa da razão das chances para cada variável-preditora no modelo. Se a razão das chances for um, não há associação.

O método utilizado pela função Logit é o da máxima verossimilhança que tem como objetivo maximizar a função da verossimilhança (ou o logaritmo desta), isto é, obter

(através de um processo iterativo) os valores dos parâmetros do modelo de modo que a probabilidade de observar os valores de Y_i seja a mais alta (máxima) possível. Este método, de acordo Lo⁴⁴ (1986), é mais robusto no que se refere a confiabilidade dos resultados, do que a regressão linear.

Os resultados das estimações dos modelos Logit e Normit são similares em termos de significância estatística e precisão de ajustamento, contudo, os valores dos coeficientes estimados não são diretamente comparáveis.

De forma geral, a principal diferença entre os dois modelos está no fato de a distribuição logística apresentar caudas ligeiramente mais grossas do que a distribuição normal do modelo Normit, isto é, a probabilidade condicional P_i se aproxima mais lentamente para o 0 ou 1 do que no caso do modelo Logit.

Basicamente, não há razão forte que justifica optar por um dos dois modelos, uma vez que o método de estimação é o mesmo (método da Máxima Verosimilhança). Diferem apenas na função de distribuição acumulada.

Na prática, o modelo Logit é mais utilizado devido a sua especificação matemática mais simples.

Com tais indicações, partiu-se então para a fase de verificação dos resultados gerados na calibração. Para tanto, foram geradas as equações de regressão com os parâmetros e valores gerados na fase de calibração. No entanto, tais equações foram geradas apenas para os melhores resultados já indicados anteriormente e visualizados em vermelho na Tabela 4.8.

Com base nisso, optou-se ainda em já realizar e apresentar no gráfico das Curvas ROC uma comparação entre os resultados do melhor modelo gerado para Curitiba, no caso, Logit – Thiessen, e o melhor modelo gerado para cada uma das bacias. Tais resultados podem ser visualizados na Figura 4.17 e na Tabela 4.8.

⁴⁴ LO, A. W. **Logit versus Discriminant Analysis: A Specification Test and Application to Corporate Bankruptcies**, Journal of Econometrics, 1986, 31 (March), pp. 151-178.

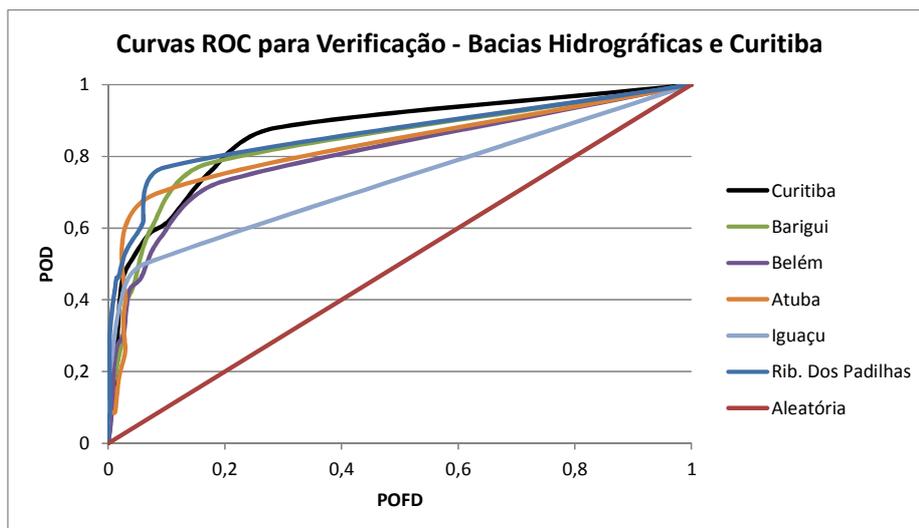


Figura 4.17 Comparação das Curvas ROC geradas para a verificação considerando apenas os melhores resultados para Curitiba e para as bacias hidrográficas.

Tabela 4.8 – Comparação da área sob a curva gerada para os melhores resultados por bacia e para Curitiba - Verificação

Resultado	Modelo	Período de Calibração	Período de Verificação
Melhor Modelo Curitiba	Logit – Thiessen	0,870434717	0,860412221
Melhor Modelo Barigui	Normit – Thiessen	0,854957237	0,832429991
Melhor Modelo Belém	Normit – Thiessen	0,846865332	0,799807125
Melhor Modelo Iguaçu	Normit – R ²	0,687975697	0,727746479
Melhor Modelo Atuba	Logit – Thiessen	0,854510627	0,811339944
Melhor Modelo Rib dos Padilhas	Logit – Thiessen	0,810476542	0,854130245

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

As curvas apresentadas na Figura 4.17 ilustram os resultados para a verificação do modelo em cada uma das bacias hidrográficas bem como para o município de Curitiba. Observa-se que para Curitiba a verificação apresentou resultado de 0,86 para a área sob a curva, mostrando bom desempenho quando considerado que para o período de verificação foi utilizado apenas os dados do ano de 2010.

Para as bacias de modo geral, verificou-se situação semelhante à de Curitiba, ou seja, os modelos gerados apresentaram bom desempenho, tendo em média 0,8 de área sob a curva. A bacia do Ribeirão dos Padilhas teve destaque, apresentado valor de área acima de 0,85.

Portanto, fazendo uso do método de regressão logística, atingiu-se o objetivo de gerar um modelo de previsão de alagamentos para Curitiba e para as bacias, utilizando-se

como base os dados de chuva acumulados de 6 em 6 horas para o dia do evento e 3 dias anteriores, concluindo-se que os dados mencionados permitem gerar um modelo de previsão probabilística satisfatório. Salienta-se que não se considera que os modelos gerados por bacia hidrográfica não poderiam ser empregados, no entanto, apenas possuem resultados inferiores ao modelo gerado para Curitiba, mas que estão dentro de um patamar de confiança.

Ainda, os resultados permitem concluir que é possível identificar via regressão logística a relação entre o índice de precipitação e os alagamentos. Mesmo ficando associado os maiores valores dos parâmetros para as variáveis que compõem o dia do evento (como já era esperado), ou seja, os últimos 4 valores de precipitação acumulados de 6 em 6 horas, as variáveis referentes aos 3 dias anteriores (no caso mais 12 variáveis) também são importantes na construção do modelo regressivo logístico. Isso permite distinguir de melhor forma as situações com elevada probabilidade de um alagamento vir a ocorrer ou não.

Dessa forma, tais resultados revelam que o modelo regressivo logístico construído e testado (Calibrado e Verificado) pode ser utilizado para elaborar previsões probabilísticas de modo operacional, objetivando a emissão de alertas de alagamentos em Curitiba, já que o mesmo possibilita associar um determinado padrão de chuva à ocorrência de um alagamento.

4.2.2 Desempenho do Modelo Redes Neurais (SOM)

De posse das conclusões a cerca do modelo regressivo do tipo logístico partiu-se para a construção do modelo baseado em rede neural (SOM), também objetivando a previsão da probabilidade de ocorrência de alagamentos e ainda o número esperado de alagamentos. Visto que para o modelo de regressão logística observou-se que o método para cálculo da chuva média mais adequado foi o de Thiessen e os melhores resultados foram gerados empregando-se como base Curitiba ao invés das bacias hidrográficas, definiu-se que seria utilizada a mesma base de dados gerada para Curitiba para a construção do modelo baseado em rede neural, até mesmo para que os métodos pudessem ser comparados.

Para tanto, levando-se em consideração os procedimentos adotados e já devidamente explicados na metodologia, foram geradas as probabilidades para a série de dados. Para tal, foram utilizados 8 arquivos de codebooks, 4 com dimensão de 10 x 10, portanto, 100 codebooks (padrões de chuva) e mais 4 com dimensão de 16 x 16, portanto 256 codebooks.

No trabalho, serão apresentados apenas os melhores resultados referentes a 2 arquivos de 100 e 2 arquivos de 256 codebooks. Tais procedimentos foram empregados tanto para a Calibração quanto para a Verificação, sendo os mesmos avaliados via Curva ROC e área sob a curva ROC.

A Figura 4.18 mostra as curvas ROC produzidas para a calibração, já apresentando também a comparação com o melhor modelo gerado para Curitiba que teve 0,87 de área sob a curva usando regressão logística.

Para melhor entendimento e compreensão, convenciono-se chamar os dois arquivos de 100 codebooks de “SOM 100 Codebooks A” e “SOM 100 Codebooks B” e os dois arquivos de 256 codebooks de “SOM 256 Codebooks A” e “SOM 256 Codebooks B”. O cálculo da área sob a curva está apresentado na Tabela 4.9.

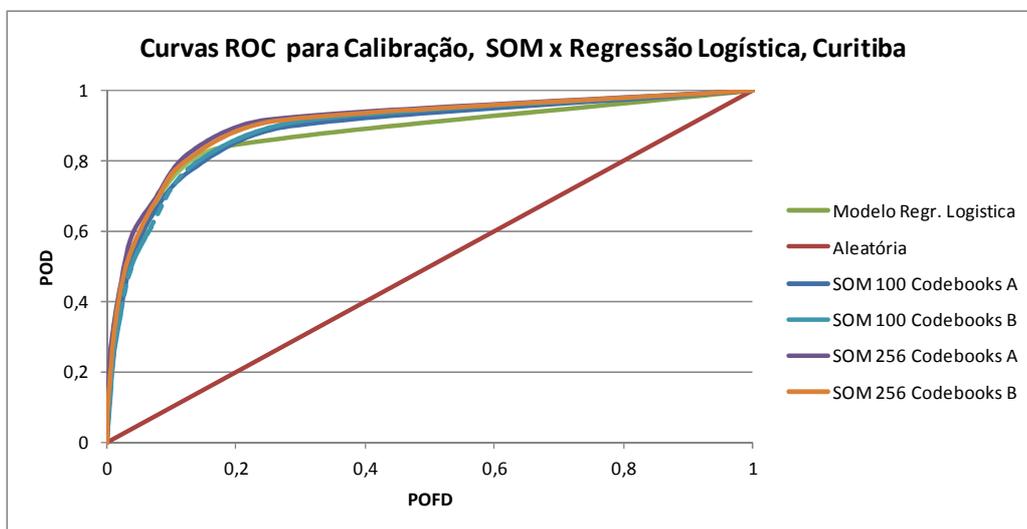


Figura 4.18 Curvas ROC geradas para a calibração considerando apenas os melhores resultados para Curitiba.

Tabela 4.9 – Resultados da área sob a curva para o município de Curitiba para o período de Calibração

Resultados	Período de Calibração
Melhor Mod. Ctba – Regr. Log.	0,870434717
SOM 100 Codebooks A	0,881893636
SOM 100 Codebooks B	0,885695386
SOM 256 Codebooks A	0,904623008
SOM 256 Codebooks B	0,898464822

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

Conforme pode-se observar na Figura 4.18 e na Tabela 4.9 as curvas apresentadas traduzem as expectativas de desempenho de um possível sistema de alerta usando um modelo baseado em rede neural. Analisando os resultados para a calibração, observa-se que os valores de área sob a curva foram idênticos quando utilizados 100 e 256 codebooks, com 0,88 e 0,90 de área respectivamente. De forma geral, pode dizer que o desempenho é praticamente igual, com variação de apenas 0,02 no valor da área.

Em uma análise mais detalhada, verifica-se que o modelo que apresentou maior área foi o que utilizou o arquivo chamado “*SOM 256 Codebooks A*” com área acima de 0,90. Comparando-se tais resultados com o melhor resultado advindo da regressão logística, constata-se que houve um ganho de 0,03 no valor da área, ou seja, passou de 0,87 para 0,90, mostrando que o modelo construído via SOM pode ser considerado superior.

Com vistas ao que foi descrito e tendo como premissa que o SOM possui melhor desempenho do que a regressão logística utilizando Curitiba como base, decidiu-se investigar se os resultados também eram satisfatórios se fossem gerados por bacia hidrográfica. Para tanto, utilizou-se da base de dados de chuva para Curitiba e do melhor arquivo de codebooks (“*SOM 256 Codebooks A*”) e aplicou-se o modelo construído para Curitiba nas bacias hidrográficas. São apresentados a seguir os resultados para as bacias analisadas.

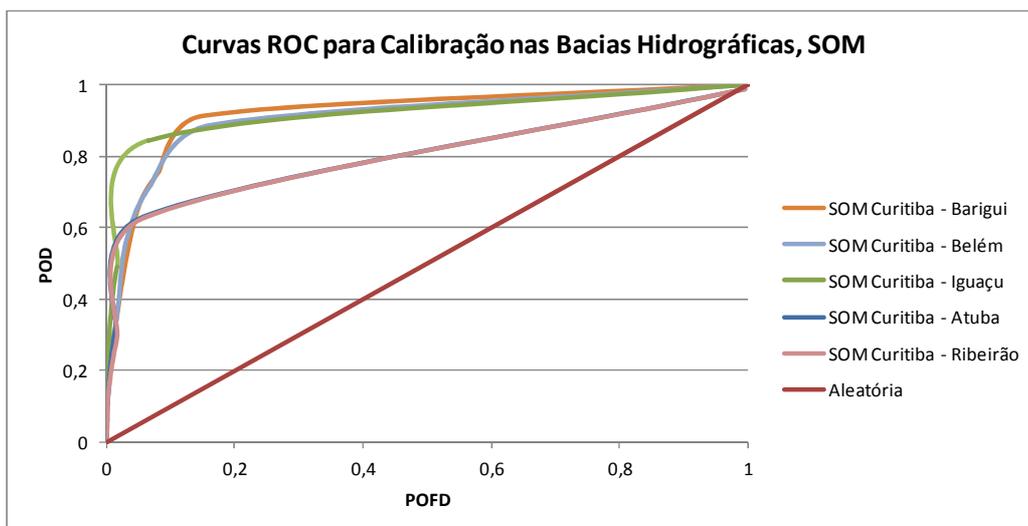


Figura 4.19 Curvas ROC geradas para a calibração considerando as bacias hidrográficas

Tabela 4.10 – Resultados da área sob a curva ROC para as bacias hidrográficas no período de Calibração referentes ao modelo SOM

Resultados	Período de Calibração
Curitiba – Barigui	0,912611136
Curitiba - Belém	0,897826041
Curitiba - Iguaçu	0,89337752
Curitiba - Atuba	0,782307154
Curitiba – Ribeirão dos Padilhas	0,778932423

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

Conforme ilustra a Figura 4.19 e a Tabela 4.10 observa-se que para a bacia do Barigui, Belém e Iguaçu os valores de área sob a curva ROC são em torno de 0,90, estando no mesmo nível de desempenho do modelo gerado para Curitiba. No entanto, para a bacia do Atuba e Ribeirão dos Padilhas, a área ficou menor mostrando desempenho inferior. Assim, mostra-se que é possível gerar os modelos utilizando o SOM por bacia hidrográfica, no entanto para algumas, com menor grau de desempenho, ou seja, não se obteve ganho quando os modelos foram gerados individualmente por bacia hidrográfica.

Levando em consideração que o modelo gerado para Curitiba possui melhor desempenho quando comparado com os modelos gerados por bacia, decidiu-se por investigar na verificação (que testa o modelo construído na calibração) apenas o melhor resultado para 100 e 256 codebooks, ou seja, “SOM 100 Codebooks B” e “SOM 256 Codebooks A”. Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.20 e Tabela 4.12.

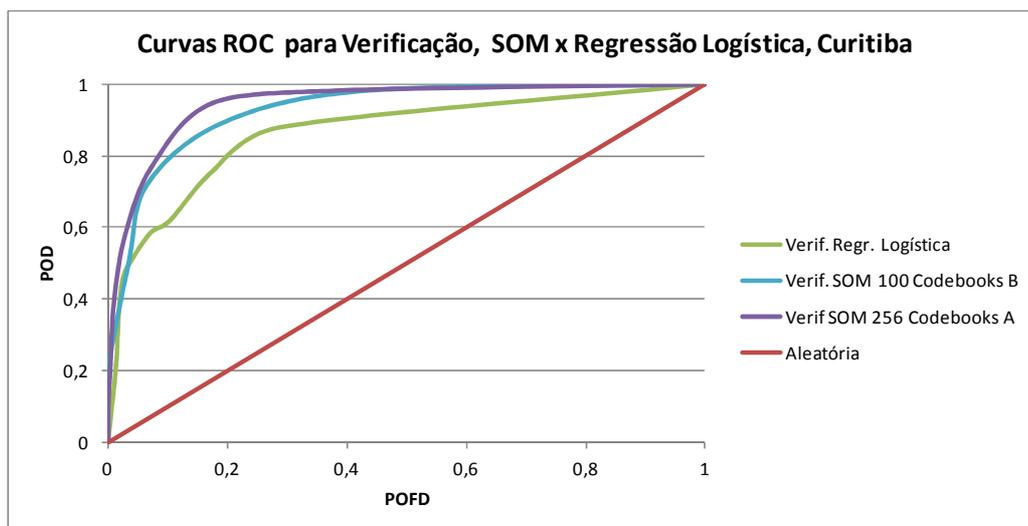


Figura 4.20 Curvas ROC geradas para a verificação considerando apenas os melhores resultados para Curitiba.

Tabela 4.11 – Resultados da área sob a curva para o município de Curitiba para a Verificação, SOM

Resultados	Período de Verificação
Melhor Mod. Ctba – Regr. Logístico	0,860412221
SOM 100 Codebooks B	0,919998877
SOM 256 Codebooks A	0,941705043

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

Analisando a Figura 4.20 e Tabela 4.11 fica bem caracterizado que o melhor desempenho se deu para as previsões que utilizaram 256 codebooks. A área sob a curva foi de 0,94 e 0,91 para 256 e 100 codebooks respectivamente. Comparando-se agora a área do melhor modelo gerado para Curitiba utilizando regressão logística, nota-se que o modelo baseado em rede neural foi superior tanto para 100 quanto para 256 codebooks, obtendo um ganho de 0,08 pontos quando considerada a área sob a curva ROC, passando de 0,86 para 0,94.

Elaborando-se uma análise geral e comparando os resultados gerados tanto para os modelos construídos utilizando regressão do tipo logística quanto para os modelos baseados em redes neurais e, considerando o período de dados analisados, conclui-se que os dois métodos mostraram que são passíveis de serem utilizados já que geraram resultados que ficaram acima de 0,87 para a calibração e acima de 0,86 para a verificação. Pôde-se mostrar por meio das comparações que os modelos gerados via regressão logística quanto

via rede de Kohonen geram melhores resultados quando aplicados para Curitiba como um todo, mas não descarta-se a hipótese de que podem ser também utilizados tendo a bacia hidrográfica como base, no entanto com desempenho um pouco inferior.

De qualquer forma, pode-se afirmar que o modelo construído com a rede SOM apresentou desempenho muito superior ao construído utilizando-se da regressão logística, visto que as curvas ROC e a área sob a curva ROC apresentaram ganhos consideráveis, chegando em 0,90 e 0,94 de área sob a curva na calibração e verificação respectivamente.

Especificamente sobre o método utilizado para avaliação do desempenho dos modelos construídos, ou seja, a Curva ROC, vale salientar que a mesma é utilizada em diversas áreas do conhecimento e é indicada pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) como método para avaliar o desempenho de previsões probabilísticas de clima. A curva ROC pode ser considerada um sistema altamente flexível podendo ser utilizada para avaliar o desempenho de variáveis do tipo dicotômicas, categóricas, contínuas e probabilísticas.

Considerando-se que a curva de características operacionais pode ser utilizada em um sistema de emissão de alertas para indicar o ponto de corte entre emitir o alerta ou não, seu ajustamento operacional é realizado por meio da alteração do limite de determinado preditor a partir do qual se emite o alerta, o que significa um deslocamento sobre a mesma curva ROC. Por outro lado, de acordo com Leite (2008), o ajustamento tecnológico é realizado por meio do estabelecimento de uma nova curva ROC, na qual a relação entre *POD* e *POFD* se torne mais favorável.

Especificamente em relação à taxa *POD* e *POFD*, salienta-se que a definição do ponto de corte para emissão do alerta deve ser entendida como de fundamental importância, já que possui consequências diretas para a sociedade.

A taxa *POD* pode ser traduzida pela proporção de *eventos* que foram alertados, mostrando a eficiência do alerta propriamente dito. A taxa *POFD* traduz a proporção de situações de *não evento*, mas que foram alertados, ou seja, os falsos alertas. Quando utilizadas em um sistema de forma operacional impactam a percepção de risco. Por exemplo: uma taxa *POD* baixa cria na população a percepção que o sistema é ineficiente pois o evento ocorre porém sem emissão do alerta. Da mesma forma, se for selecionado uma taxa *POFD* alta, cria-se situações de perturbação para a população pois são emitidos muitos alertas sem a ocorrência subsequente do evento, ou seja, o sistema pode ser percebido como exagerado, causando sensação de descrédito junto a população usuária.

Refletindo sobre a situação apresentada, pode-se dizer que em ambos os casos a principal consequência é o sistema perder credibilidade junto a população e aos que deveriam ser beneficiados. Primeiro porque o sistema não possui capacidade de antecipar o evento e segundo por emitir quantidade exagerada de falsos alertas. Nesse cenário, tem-se desde a geração de perdas diversas como, por exemplo, a perda de bens, falta de energia elétrica, água entre outros, até situações de estresse ou ainda perda de vidas, já que as medidas de proteção (no caso dos alertas) que deveriam ser implementadas, não o são de forma satisfatória.

Neste sentido, deve haver um balanço adequado entre POD e POFD, objetivando otimizar da melhor maneira possível a eficiência do sistema para emissão dos alertas. Portanto, o melhor sistema é aquele que possui a maior taxa POD e a menor taxa POFD, pois é o que gera motivação para o empreendimento de medidas de proteção pela população. Ressalta-se ainda que para que a população possa ser beneficiada verdadeiramente, é necessário que a mesma participe do processo e seja educada no sentido de entender que para que se tenha uma taxa POD *desejável* é necessária certa taxa POFD.

Ainda discorrendo sobre métodos de avaliação de previsões probabilísticas, decidiu-se investigar os aspectos de qualidade traduzidos via os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento para as previsões geradas com o SOM e regressão logística (Figura 4.21). Como já discutido no item 2.11.3, a confiabilidade traduz o grau de concordância entre probabilidades previstas e subsequentes frequências relativas observadas. A discriminação retrata a maneira como o sistema previsor identifica situações de eventos e situações de não eventos. O refinamento demonstra o grau com que o sistema provê previsões probabilísticas próximas aos extremos, ou seja, zero ou um.

A Figura 4.21 apresenta os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento elaborados tendo como base as previsões geradas via a rede de Kohonen e regressão logística, tanto para o período de calibração quanto para de verificação. Salienta-se que em virtude dos dados utilizados para a calibração serem os mesmos utilizados para o treinamento da rede, obviamente os resultados são melhores. Os resultados a serem considerados mais relevantes são os gerados para a verificação, já que se trata de novas amostras sendo testadas nos modelos.

A confiabilidade é indicada pela proximidade das curvas analisadas, da curva traçada na diagonal. Se a curva está abaixo da linha (vermelha), isto indica superestimativa

(probabilidades previstas mais altas), e pontos acima da linha indicam subestimativas (probabilidades previstas mais baixas).

Conforme se pode observar na Figura 4.21, para a calibração, tanto a curva que representa a regressão quanto a que representa o SOM, estão próximas da curva traçada na diagonal, indicando que as previsões foram satisfatórias. Para a verificação, nota-se que há diferenças significativas quando comparadas as curvas da regressão logística e do SOM. Para probabilidade até 0,25 a curva da regressão é muito próxima a diagonal, indicando bom desempenho. De 0,3 a 0,65 há superestimativa, de 0,65 a 0,85 subestimativas e de 0,85 a 1 superestimativas. Nota-se que há uma oscilação da curva, ora super ora subestimando, não representando portanto, noção de continuidade. No geral, a regressão mostra tendência de superestimar as probabilidades previstas o que é preferível quando se considera situações em que há risco humano, por exemplo.

Para a curva do SOM, observa-se superestimativas até 0,25 e tendência a subestimar as previsões para valores maiores de 0,3. No entanto, nota-se que a partir do limiar de 0,3 tem-se uma condição de sempre subestimar, mostrando certo grau de continuidade. Como o interesse para emissão de alertas são as probabilidades mais altas, podem ser aplicadas técnicas de recalibração para tratar o problema. Neste sentido, em função da oscilação da curva que representa a regressão, a recalibração poderia ser prejudicada.

Em relação à discriminação, nota-se que para a calibração e para a verificação, as curvas que representam a regressão e o SOM para situações de não evento ($x=0$) são praticamente iguais, mostrando que os dois sistemas de previsão possuem boa capacidade de discriminar tais eventos, como já era de se esperar, já que ao longo do ano tem-se muito mais dias sem alagamentos do que com alagamentos. Para as situações de evento ($x=1$), as curvas da regressão e do SOM mostram comportamentos parecidos tanto na calibração quanto na verificação, no entanto mostrando dificuldade do sistema em produzir previsões probabilísticas altas para tais situações.

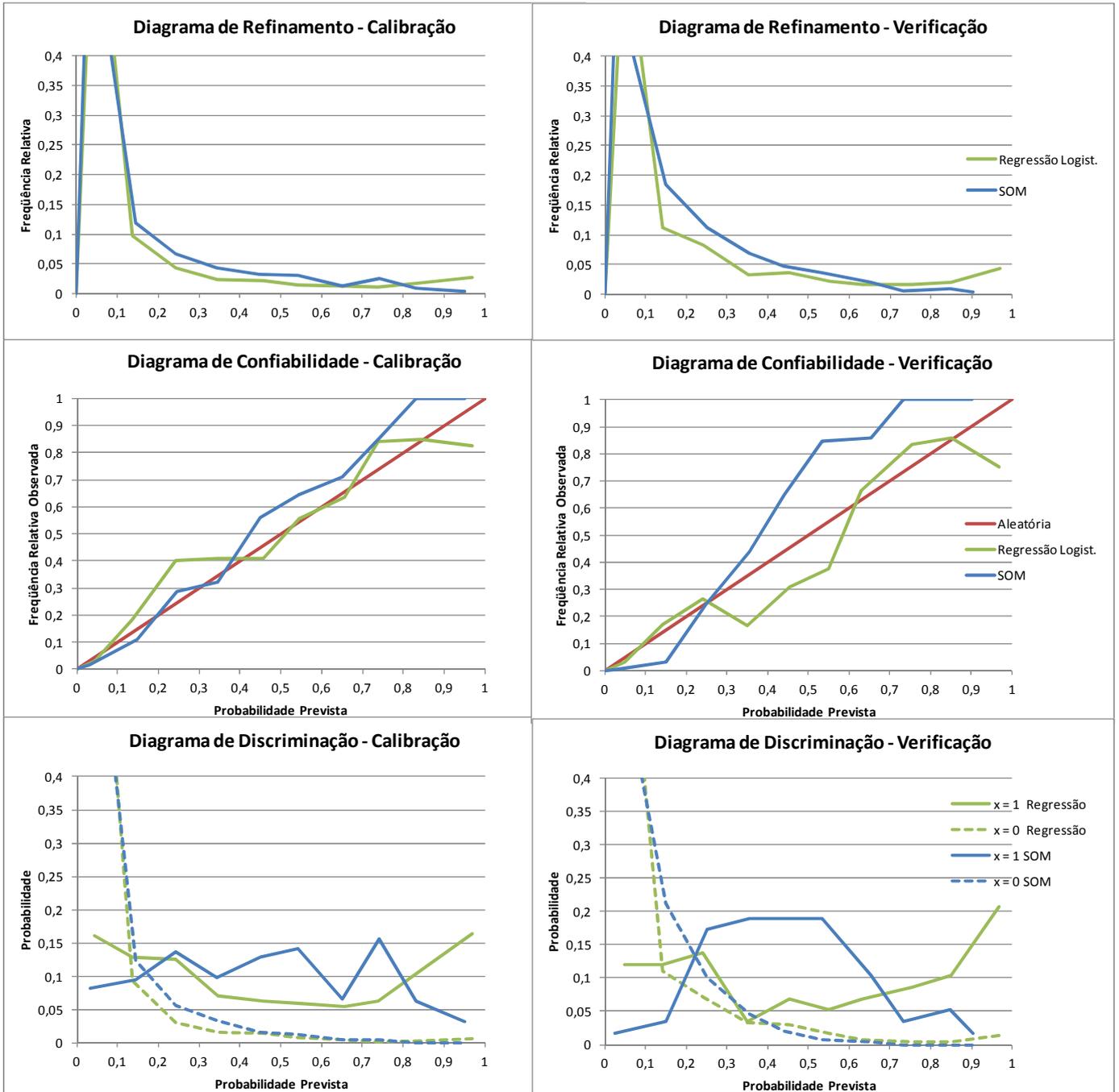


Figura 4.21 Diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento das previsões geradas via regressão logística e SOM

Observa-se que a regressão apresentou uma capacidade um pouco maior (em torno de 10%) quando comparada com o SOM, refletido já nos diagramas de confiabilidade, onde a regressão mostrou tendência de superestimar as previsões de maior probabilidade.

No diagrama de refinamento (sharpness diagram) pode-se perceber que as curvas, tanto para a calibração quanto para a verificação, são muito parecidas ficando evidente que para previsões entre 0 e 0,2, tem-se maiores frequências observadas para o SOM e menores

frequência para a regressão. Para previsões acima de 0,8, observa-se o contrário, ou seja, maior frequência para a regressão e menor para o SOM.

De forma geral, tanto o diagrama de refinamento quanto o de discriminação refletem o que é observado no diagrama de confiabilidade, como já discutido.

Aqui vale uma ressalva e explicação a cerca do que foi discutido até o presente momento sobre a qualidade dos métodos de avaliação para previsões probabilísticas, ou seja, ora o modelo baseado em regressão do tipo logística mostra-se melhor e ora o modelo baseado em redes neurais. Esse fato é justificável e esperado se for considerado o limitado tamanho da amostra utilizada para tais análises, ou seja, os dados trabalhados foram de apenas 6 anos (2005 a 2010).

Além disso, essa amostra ainda foi dividida, pois se necessitava calibrar os modelos construídos e posteriormente testá-los. Assim, foram utilizados os dados de 5 anos (2005 a 2009) para construir os modelos e de 1 ano (2010) para testá-los. Em função disso, infere-se que se aumentada a amostra, os preditores utilizados para construir os modelos ainda podem ser melhorados e, como consequência, gerar aumento de desempenho e maior qualidade das avaliações ora apresentadas.

4.3 Os Padrões de Chuva

Como já sabido, o SOM possui como principal característica, ser uma rede que faz o reconhecimento de padrões dentro de uma determinada série de dados. Kohonen (2000) comenta que o reconhecimento de padrões é uma tarefa que aproxima muito as redes neurais dos seres humanos, podendo ser definido como o processo em que um conjunto de entradas ou características (padrão) é atribuído a uma classe entre um conjunto definido de classes. É também chamado de classificação.

De acordo com os resultados evidenciados nas análises elaboradas tendo como base os modelos gerados e testados via a rede SOM mostrou-se que o melhor desempenho foi do modelo construído e testado para Curitiba com o arquivo de 256 codebooks chamado "SOM 256 Codebooks A", que teve 0,90 e 0,94 de área sob curva ROC na calibração e verificação respectivamente.

A partir da identificação dos padrões de chuva, que são exatamente os ligados a deflagração dos alagamentos em Curitiba, fez-se a associação da probabilidade em que cada padrão ocorre.

Foram analisados os padrões que ocorrem com probabilidades maiores ou iguais a 75% e probabilidades maiores ou iguais a 50%. Tal definição se deu em função de considerar que os padrões com probabilidades abaixo desses limiares possuem chances mais reduzidas de causarem alagamentos, perturbando a análise dos padrões. Para as probabilidades maiores ou iguais a 75% e 50% foram identificados e agrupados dois tipos principais de padrões, os quais se convencionou chamar de "Padrão 1" e "Padrão 2". A Figura 4.22 a 4.25 caracterizam em forma de gráfico tais padrões.

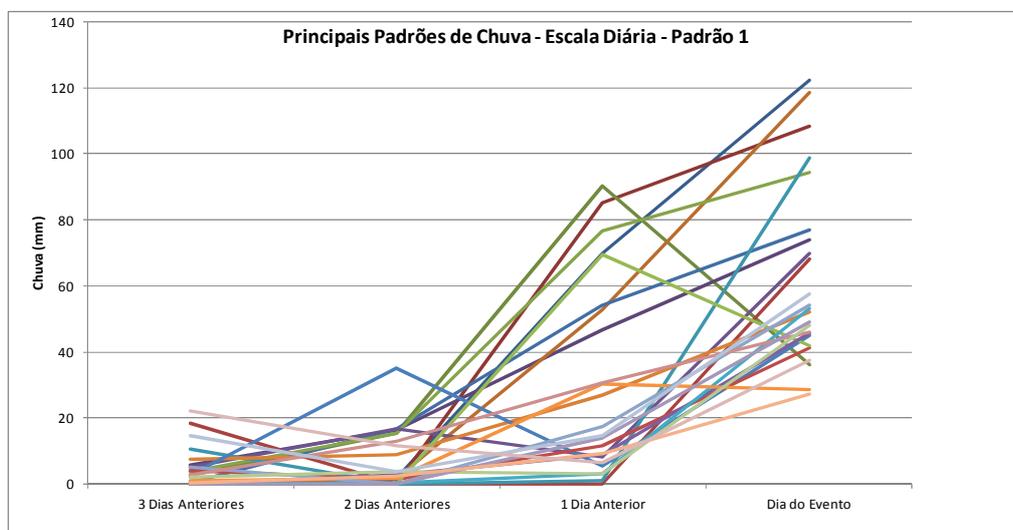


Figura 4.22 Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 75%

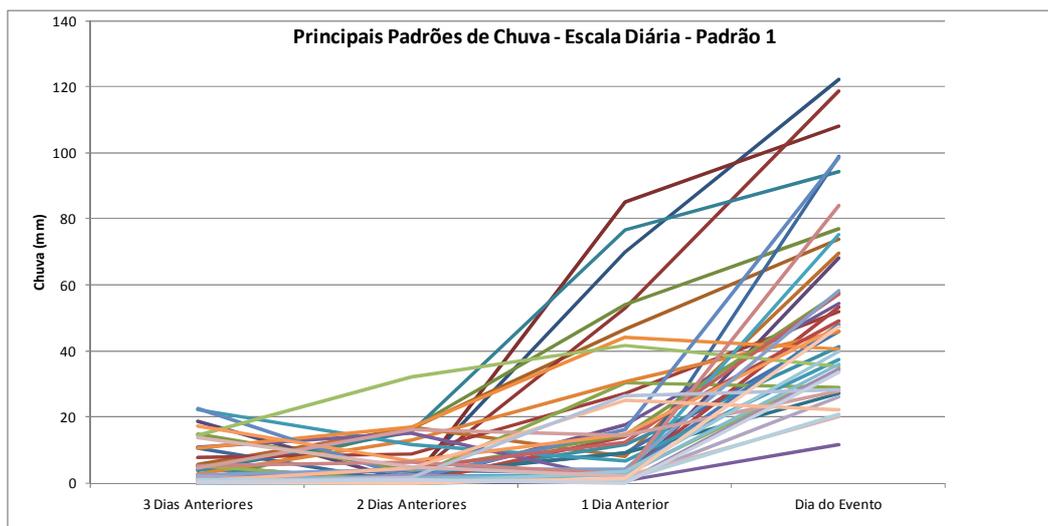


Figura 4.23 Padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 50%

Salienta-se que para as análises e apresentações dos resultados referentes aos padrões, a chuva foi acumulada em períodos diários.

A partir da análise dos gráficos, nota-se que o padrão 1, tanto para probabilidades maiores ou iguais a 75% como 50%, está ligado muito mais a dinâmica da chuva que ocorre especificamente no dia do evento do que a chuva que ocorre nos dias anteriores, sendo estas últimas de menor importância na deflagração de um alagamento. No entanto, observa-se que, mesmo com menor importância, têm-se chuvas significativas também no primeiro dia anterior ao do evento.

Com relação a quantidade precipitada no dia do evento levando em consideração as probabilidades maiores ou iguais a 75% tem-se valores acima de 20 mm podendo chegar até maior de 100 mm, com média de 62,2 mm. Para 1, 2 e 3 dias anteriores a média de precipitação é de 30,6 mm, 7 mm e 4,5 mm respectivamente, mostrando novamente a importância da chuva no dia do evento.

Em relação a precipitação que ocorre levando em consideração as probabilidades maiores ou iguais a 50%, a média para o dia do evento é de chuvas em torno de 53,5mm e para o primeiro, segundo e terceiro dias anteriores é de 18,5 mm, 5,7 mm e 5,1 mm respectivamente.

De forma geral, pode-se dizer que o padrão 1 de chuva está intimamente ligado as chuvas convectivas, também chamadas de “chuvas de verão”, que ocorrem devido ao aquecimento de massas de ar úmido que estão em contato direto com a superfície quente,

sendo caracterizadas pela grande intensidade, curta duração e concentradas em pequenas áreas.

As Figuras 4.24 e 4.25 mostram o padrão 2 de chuvas, também para probabilidade maiores ou iguais a 75 e 50%. Pode-se notar que fica bem caracterizada a grande diferença deste padrão quando comparado com o padrão 1, principalmente em função de no dia do evento a quantidade precipitada ser bem menor ou até nula, como no caso do padrão analisado para probabilidade $\geq 75\%$. Dentre os padrões analisados para probabilidades $\geq 75\%$ foram encontrados apenas quatro com o mesmo comportamento. Para probabilidades $\geq 50\%$ o número já foi bem maior, e também mostrando o mesmo comportamento.

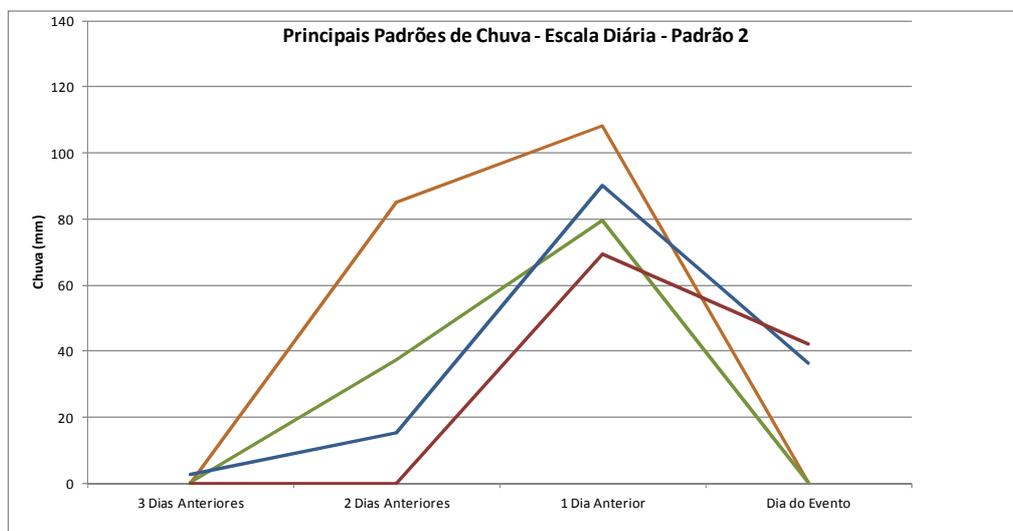


Figura 4.24 Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 75%

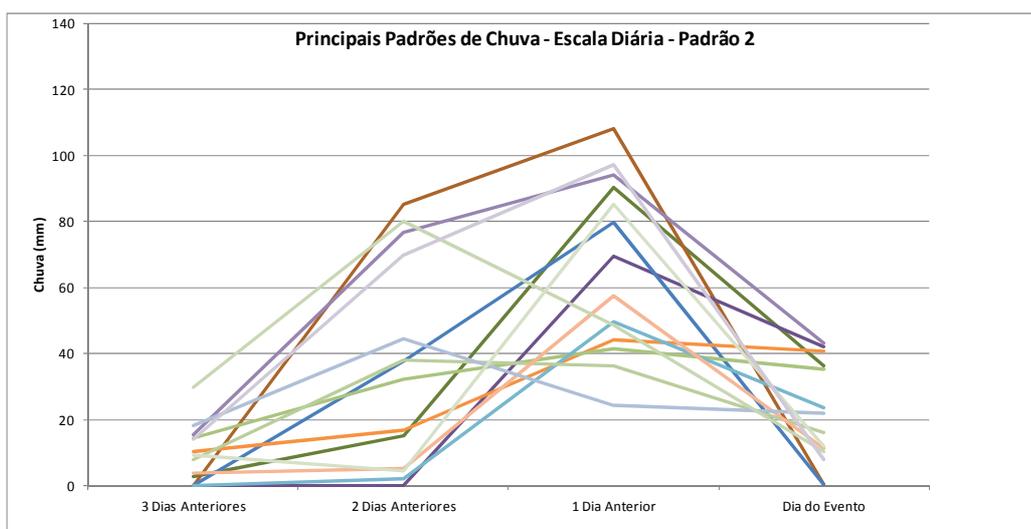


Figura 4.25 Padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 50%

Como comentado, os gráficos refletem de maneira clara que a chuva de maior intensidade é aquela ocorrida no dia anterior ao do evento ou até 2 dias anteriores, com quantidade precipitada em torno de 80 mm até maior que 100 mm (Figura 4.24) e que podem variar de maior de 20 mm a maior de 100 mm (Figura 4.25).

A partir de tais dados, infere-se que para deflagrar um alagamento em um dia posterior, tal quantidade de chuva tenha ocorrido durante a noite do dia anterior ou ainda estar associada a chuvas de intensidade média ao longo de todo o dia anterior. Como para os registros de alagamento analisados tem-se os dados referente ao horário em que o mesmo ocorreu para os anos de 2009 e 2010, considera-se que tal explicação tenha coerência.

Sob outra perspectiva e interpretação, percebe-se que ao longo do segundo e terceiro dias anteriores ao do evento, mesmo que pequeno, há registros de chuva. Quando associado esse montante ao ocorrido no dia anterior ao do evento, demonstra-se que nesse caso os alagamentos se dão muito mais em função do acumulado de chuva durante o período do que o ocorrido no dia do evento, ao contrário do padrão 1.

Para este padrão, infere-se que a chuva tenha um comportamento mais ligado a dinâmica das frentes frias, que costumam trazer quantidades significativas de precipitação quando atuam sobre Curitiba. Quando há uma frente estacionária atuando sobre Curitiba, por exemplo, a frente fria deixa de se mover. Se existirem ciclones migrando ao longo dessa frente estacionária, há maior possibilidade das precipitações serem em maior quantidade (vezes e mm). Assim, infere-se que o comportamento apresentado pelo padrão 2 esteja ligado a tal dinâmica, ou seja, chuvas regulares ao longo de mais dias.

Comparando em termos de frequência o padrão 1 e 2 verifica-se que o padrão 1 além de ser o mais freqüente, também apresentou maiores intensidades máximas de chuva, atingindo índices superiores a 120 mm acumulados em um dia, com diminuição ao longo dos dias anteriores. O padrão 2 ocorre com menor frequência, no entanto, com intensidades de chuva diária podendo superar 100 mm.

Ressalta-se que a idéia de comparar os padrões de chuva do ponto de vista de sua frequência não segue a linha de raciocínio utilizada para dimensionamento de obras de controle de erosão e hidráulicas (vertedores de barragens, sistemas de drenagem, galerias pluviais, dimensionamento de bueiros) ou ainda para identificar chuvas com maior poder erosivo, onde são calculadas equações de intensidade-duração-frequência (IDF) ou então classificadas em padrão avançado, intermediário e atrasado (HORNBERG & JENSEN, 1941).

Neste trabalho, os aspectos ligados a intensidade, duração e frequência são analisados de forma geral, buscando diferenciar e caracterizar os padrões de chuva responsáveis por causar os alagamentos gerados via o SOM.

Ainda com objetivo de caracterizar os padrões, agora principalmente em termos de intensidade e duração, foram elaborados gráficos de área, buscando quantificar a chuva acumulada para o dia correspondente, a partir do cálculo dos percentis para 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95 e 100. Um gráfico de área enfatiza a magnitude de alteração ao longo do tempo. Os valores de chuva em milímetros foram exibidos como um conjunto de pontos conectados por uma linha, com uma área preenchida abaixo da linha. Os valores são representados pela altura do ponto medida pelo eixo “y”. Os rótulos de categoria, neste caso os dias, foram exibidos no eixo “x”. Associado a este gráfico optou-se por incluir a mediana

Neste estudo, os gráficos de área mostram em termos de porcentagem, qual o limite mínimo e máximo de chuva que está relacionado a um padrão e, portanto, a ocorrência de um evento de alagamento ao longo dos 4 dias analisados.

Analisando a Figura 4.26 que mostra o gráfico de área para o padrão 1, ou seja, padrões com alta probabilidade de ocorrência (acima de 75%), pode-se observar novamente que a chuva no dia do evento é primordial para ocorrência dos alagamentos.

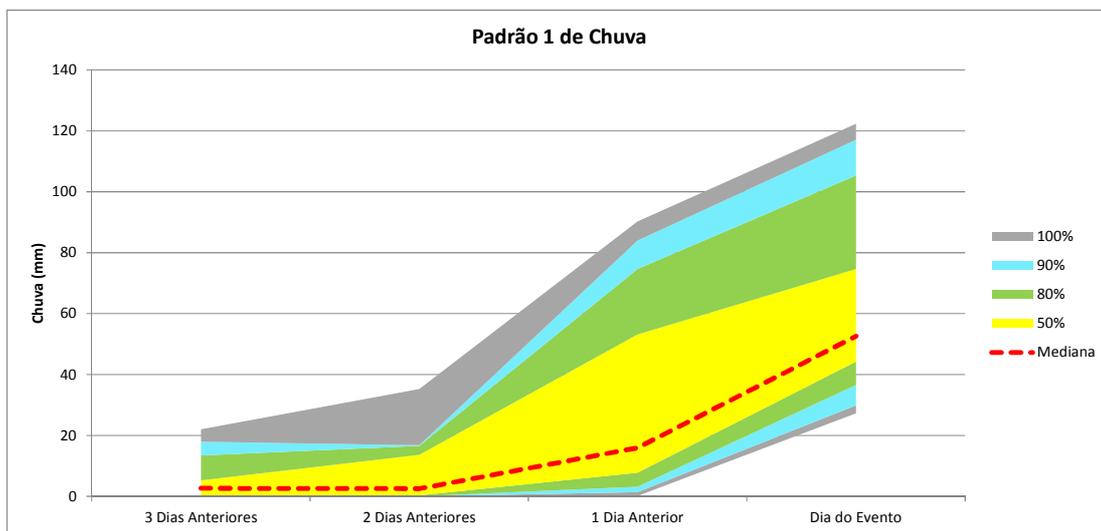


Figura 4.26 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 75%

Em 50% dos casos, o índice pluviométrico teve como mínimo 36 mm/dia e 74 mm/dia como o máximo, ficando a mediana em 52 mm/dia. Levando em conta 80% dos

casos analisados, para padrões de probabilidades maiores de 75%, o índice pluviométrico mínimo e máximo ficou entre 29 e 105 mm/dia respectivamente.

No dia anterior ao do evento, em 50% dos casos os valores de chuva variaram entre 3 e 53 mm para o mínimo e máximo, com mediana de 15 mm. Analisando 80% dos casos, tais índices tiveram variação entre 1 e 74mm/dia. Pode-se perceber ainda que no segundo e terceiro dias anteriores, a chuva já torna-se de menor relevância, com mediana próxima de 0 mm/dia.

Com tais resultados e interpretações, pode-se afirmar que para que se tenha grande probabilidade de ocorrência de evento de alagamento em Curitiba (56%), deve-se ter chuva acumulada em torno de 36mm no dia do evento.

Sob outra perspectiva e ainda levando em conta as áreas representadas no gráfico, avalia-se que a relação entre os dias e a quantidade de chuva precipitada é crescente ao longo dos 4 dias, mostrada pela maior inclinação das curvas e também da mediana, traduzindo sempre tendência positiva e comprovando que o dia do evento possui maior relevância.

Quando analisado o padrão 1 com probabilidades maiores ou iguais a 50% (Figura 4.27), verifica-se que a tendência positiva apresentada no gráfico anterior se mantém, visto que a curva representando a mediana possui praticamente a mesma inclinação da apresentada anteriormente.

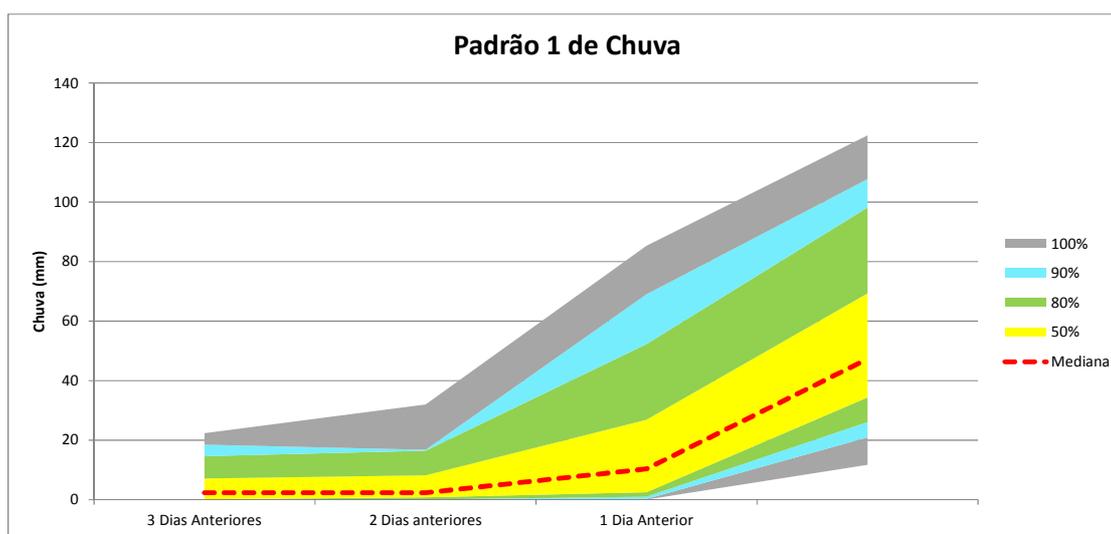


Figura 4.27 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 1 – probabilidades acima de 50%

No entanto, enquanto a mediana tinha como valor 52 mm no dia do evento para probabilidades maiores ou iguais a 75%, agora é de 41 mm, com índices de 11 e 57 mm para o mínimo e máximo respectivamente, mostrando diminuição dos valores em função da maior quantidade de dados analisados. De qualquer forma, ainda fica evidente que a chuva no dia do evento é primordial para ocorrência dos alagamentos.

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam os gráficos de área para o padrão 2 de chuva, para probabilidades maiores ou iguais a 75 e 50% respectivamente.

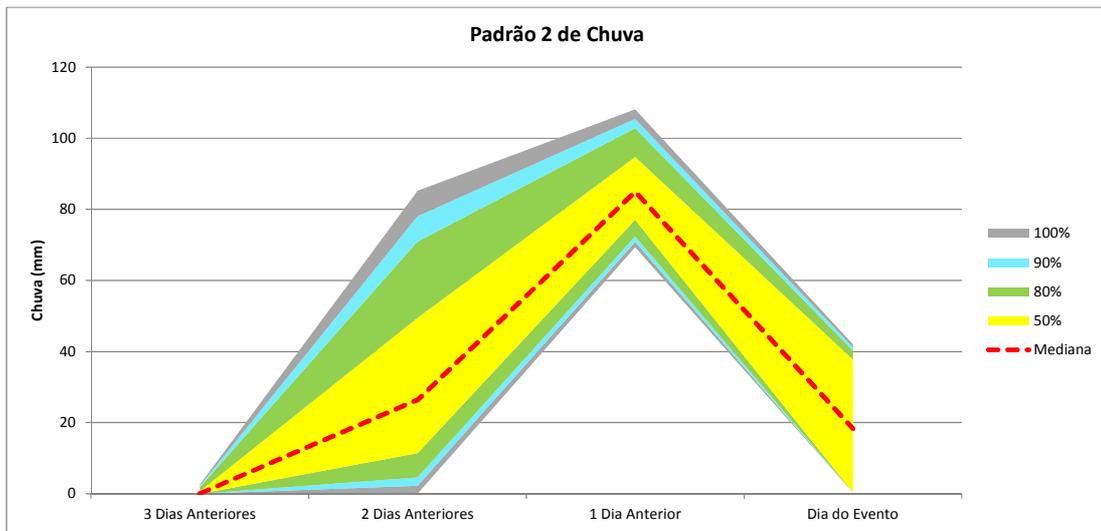


Figura 4.28 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 75%

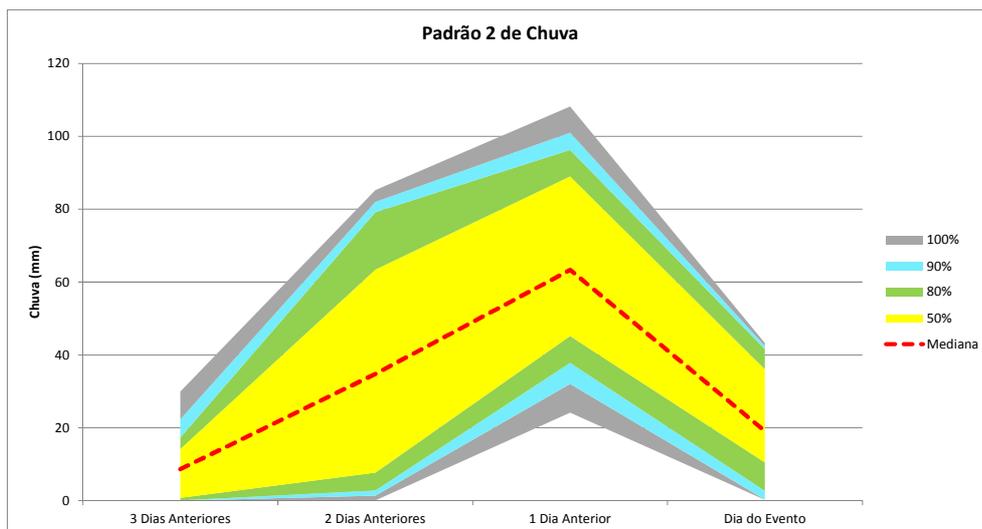


Figura 4.29 Gráfico de área dos padrões de chuva do tipo 2 – probabilidades acima de 50%

Corroborando o que já foi discutido, os gráficos traduzem a importância da chuva no dia anterior ao do evento. Na Figura 4.28, em função de serem utilizadas apenas 4 curvas (rever Figura 4.24) para geração do gráfico, nota-se um comportamento em que praticamente em todos os casos a chuva no dia anterior teve índices pluviométricos superiores a 70 mm, demonstrando que este índice é o responsável por deflagrar alagamentos no próximo dia. A mediana foi de 84 mm de chuva. No dia do evento, ao contrário, a mediana foi de 18 mm.

O gráfico da Figura 4.29 ilustra a mesma dinâmica já descrita acima. No entanto em função da maior quantidade de curvas (rever Figura 4.25) utilizadas para gerar o gráfico, verifica-se um comportamento que possa representar de melhor forma este padrão. Com relação aos índices pluviométricos, constata-se que em 50% dos casos o mínimo ficou acima de 10 mm e o máximo acima de 85 mm para o dia anterior ao do evento. A mediana foi de 53 mm. No dia do evento, a mediana foi de 22 mm, sendo o mínimo de 4 e o máximo de 37 mm.

Sintetizando os resultados para o padrão 2 de chuva, pode-se afirmar que as curvas apresentam tendência de crescimento a partir do terceiro dia até o primeiro dia anterior ao do evento, sendo que especificamente no dia do evento, os índices pluviométricos podem ser até de zero, mas podendo atingir 40 mm. Ainda, verifica-se que tanto no terceiro quanto no segundo dias anteriores ao do evento existe registros de chuva mostrando novamente que a dinâmica dos alagamentos quando considerado este padrão se dá em virtude do acumulado de chuva no período e não em função de chuvas torrenciais em um dia apenas.

Como afirmado no início da discussão deste item, todos os resultados foram gerados observando-se a chuva acumulada diária. Apenas a título de curiosidade, apresenta-se na Figura 4.30 uma análise com a chuva acumulada a cada 6 horas para **todos** os padrões com probabilidades maiores ou iguais a 75%.

A partir do gráfico de área, constata-se que realmente os alagamentos se originam com maior frequência a partir da chuva ocorrida no dia do evento, principalmente a chuva ocorrida nas últimas 12h. Nota-se que podem ser identificados dois picos em que a chuva é mais significativa, variando em “A” de 5 a 38 mm/6h e em “B” de 0 a 20 mm/6h para os limites mínimos e máximos respectivamente e para 50% dos casos (cor amarela). Os valores para a mediana e “A” e “B” são de 18 e 7 mm/6h respectivamente.

Considerando estes dois picos, pode-se fazer referência aos dois tipos de padrões discutidos anteriormente e verificar em quais horas do dia as chuvas são mais

significativas, sendo que para o padrão 1 são as últimas 12 horas e para o padrão 2 também as últimas 12 horas do dia anterior, mostrando novamente que possivelmente a chuva que deflagra alagamentos considerando o padrão 2 é a que ocorre principalmente na noite anterior ao dia do evento.

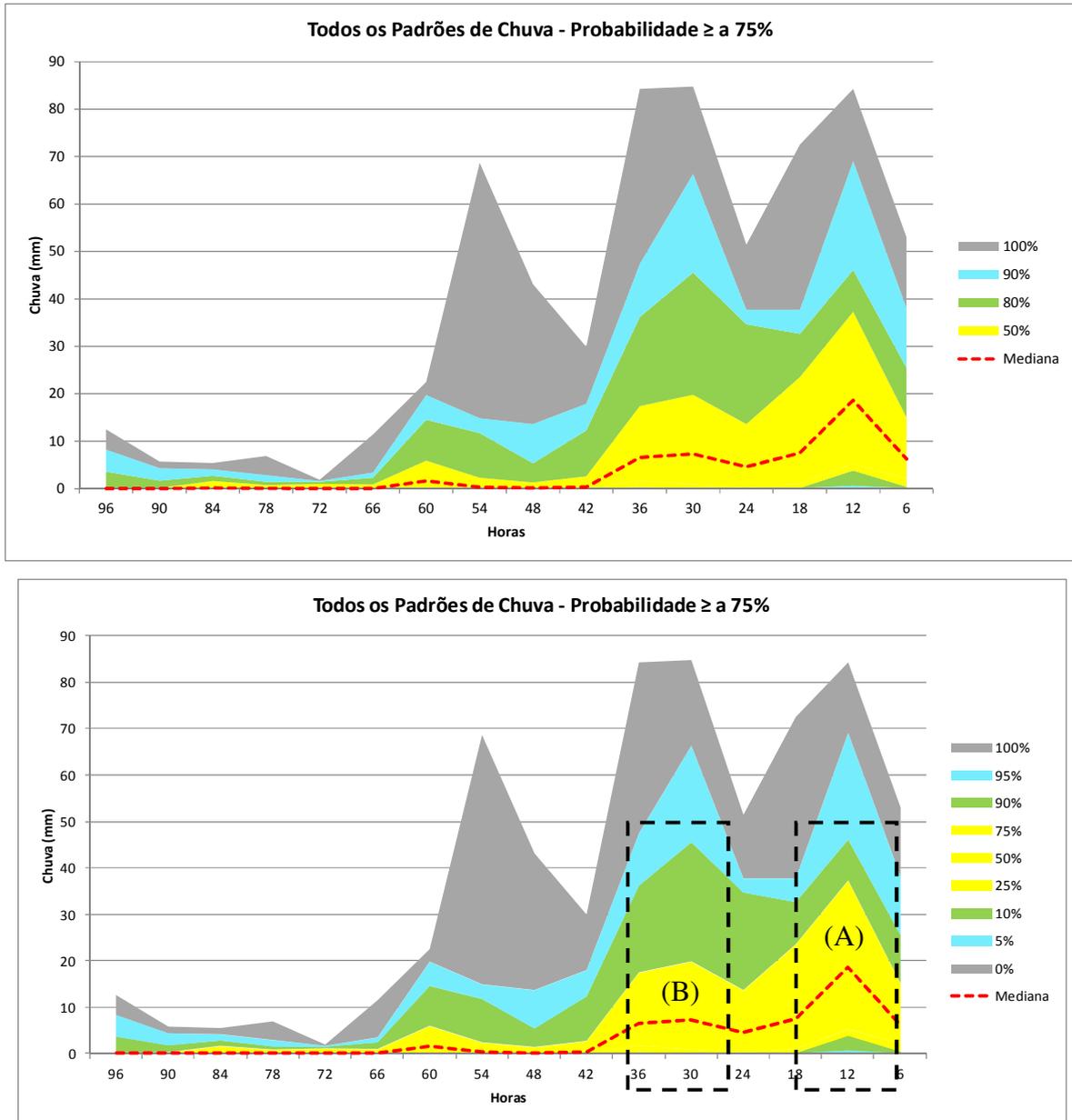


Figura 4.30 Gráfico de área para todos os padrões de chuva considerando as probabilidade maiores ou iguais a 75% - Escala de 6 horas

Pode-se ainda caracterizar a partir da inclinação das curvas, a tendência crescente para o índice pluviométrico ao longo de 6 em 6 horas, com pico nas últimas 12 horas.

Ainda com a intenção de caracterizar os padrões de chuva, mas pensando especificamente na frequência em que cada um desses padrões ocorre, foram elaborados

gráficos de frequência acumulada, considerando o acumulado diário para os 4 dias e probabilidades \geq a 75%, \geq a 50%, \leq a 50% e \leq a 25%.

A partir da análise dos gráficos de frequência acumulada representados na Figura 4.31, fica evidente que os padrões associados a altas probabilidades (\geq a 75% e \geq a 50%) são bem diferentes dos padrões associados a baixas probabilidades (\leq a 50% e \leq a 25%.) mostrando que a chuva no dia do evento é primordial para ocorrência dos alagamentos.

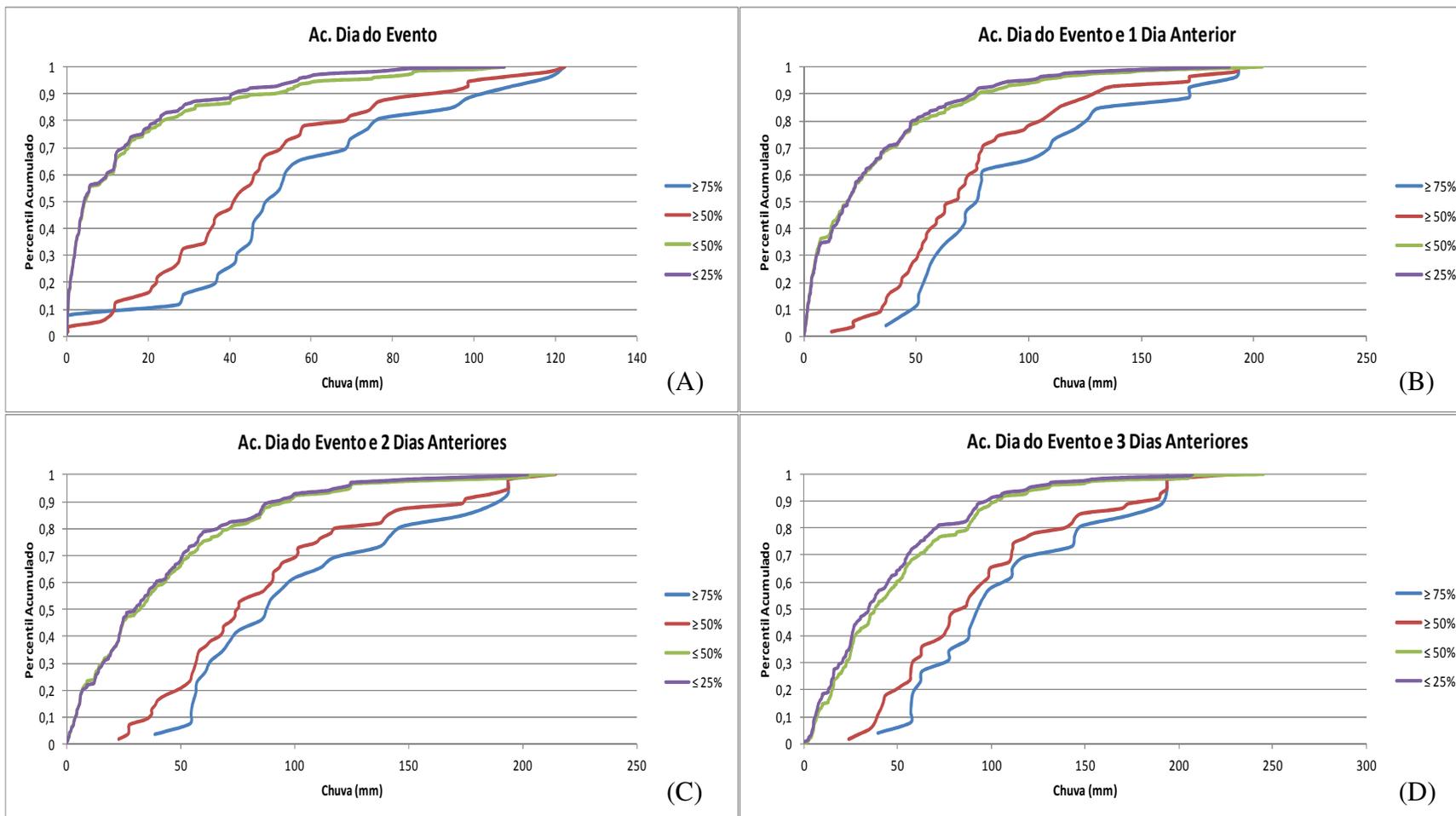


Figura 4.31 Gráfico de frequência da chuva acumulada no dia do evento, no dia do evento e 1 dia anterior, no dia do evento e 2 dias anteriores e no dia do evento e 3 dias anteriores, para probabilidades $\geq 75\%$, $\geq 50\%$, $\leq 50\%$ e $\leq 25\%$

Interpretando os gráficos, pode-se ainda dizer que os padrões associados a altas probabilidades de ocorrência realmente estão relacionados a processos de alagamentos e não de inundações, pois se estivessem ligados a inundações, a importância da chuva acumulada nos 4 dias teria maior relevância, ou seja, nos gráficos “C” e “D”, as curvas deveriam estar mais afastadas entre si e não com tendência de aproximação, mostrando que a chuva acumulada para 4 dias contribui, mas a de maior importância é a ocorrida no dia do evento. Tal fato fica evidente quando observa-se o gráfico “A”, em que as curvas estão afastadas uma da outra, ilustrando a importância da chuva no dia do evento.

No gráfico “A”, observa-se que há alta frequência de chuvas com menos de 20 mm e que estão associadas a baixas probabilidade de ocorrência, ou seja, \leq a 50% e \leq a 25%. O contrário também pode ser observado, pois para probabilidades \geq a 75% e \geq a 50% têm-se baixas frequências para chuvas em torno de 20 mm e maiores frequências para chuvas entre 30 e 70 mm corroborando o que já foi discutido nos gráficos de área sobre a quantidade de chuva necessária para deflagrar os alagamentos.

Ainda sobre o gráfico “A”, verifica-se que as duas curvas ligadas a baixas probabilidades de ocorrência de alagamento estão muito próximas, mostrando que não há diferenças significativas na precipitação que ocorre associada a estas probabilidades, diferentemente das curvas de 50 e 75% que já mostram alguma diferença.

Sendo assim, através de tais análises e das discussões apresentadas neste item, mostrou-se as principais diferenças em relação aos padrões de chuva definidos, bem como aspectos ligados a intensidade, duração e frequência.

Para concluir, sabe-se que os alagamentos se dão em função de um determinado padrão de chuva como já discutido, no entanto, há outros fatores que contribuem para sua ocorrência, como por exemplo, a questão já intrínseca das metrópoles (como Curitiba), referentes às grandes áreas pavimentadas e impermeáveis. Sabe-se que o processo de urbanização causa mudanças no microclima das cidades. O intenso processo de desmatamento e a construção de residências, edifícios, indústrias, ocupação das áreas de várzeas e a impermeabilização do solo com asfalto acarretam no aumento de temperatura dos centros urbanos em relação às áreas periféricas (afastadas do centro) e às áreas rurais.

Além do desmatamento e da impermeabilização do solo, o consumo de combustíveis fósseis por automóveis e indústrias torna a cidade uma fonte de calor, fenômeno conhecido como "ilha de calor". O aumento de temperatura nos centros urbanos intensifica a evaporação; além disso, o material particulado (poluentes) em suspensão

favorece a formação de núcleos de condensação na atmosfera. O resultado é o aumento da quantidade de chuvas.

Drew (1986) já mostrava que em áreas alteradas pela urbanização a quantidade de chuva anual é 5% maior e, em dias de chuva, a precipitação (quantidade de chuva medida) é 10% superior se comparada com as áreas rurais.

Aliado a esses fatores, tem-se a questão ligada a quantidade de lixo presente na cidade. O lixo acaba entupindo os bueiros e sendo carregado para as galerias pluviais e córregos que atravessam as áreas urbanas. Com isso, é diminuída a capacidade de recebimento e escoamento da água proveniente da cidade e por consequência, aumentada as chances de ocorrência dos alagamentos.

A prefeitura municipal, via secretaria de obras e de meio ambiente, faz um trabalho de manutenção permanente dos bueiros e galerias em Curitiba, no entanto a prioridade é a áreas central, ficando os bairros em direção a periferia descobertos de tal serviço, sendo comum apenas a visita quando há reclamação ou solicitação de limpeza.

De acordo com matéria publicada pela mídia impressa de Curitiba, é realizada a limpeza manual e também com a presença de um caminhão especial, mas como são inúmeros bueiros, fica praticamente inviável atender todos. Neste caso, os entupidos, acabam se tornando os grandes “vilões” em dias de chuva forte.

Vale lembrar que os alagamentos resultam por si só em impactos socioeconômicos. Quando associados a outros problemas tais como a falta de saneamento básico, a pobreza da população e a ocupação de áreas ribeirinhas, tende a gerar novos agravantes entre eles prejuízo com bens materiais (carros, motos, casas entre outros), interrupção de serviços básicos (energia elétrica, abastecimento de água, transporte público), problemas de saúde pública e até mesmo a perda de vidas.

4.3.1 Simulação de Padrões Hipotéticos

A partir dos resultados alcançados no que se refere a identificação de padrões de chuva com a utilização da rede SOM, vislumbra-se que seu emprego pode trazer grande vantagem na avaliação e geração da probabilidade e NEA para qualquer padrão de chuva que pode vir a ocorrer, ou seja, padrões hipotéticos de sequencias de chuva de 6 em 6 horas.

Para exemplificar, foi construída uma série hipotética de chuva para 4 dias, nos moldes das já utilizadas na calibração e verificação. Imaginando que o interesse está apenas no dia do evento, os 12 primeiros valores da série (de 6 em 6 horas para 4 dias) foram definidos como sendo zero. Para o dia do evento, foram definidos valores de chuva acumulada de 10, 20, 30 até 300 mm, divididos por 4, já que o intervalo é de 6 horas. Então para 10 mm acumulados, ter-se-ia 2,5 mm a cada 6 horas, para 20 mm acumulados, ter-se-ia 5 mm acumulados e assim sucessivamente.

O gráfico da Figura 4.32 mostra os resultados de tal simulação.

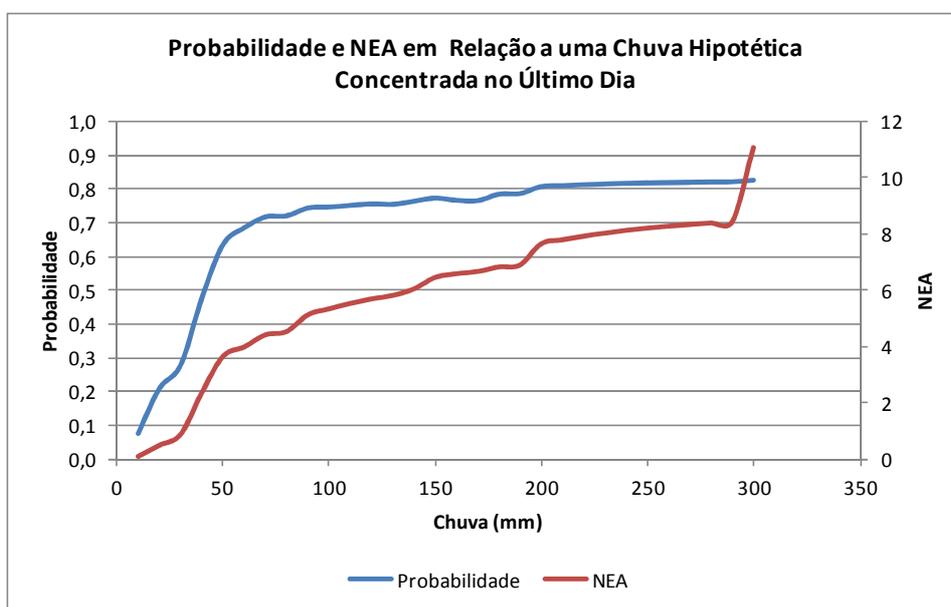


Figura 4.32 Probabilidade e NEA em relação a uma chuva hipotética concentrada no último dia

O gráfico mostra que as curvas que representam a probabilidade e o NEA apresentam sempre tendência positiva com o aumento da chuva acumulada. Para chuvas acumuladas em 1 dia de 50mm a probabilidade já é de 70%, tendo 4 alagamentos previstos. Para uma acumulada muito alta, tem-se também associadas altas probabilidades e número esperado alagamentos acima de 10.

Infer-se que seja de grande valia tal capacidade, já que a partir desta ferramenta pode-se fazer simulações levando em conta qualquer situação hipotética como, por exemplo, chuva em 4 dias, chuva em apenas 2 dias, chuvas em apenas 6 horas entre outras. Dessa forma, pode-se simular a probabilidade e o NEA para determinada área, antecipando determinada situação de risco e possibilitando a emissão do alerta.

4.4 Avaliação da Melhor Estimativa: Número Esperado de Alagamentos

Para avaliar a significância dos resultados gerados pelo modelo construído via SOM, foram calculados o EMQ e SSEMQ levando em consideração o número esperado de alagamentos (NEA).

A Tabela 4.12 mostra os resultados de EMQ calculados tanto para a calibração quanto para a verificação para Curitiba e para as bacias hidrográficas. E a Tabela 4.13 contém os resultados de SSEMQ.

Tabela 4.12 – Valores de EMQ para a calibração e verificação

	Calibração				Verificação			
	<i>EMQ NEA</i>	<i>EMQ Climat.</i>	<i>EMQ Zero</i>	<i>EMQ Persist.</i>	<i>EMQ NEA</i>	<i>EMQ Climat.</i>	<i>EMQ Zero</i>	<i>EMQ Persist.</i>
Barigui	6,49	8,02	8,16	14,46	0,71	1,44	1,54	2,02
Belém	3,56	5,18	5,28	9,37	0,41	0,60	0,63	0,90
Iguaçu	0,32	0,38	0,38	0,73	0,03	0,05	0,06	0,09
Atuba	2,57	3,88	3,93	7,33	1,70	3,61	3,67	6,71
Rib. dos Padilhas	1,48	1,74	1,76	3,31	0,21	0,26	0,27	0,44
Curitiba	40,29	56,19	57,45	102,91	4,76	11,68	12,34	18,32

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

Tabela 4.13 – Valores de Skill Score (SS) obtidos para NEA X Climatologia, NEA x Previsão de zero e NEA x Persistência

	Calibração			Verificação		
	<i>NEA x Climat.*</i>	<i>NEA x Zero*</i>	<i>NEA x Persist.*</i>	<i>NEA x Climat.*</i>	<i>NEA x Zero*</i>	<i>NEA x Persist.*</i>
Barigui	19,07	20,44	55,08	50,80	53,96	64,84
Belém	31,30	32,625	62,03	31,43	34,18	54,40
Iguaçu	15,65	16,47	56,25	46,66	47,97	68,20
Atuba	33,67	34,43	64,86	52,85	53,53	74,58
Rib. dos Padilhas	14,99	16,04	55,21	18,01	19,43	51,36
Curitiba	28,30	29,86	60,84	59,21	61,40	73,98

Elab.: Marciel Lohmann, 2011.

* Valores em %

Observando-se os dados das tabelas, pode-se constatar que o erro médio quadrático para o NEA previsto pelo modelo foi sempre menor quando comparado com a climatologia, sempre igual a zero ou mesmo com a persistência. Tais resultados foram constatados tanto na calibração quanto na verificação.

Quando calculado o SS, considerando o NEA previsto pelo modelo versus a climatologia, observa-se que para a calibração, teve-se um ganho tanto para Curitiba (28,3%) como para todas as bacias (33,67% para a bacia do Atuba, por exemplo). O mesmo pode ser observado quando comparado o NEA versus NEA igual a zero, com ganhos também nessa ordem, e ganhos maiores ainda quando comparado o NEA com a persistência, chegando à casa dos 60% na calibração e maior de 70% na verificação.

Ainda com o objetivo de verificar a capacidade de o modelo prever o NEA, mas utilizando-se de outro método, optou-se por definir classes para o número de alagamentos. Tais classes foram definidas em função da frequência que um determinado número de alagamentos ocorre, sendo aplicado apenas para os resultados gerados na verificação para Curitiba. Na Tabela 4.14 estão representadas as classes de alagamentos definidas.

Tabela 4.14 – Classes de alagamentos definidas em função da frequência que ocorrem

Condição	Classe
0 alagamento	0
1 alagamento	1
2 a 3 alagamentos	2
4 a 7 alagamentos	3
Mais de 7 alagamentos	4

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

A partir da definição de classes, tanto o número de alagamento observados quanto o NEA previsto pelo modelo foram classificados e posteriormente comparados, objetivando quantificar quantas das vezes a classe referente ao número observado foi igual a classe do NEA. Para tanto, foram construídas duas tabelas (Tabela 4.15 e 4.16) onde são apresentados os resultados.

Tabela 4.15 – Número de vezes em que a classe do número observado (NOA) é igual a classe do NEA previsto

Classes Observados	Classes NEA						Soma
	0	1	2	3	4		
0	273	18	15	1	0	307	
1	11	6	4	1	0	22	
2	3	7	5	0	0	15	
3	1	0	6	1	0	8	
4	0	0	6	5	2	13	
Soma	288	31	36	8	2	365	

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

Tabela 4.16 – Probabilidade das classes de NEA previstas dada a classe observada de alagamentos

Classes Observados	Classes NEA					
	0	1	2	3	4	
0	0,899	0,058	0,048	0,003	0	
1	0,5	0,272	0,181	0,045	0	
2	0,2	0,466	0,33	0	0	
3	0,125	0	0,75	0,125	0	
4	0	0	0,461	0,38	0,15	

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

Analisando a Tabela 4.15 e 4.16 observa-se na primeira a mensuração da quantidade de vezes em que a classes de observados versus NEA é igual e na segunda a probabilidade das classes de NEA dada a classe observada de alagamento. Constata-se que em 89% das vezes o NEA é igual ao observado. Quando foi observado a classe 1, em 50% das vezes o NEA foi da classe 0. Em 46% das vezes em que o observado foi a classe 2 o NEA foi de 1. Para a classe 4, ou seja, número de alagamentos superior a 7, em 46% dos casos o NEA fez previsão da classe 2 e em 38% dos casos a previsão foi para a classes 3.

Em geral, pode-se afirmar que o NEA previsto pelo modelo subestimou o número total de alagamentos ocorridos. De qualquer forma, pode ser aplicada alguma técnica de recalibração, para que o NEA seja estimado com melhor taxa de acerto. No entanto, vale salientar que prever via modelo o número de alagamentos não é uma tarefa fácil. Por isso, deve-se ressaltar que mesmo com resultados que tem tendência a subestimar o NEA, a técnica pode ser avaliada como sendo de grande valia já que gera uma informação significativa para o tomador de decisão.

4.5 Análise da Significância dos Resultados

Para a escolha do método para análise da significância dos resultados, no caso o Bootstrap, teve-se como premissa que tanto para a previsão probabilística quanto para o NEA não existem situações futuras conhecidas, ou seja, necessita-se simular situações futuras a partir de dados reamostrados.

Para que a aplicação da técnica resulte em valores confiáveis devem ser feitas, a partir da amostra mestre, centenas ou até milhares de reamostras do mesmo tamanho n . Alguns autores recomendam a utilização de um número que varia de 1.000 a 10.000 reamostras. Segundo Montgomery (2001) o número de reamostragens pode ser estipulado verificando a variação do desvio padrão para a estimativa do parâmetro em questão calculado para as reamostras à medida que estas são realizadas. No momento em que esse valor se estabilizar o tamanho da reamostra Bootstrap estará adequado. As reamostras foram geradas de forma automática empregando técnicas computacionais e com auxílio de um programa construído em linguagem “Fortran”.

Uma vez geradas as reamostras, foi calculado a estatística relacionada a média, desvio padrão e coeficiente de autocorrelação e comparada com a amostra original. A Tabela 4.20 resume os resultados das amostras originais e reamostras, tanto para o número observado de alagamentos (NOA) quanto para o SSEMQ e área sob a curva ROC, variáveis que tem origem e relação direta com o NOA.

Obedecendo ao critério definido por Montgomery (2001), o desvio padrão para o SSEMQ para 500, 1000, 2000, 3000 e 10000 reamostras foi de 11,222, 11,363, 11,349, 11,368 e 11,146 respectivamente, mostrando variação muito pequena. Para a área sob a curva os valores de desvio padrão foram 0,0154, 0,0153, 0,0155, 0,0157 e 0,0154 para o mesmo número de reamostras considerados no SSEMQ, justificando a escolha por 10.000 reamostras.

Os resultados apresentados na Tabela 4.17 mostram que os valores são coerentes mostrando que as reamostras foram geradas corretamente já que os valores da amostra original e das reamostras aproximam-se. Para avaliar o ganho se utilizado o NEA ao invés da média climatológica (que gerou os melhores resultados quando comparados com o NEA sempre sendo zero ou ainda com a persistência), o SSEMQ e a área sob a curva ROC foram avaliados tendo como parâmetro um nível de significância de 5%. Para as reamostras, os valores máximos calculados de SSEMQ e área sob a curva ROC foram de 60,86 e 0,96 respectivamente.

Tabela 4.17 – Estatísticas para a amostra original e as 10000 reamostras para as variáveis NOA, SS e área sob a curva ROC

	Amostra original	Reamostras Bootstrap (Percentis)		
		25%	50%	75%
Variável: NOA				
<i>Média</i>	0,8159	0,6593	0,7967	0,9505
<i>Desvio padrão</i>	3,4276	2,8139	3,3195	3,8530
<i>Coef. de Autocorrel. (lag)</i>				
1	0,2163	0,1318	0,1798	0,2228
2	0,0557	0,0093	0,0327	0,0610
4	-0,0246	-0,0373	-0,0241	-0,0042
6	0,0183	-0,0314	-0,0131	0,0159
8	0,0473	-0,0354	-0,0188	0,0111
10	0,0470	-0,0359	-0,0195	0,0104
15	-0,0096	-0,0354	-0,0184	0,0125
20	-0,0191	-0,0355	-0,0187	0,0110
25	-0,0112	-0,0362	-0,0193	0,0099
30	0,0642	-0,0358	-0,0190	0,0106
Variável: SSEMQ				
<i>SSEMQ(Climatologia)</i>	59,21	50,8	58,78	64,66
Variável: Área sob a Curva ROC				
<i>Área sob a Curva</i>	0,94	0,93	0,94	0,95

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

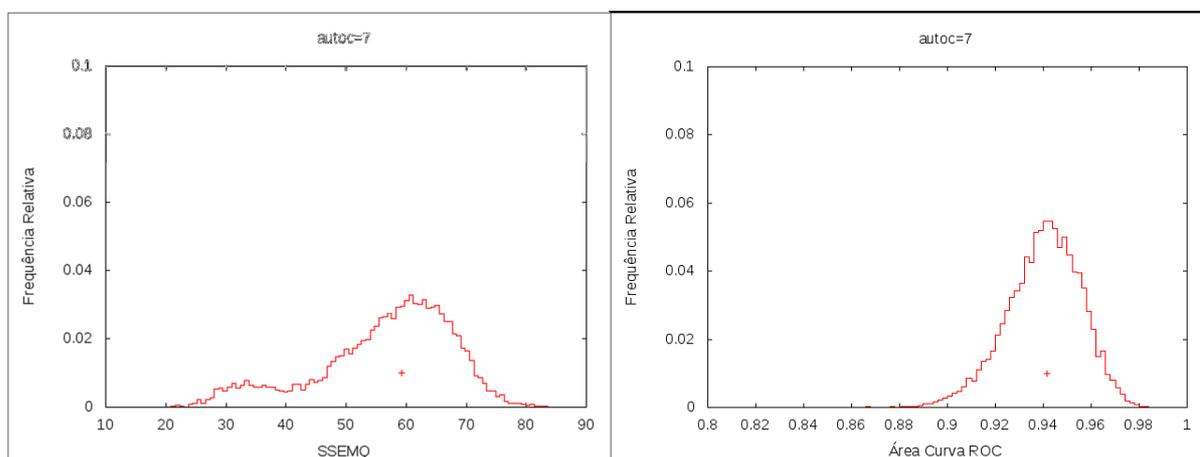


Figura 4.33 Gráfico das distribuições de frequência para o SSEMQ e Área sob a curva ROC das reamostras geradas pelo Bootstrap

A Figura 4.33 apresenta os gráficos com as distribuições de frequência relativa para o SSEMQ e área sob a curva ROC geradas para as reamostras. Os pontos nos gráficos

indicam que o valor da amostra original esta próximo da mediana, indicando que as reamostras geradas podem ser utilizadas na avaliação dos resultados.

A partir de tais estatísticas, os resultados da aplicação da técnica Bootstrap, para um nível de significância de 5% apresentaram valores de **32,98 para o SSEM**Q e de **0,91 para a área sob a curva ROC**. Isso significa dizer e confirmar estatisticamente que utilizando-se o número esperado de alagamentos (NEA) previsto pelo modelo tem-se 95% de probabilidade de que o SSEMQ seja maior que 32,98%. Como prever o NEA trata-se de uma tarefa muito difícil, julga-se que o resultado é bem satisfatório

O mesmo se deu para a área sob a curva ROC, confirmando que o modelo gerado para previsão probabilística de alagamentos em Curitiba possui 95% de probabilidade de que a área sob a curva seja maior que 0,91, mostrando a qualidade do modelo gerado.

Portanto, como comprovado estatisticamente, os resultados demonstram que se utilizado o NEA bem como a previsão probabilística de ocorrência de alagamentos, ter-se-ia um ganho significativo, levando em conta que atualmente não existem iniciativas neste sentido, que contemplem e caracterizem tal problemática. Assim, o NEA possui potencial para ser utilizado como parte integrante de um sistema de alertas a alagamentos.

Ainda, pode-se afirmar que tanto a previsão probabilística quanto o NEA agregam grande potencial de aplicação para o setor público, especialmente para órgãos como a Defesa Civil, Corpo de Bombeiro e outras entidades que trabalham em defesa da comunidade em geral, na medida em que se tenha a conjugação entre as probabilidades de ocorrência de alagamentos e a área de previsão do tempo, que possui papel fundamental em todo o processo.

A partir dos resultados alcançados e com a motivação apresentada no item 4.1.1, resolveu-se ainda fazer a especialização do NEA por bacia hidrográfica, apresentada a seguir.

4.6 Espacialização da Probabilidade e do Número Esperado de Alagamentos (NEA)

A partir da geração dos resultados referentes a previsão probabilística e do NEA, procurou-se além de mostrar via gráfico e tabela tais resultados, também fazer a sua espacialização. O produto cartográfico (Figura 4.34) produzido constitui-se em uma proposta exatamente com a visão de melhorar a compreensão e interpretação dos resultados de previsão.

Neste sentido, pensando especificamente na probabilidade, a espacialização pôde ser feita de forma fácil, bastando associar a probabilidade prevista para um determinado dia ao limite da bacia ou de Curitiba. Para tal trabalho foi utilizado o software ArcGIS 9x.

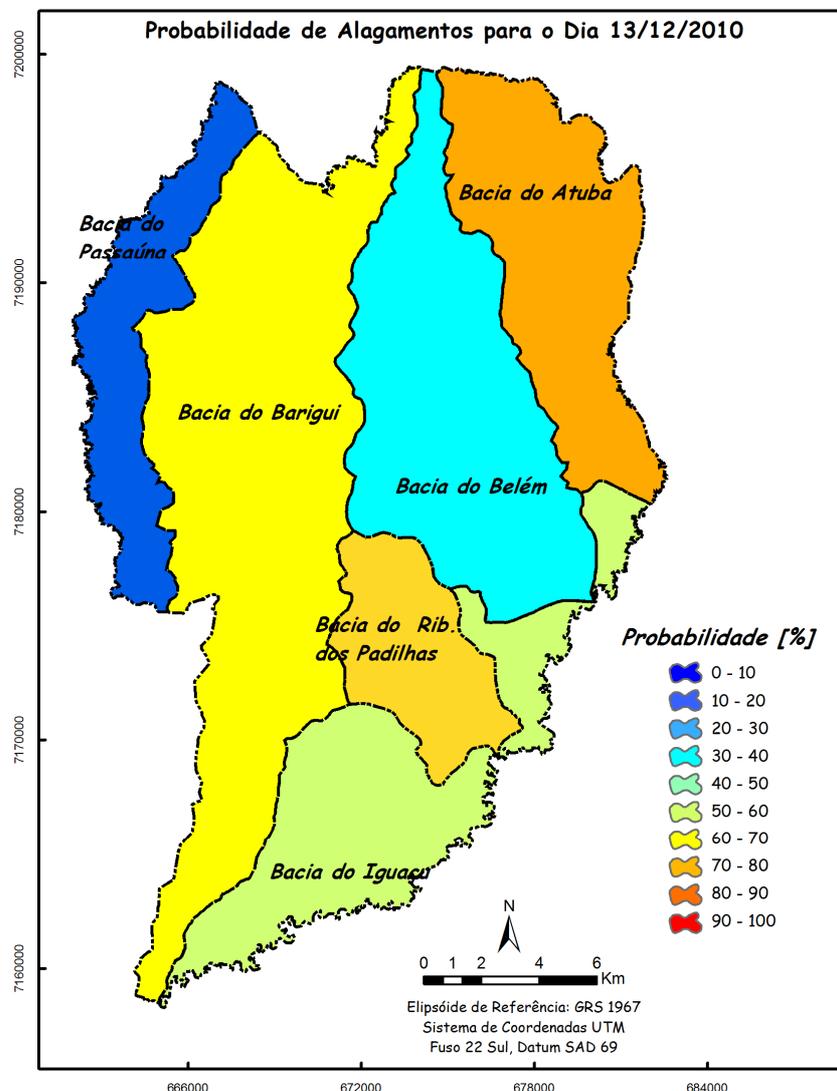


Figura 4.34 Espacialização da probabilidade de alagamentos por bacia hidrográfica para o dia 13/12/2010

A Figura 4.34 ilustra um exemplo do produto cartográfico final contendo a espacialização da probabilidade de alagamentos por bacia hidrográfica. A título de ilustração está sendo apresentado aqui o mapa levando em conta os limites das bacias hidrográficas.

A espacialização do NEA, assim como para a probabilidade poderia ser feita associando o NEA aos limites da bacia ou então a Curitiba como um todo, no entanto sem uma unidade métrica definida em termos de alagamentos por área. Dessa forma, optou-se por espacializar o NEA por km² de área, já que tal unidade é de fácil compreensão. Tal espacialização gerou ainda uma informação secundária que trata-se da identificação dos locais com maior probabilidade de ocorrência de novos alagamentos.

Sendo assim teve-se como premissa de que a partir da análise histórica dos locais em que já ocorreu um alagamento no passado, há também maior probabilidade de ocorrer novos alagamentos. Portanto, a idéia básica foi caracterizar os possíveis locais de ocorrência a partir do histórico ocorrido. Para tanto, inicialmente foram compilados em um arquivo todos os pontos referentes aos alagamentos do período analisado. Tal procedimento foi elaborado com a ferramenta “merge” presente no ArcGIS 10.

Em uma etapa posterior, foi criado um arquivo formato “shape” (.shp) com uma grade regular de 1 x 1km, utilizando como base o limite de Curitiba. Associado a grade necessitava-se definir uma área de abrangência para cada ponto registrado como alagamento. Sabe-se que um alagamento não é pontual e sim possui uma área de abrangência. No entanto, a informação disponível estava em formato pontual. Em função da inexistência de tal informação e sem indicação na literatura específica sobre a área média atingida para um alagamento em Curitiba, partiu-se para a busca desta informação com técnicos da Defesa Civil e Bombeiros, indicando que poderia ser estabelecido como área de abrangência um círculo de raio em torno de 250 e 300m. Sendo assim, optou-se por utilizar um raio de 300m para cada alagamento ocorrido.

A partir de tal definição foi criado um arquivo de “buffer” (raio ao redor de um ponto) de 300m no entorno de todas as ocorrências de alagamentos mapeadas de 2005 a 2010, ou seja, todo o histórico correspondente ao período analisado. De posse destes dois arquivos procedeu-se para a realização de uma interseção (intersect), objetivando encontrar qual a área de cada buffer estava contida em cada pixel da grade de 1 x 1km. Com o arquivo gerado, foi realizada a junção espacial (spatial join) que permite estabelecer o relacionamento espacial entre dois temas, ou seja, é feita a junção de dados da tabela de

atributos de um tema à tabela de atributos de outro tema. O arquivo de grade recebeu os dados da tabela do arquivo de buffer. Utilizando-se da ferramenta “join”, pode-se finalmente juntar o valor do somatório das áreas dos buffers a tabela de atributos do arquivo de grade.

A Figura 4.35 ilustra a grade, os buffers e o resultado da operação “*Spatial Join*”, que gerou um arquivo de grade vetorial.

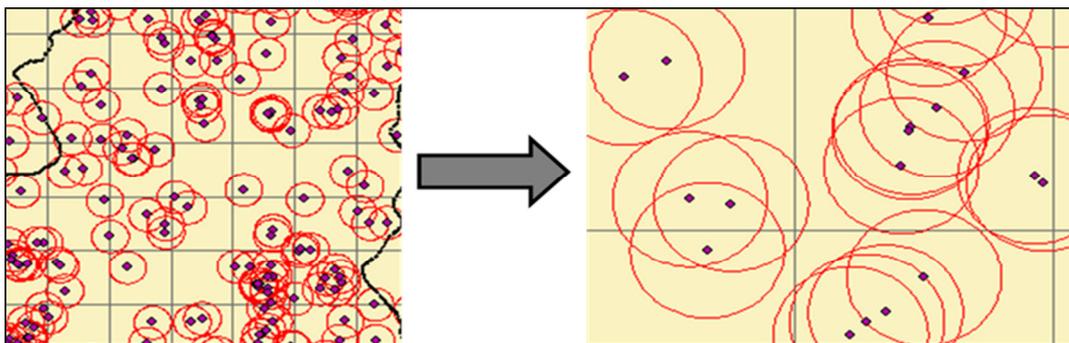


Figura 4.35 Grade de 1x1km, buffers e o resultado da operação “*Spatial Join*”

Após esta operação, exportou-se a grade vetorial com os valores de área para cada pixel da grade de 1x1km para o formato matricial (raster). A Figura 4.36 mostra o resultado.

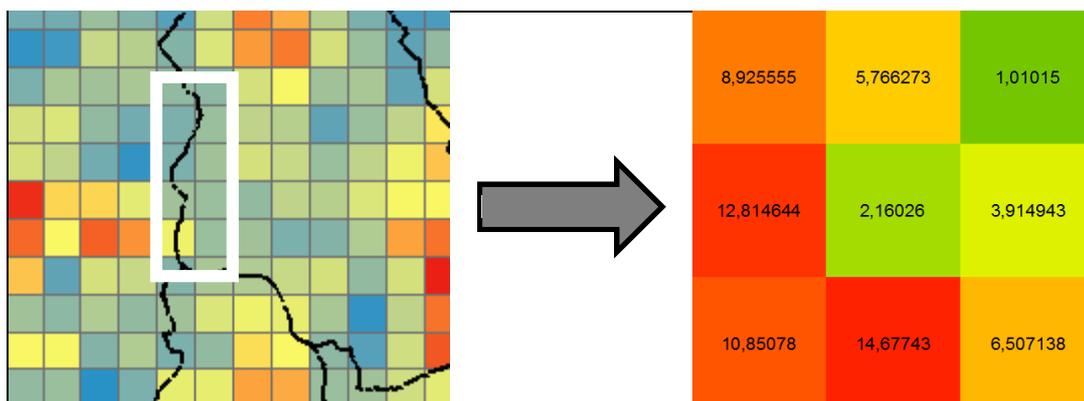


Figura 4.36 Raster contendo o somatório de áreas de alagamento em cada pixel da grade de 1x1km, dividido pela área do círculo de 300m.

De posse do arquivo matricial necessitava-se ainda construir um arquivo com o mesmo formato contendo os dados referentes ao NEA em cada bacia, para então poder fazer a multiplicação de ambos e identificar para cada dia, levando em consideração o histórico, quais as áreas com maior probabilidade de ocorrência de um alagamento.

A título de exemplo, foi utilizado o NEA gerado na verificação (ano de 2010) para quatro datas. A Tabela 4.18 mostra os dias escolhidos, o número observado de alagamentos e o NEA.

Tabela 4.18 – Exemplo para 4 dias específicos do número de alagamentos observados versus NEA

	Total histórico	13/12/2010		30/10/2010		24/09/2010		23/04/2010	
		Obs.	NEA	Obs.	NEA	Obs.	NEA	Obs.	NEA
Barigui	796	9	6	4	2	6	2	7	5
Belem	642	6	3	2	1	1	1	0	2
Iguacu	126	2	1	1	0	0	0	2	1
Atuba	471	9	10	1	2	3	1	32	11
Rib. dos Padilhas	294	1	1	0	0	4	1	0	0

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

Como a ideia foi espacializar o NEA por km² e identificar os locais via o histórico, dividiu-se o valor de NEA pelo número total de alagamentos em cada bacia, gerando um valor de NEA histórico (Tabela 4.19). Este valor foi associado ao limite de cada bacia e posteriormente este arquivo também transformado em matriz com resolução de 1 x 1km. A multiplicação dos dois arquivos foi feita utilizando-se da ferramenta “*raster calculator*”. O resultado foi outro arquivo raster contendo os valores de NEA em cada pixel de 1 x 1km, ou seja, NEA por km². Na multiplicação, os pixels da grade que fazem fronteira entre duas bacias (retângulo branco na Figura 4.36) conservam o valor de NEA histórico da bacia em que mais de 50% do pixel está contido.

Tabela 4.19 – NEA dividido pelo total histórico

	Total histórico	13/12/2010	30/10/2010	24/09/2010	23/04/2010
		NEA/Total	NEA/Total	NEA/Total	NEA/Total
Barigui	796	0,007538	0,002513	0,002513	0,006281
Belem	642	0,004673	0,001558	0,001558	0,003115
Iguacu	126	0,007937	0	0	0,007937
Atuba	471	0,021231	0,004246	0,002123	0,023355
Rib. dos Padilhas	294	0,003401	0	0,003401	0

Elab.: Marciel Lohmann, 2011

A partir do método proposto para espacialização do NEA, o primeiro resultado gerado foi o mapa contendo o número de alagamentos histórico registrado por km² (Figura 4.37). Fazendo uma breve reflexão a cerca deste mapa pode-se dizer que ele traduz, tendo em vista o período analisado, exatamente qual foi o número de alagamentos por km² em cada uma das bacias hidrográficas analisadas ou ainda para todo o município, uma informação nova e relevante podendo ser utilizada pelos órgãos do poder público responsáveis por estabelecer as políticas públicas no sentido de mitigar os impactos provenientes dos alagamentos,

Este mapa mostra ainda quais são os locais mais e menos atingidos por alagamentos ou ainda os locais que até 2010 nunca foram atingidos. Neste sentido, fica evidente que alguns locais foram atingidos por até 40 alagamentos enquanto em outros ocorreram poucos alagamentos.

Sob outra perspectiva, esta informação torna-se de suma importância, pois revela a estimativa de quantos alagamentos são esperados de ocorrer no futuro por ano e por km² em Curitiba, bastando para isso dividir a informação contida no mapa por 6 anos (período analisado). Tal estimativa, associada à identificação dos locais mais atingidos pelos alagamentos poderá ser de grande utilidade para o planejamento e preparação para eventos extremos e até mesmo na indicação dos locais prioritários que deverão ser contemplados com medidas de cunho estrutural.

Ainda, este mapa pode estar traduzindo um cenário de vulnerabilidade a alagamentos em Curitiba, com o diferencial de que o mesmo foi construído tendo como base os dados históricos, ou seja, a gênese desse mapa não se deu através da combinação de variáveis do meio físico (solos, relevo, geologia, vegetação entre outros) e do meio socioeconômico (população, renda, escolaridade entre outras) com a atribuição de “pesos” a cada uma das classes utilizando-se de critérios muitas vezes subjetivos, mas sim a partir de dados que representam exatamente o que ocorreu no passado. A partir de uma simples normalização, por exemplo, o mesmo pode ser interpretado também como mapa das áreas mais vulneráveis a alagamentos. Com a associação da precipitação em tempo quase real, ter-se-ia a informação de risco a alagamentos em Curitiba.

As Figuras 4.38 a 4.41 mostram os mapas com o número esperado de alagamentos por km² por dia, resultantes da multiplicação entre o primeiro resultado (apresentado na Figura 4.36) versus o NEA previsto dividido pelo total histórico da bacia. Os tons em azul e verde representam menor NEA por km² e por consequência locais com menor

probabilidade de ocorrer um alagamento. Os tons em amarelo, laranja e vermelho representam maior NEA por km² e também maior probabilidade respectivamente.

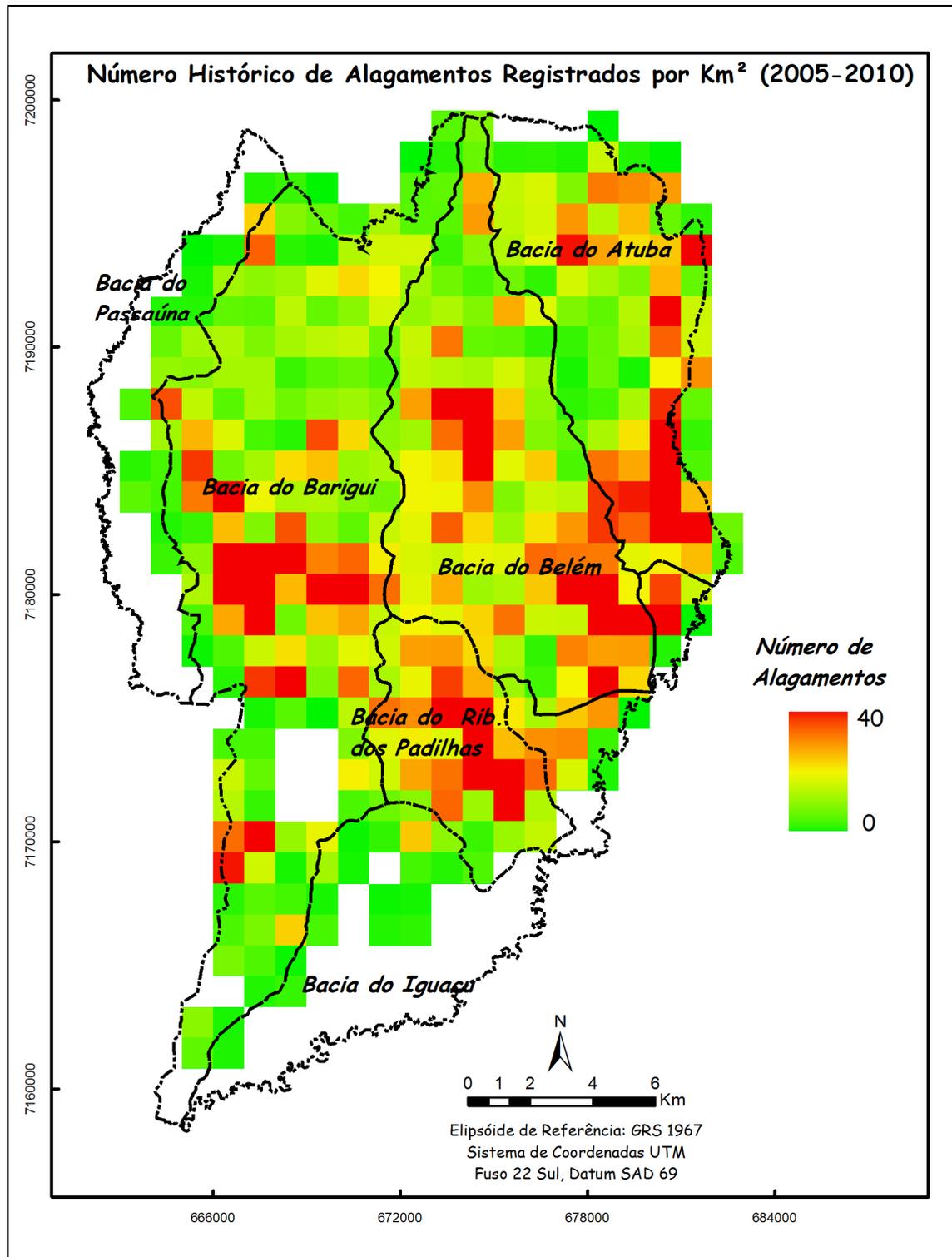


Figura 4.37 Número histórico de alagamentos registrados por km² (2005-2010)

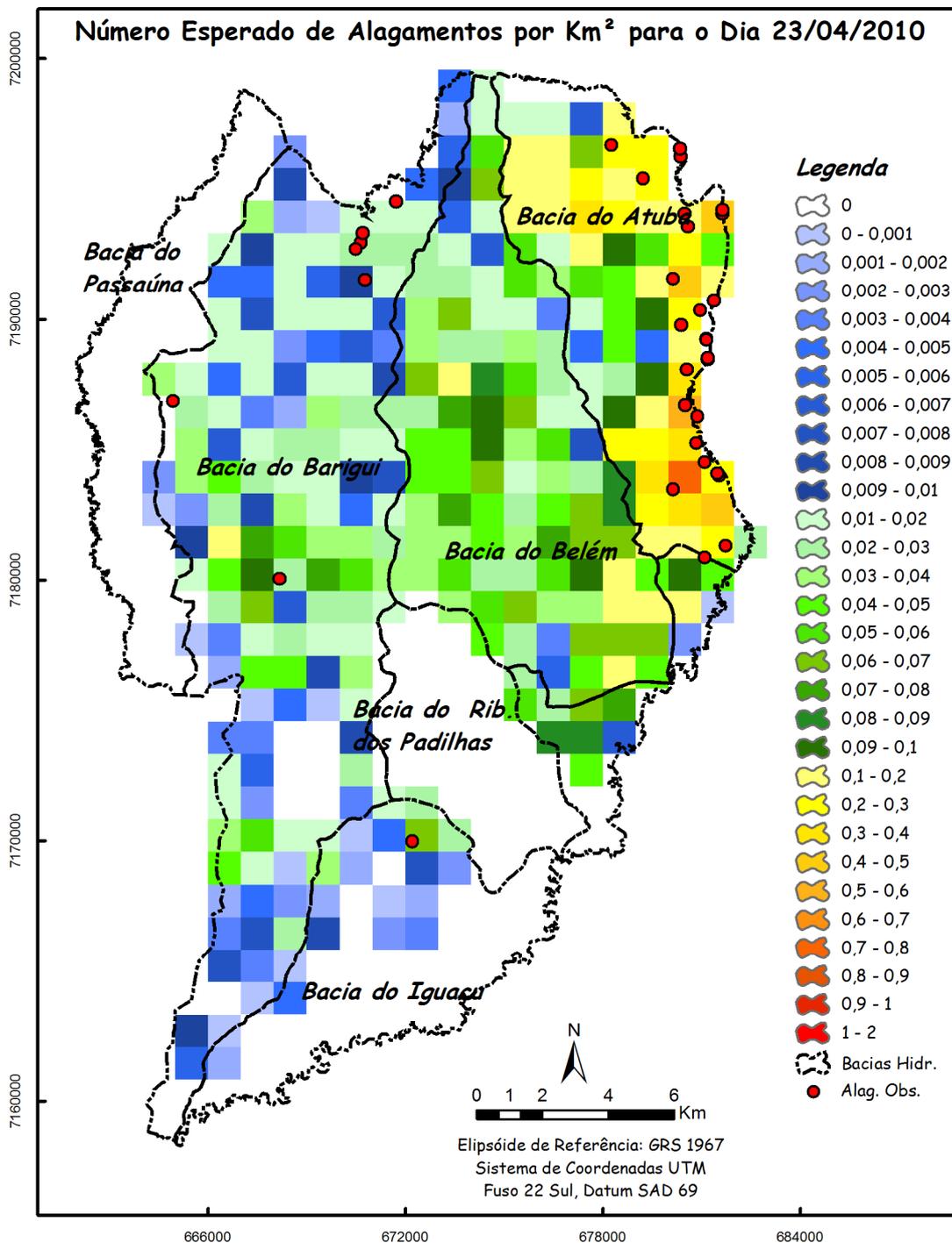


Figura 4.38 Número esperado de alagamentos por km² para o dia 23/04/2010
Obs: os círculos em vermelho representam os alagamentos observados nesse dia

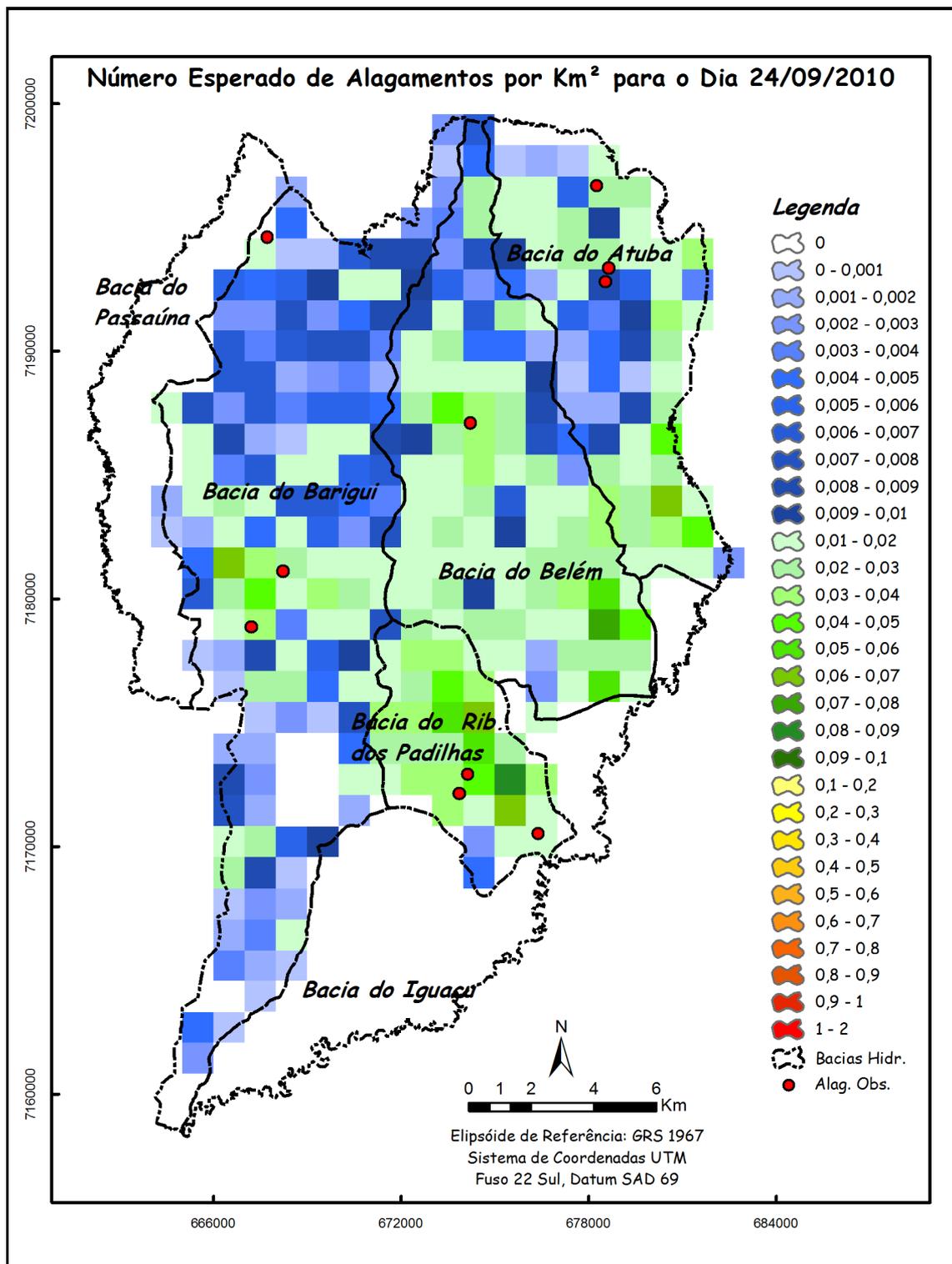


Figura 4.39 Número esperado de alagamentos por km² para o dia 24/09/2010
Obs: os círculos em vermelho representam os alagamentos observados nesse dia

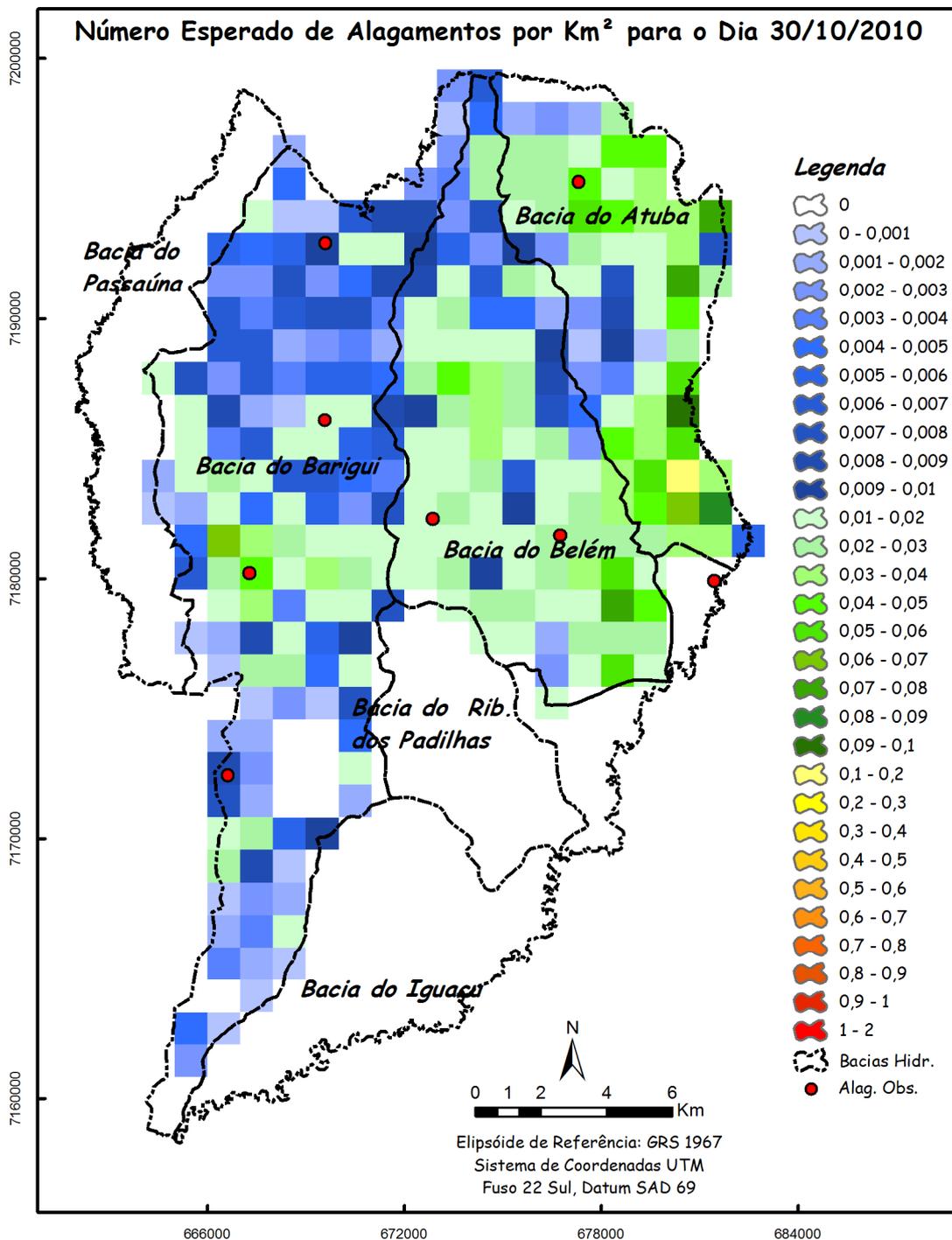


Figura 4.40 Número esperado de alagamentos por km² para o dia 30/10/2010
Obs: os círculos em vermelho representam os alagamentos observados nesse dia

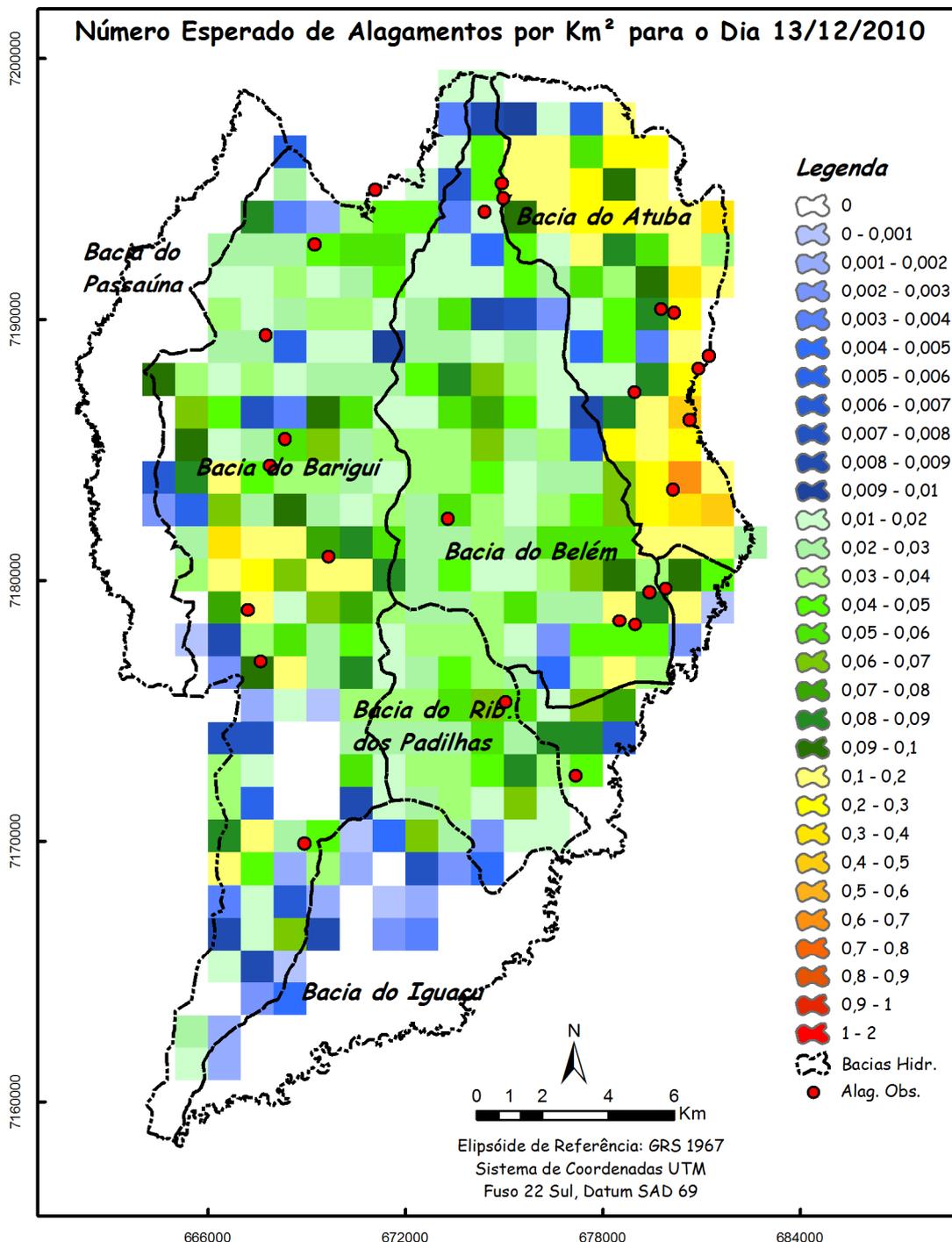


Figura 4.41 Número esperado de alagamentos por km² para o dia 13/12/2010
Obs: os círculos em vermelho representam os alagamentos observados nesse dia

No dia 23/04/2010 nota-se que a bacia do Atuba está mais sujeita a ocorrência dos alagamentos. Em virtude de o NEA ser previsto como zero na bacia do Ribeirão dos

Padilhas, não há probabilidade de ocorrência de alagamentos. Já no dia 24/09/2010 a bacia do Ribeirão dos Padilhas já foi mais atingida, pois o NEA foi 1. No dia 30/10/2010 nem a bacia do Iguçu, Passaúna e Rib. dos Padilhas foram atingidas, pois o NEA foi de 0. E no dia 13/12/2010, com exceção da bacia do Passaúna, todas foram atingidas, sendo a do Atuba e do Barigui com maior intensidade, com NEA de 10 e 6 respectivamente.

De forma geral pode-se verificar que os pontos de alagamentos observados nos respectivos dias analisados conferem bom grau de confiabilidade aos resultados apresentados nos mapas, já que os mesmos localizam-se sobre as áreas indicadas como de maior NEA por km².

A partir das espacializações do NEA e da probabilidade pode-se dizer que tais produtos cartográficos respondem de forma interessante para identificar as áreas em cada bacia hidrográfica com maior probabilidade de serem atingidas pelos alagamentos.

Como proposta e pensando que tais mapas poderiam ser gerados também de forma operacional e utilizados por técnicos da Defesa Civil e Bombeiros, vê-se grande vantagem na utilização de tal metodologia para espacialização do NEA, principalmente no que diz respeito a sua atualização dinâmica, ou seja, de posse das informações cartográficas (latitude e longitude) referentes aos alagamentos ocorridos durante um determinado período, seja ele um dia, uma quinzena ou ainda mensalmente, as mesmas podem ser adicionadas ao histórico, gerado novamente os buffers, a grade com as respectivas áreas de alagamento por km² e finalmente a espacialização do NEA, com taxa de atualização freqüente.

Cabe aqui, além de mostrar o potencial, também fazer uma crítica a metodologia proposta, principalmente no que tange ao tamanho do buffer. Sabe-se que a opção de definir um raio de 300 m ao entorno de cada ponto de alagamento pôde não ser a mais precisa. No entanto, como já comentado, em função da inexistência de tal informação fez-se essa escolha baseada no conhecimento empírico da defesa civil. Sabe-se ainda que existem iniciativas por parte de órgãos ligados ao governo municipal de mapear a área exata atingida por um alagamento com auxílio de um software específico instalado em um Netbook ou Tablet. Tal equipamento será levado pelos técnicos da Defesa Civil, Bombeiros, Guarda Municipal entre outros, para os locais de atendimento de ocorrências, sendo utilizados, portanto para tal tarefa. Dessa forma, a utilização dos buffers seria substituída ou então as informações mais exatas da área de abrangência de um alagamento, adicionadas as informações já existentes.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Levando em consideração à relevância do problema, as motivações para o estudo e os objetivos propostos, este trabalho de pesquisa buscou mostrar de que forma a proposição de modelos estocásticos e empíricos podem dar suporte ao entendimento da dinâmica relacionada aos alagamentos e sua relação com a precipitação.

Nesse sentido, os resultados obtidos podem de alguma forma fomentar o interesse pela realização de novos estudos, aplicação dos métodos propostos para outras áreas e ainda, e de grande importância, subsidiar ações por parte do poder público no sentido de utilizar as informações geradas e que podem ser produzidas de modo operacional, para a proteção da sociedade como um todo, gerando e disseminando os alertas a alagamentos em Curitiba, atividade até o momento inexistente.

Baseado nessas ideias, as principais conclusões deste trabalho foram organizadas segundo sua abrangência, sendo inicialmente apresentadas as relativas aos dados utilizados para geração e construção dos modelos preditivos, relativas aos métodos utilizados para geração dos modelos de previsão probabilística e do número esperado de alagamentos bem como à definição dos padrões de chuva e por último as considerações finais e recomendações.

5.1 Relativas aos Dados Utilizados

Em relação aos dados de chuva, inicialmente cabe dizer que dentre as variáveis meteorológicas de interesse para estudos climáticos e hidrológicos, a precipitação é a que apresenta a maior variabilidade espaço-temporal, especialmente a precipitação ligada a dinâmica convectiva. Tanto as estimativas de chuva por sensoriamento remoto, quanto aquelas calculadas pelos modelos de circulação atmosférica precisam ser avaliadas quanto à destreza em corretamente reproduzir a chuva observada.

A iniciativa de utilização de dados integrados de estimativa de chuva e sua utilização para construção de modelos de previsão probabilística de alagamentos pode ser considerada pioneira já que em sua grande maioria dos estudos nessa linha concentram-se na mensuração dos erros associados às estimativas, tanto de satélites quando de radar e

pluviômetros, ou ainda na construção e teste de algoritmos para estimativa de precipitação em diferentes áreas. Sabe-se que a qualquer estimativa é intrínseca a ocorrência de erros. No entanto, buscou-se ultrapassar a esfera dos erros e mostrar seu potencial uso, especificamente na modelagem de problemas reais como, por exemplo, na previsão probabilística de alagamentos.

Atualmente, há uma tendência crescente do emprego de sistemas de sensoriamento remoto, como radares e satélites para estimativa de precipitação. Embora os dados provenientes desses sistemas sejam estimativas e estejam sujeitos a erros de magnitude variável conforme o sensor, a região e diversos outros fatores, o uso dessas estimativas tem duas grandes vantagens em relação ao uso de medição via redes de pluviômetros e pluviógrafos: (i) maior velocidade de obtenção e facilidade de disponibilização da informação, principalmente visando o uso em sistemas de alerta a alagamentos por exemplo; (ii) produção da informação na forma de um campo espacial de precipitação que pode abranger grandes áreas.

Neste sentido, a utilização de dados de chuva estimada a partir da integração das informações provenientes de satélite, radar meteorológico e pluviômetros, torna-se alternativa, já que a rede de pluviômetros é pouco densa na área de estudo. Em função disso sugere-se que seja também adensada a rede de pluviômetros, especialmente na Região Metropolitana de Curitiba, visando à melhoria das estimativas dos campos de precipitação. Calvetti et al (2010) vem trabalhando na continuação dos estudos relacionados a integração das informações para geração dos campos de precipitação, bem como gerando estimativas de chuva para condições meteorológicas diferentes como chuva convectiva, chuva orográfica e estratiformes, para diferentes regiões do estado do Paraná e representando microclimas e circulações atmosféricas locais. Assim, infere-se que de posse de tais resultados, as estimativas geradas para Curitiba especificamente poderão ganhar em termos de qualidade e como consequência melhorar os resultados para os modelos propostos.

Portanto, considera-se que o emprego de tais dados em aplicações reais como neste estudo, corroboram a hipótese que os mesmos são excelente alternativa em diversas aplicações, pois além de combinar medidas precisas de pluviômetros com a boa distribuição espacial de estimativas por radar e satélite, podem ser produzidos em escala horária, que traz grande ganho na análise e monitoramento de eventos extremos.

Especificamente em relação ao método utilizado para cálculo da chuva média para as bacias hidrográficas e para Curitiba, obteve-se o melhor resultado utilizando-se o método dos polígonos de Thiessen, com a ressalva de que tanto o método de Thiessen quanto do inverso da distância ao quadrado podem gerar resultados muito parecidos dependendo principalmente da distribuição dos postos pluviométricos considerados. Neste trabalho, as diferenças quando comparados os dois métodos via a curva ROC não foram muito significativas. No entanto, em função dos resultados, o método de Thiessen foi definido com sendo de melhor desempenho.

Ainda, está previsto para o ano de 2016 o lançamento do satélite GOES-R que além de possuir melhor resolução espacial (2 km) terá maior número de faixas espectrais. Com tais imagens, será possível estimar a precipitação com melhor qualidade e maior acurácia, podendo tais dados substituir os existentes atualmente que são disponibilizados com resolução de 4 x 4km.

Com relação aos dados de alagamentos adquiridos junto ao IPPUC, considera-se que a sua forma de aquisição precisa ser melhorada, e sugere-se que ao invés do mapeamento pontual seja feito o mapeamento de toda a área atingida, gerando com resultado um polígono e não um ponto.

Sabe-se que por meio de parceria com o ICI (Instituto Curitiba de Informática) está sendo desenvolvida uma plataforma para resolver tal problemática e de acordo com informações buscadas junto a Defesa Civil Municipal, estará em operação no próximo ano. De posse de tais dados, infere-se que principalmente no que tange a espacialização do NEA por km², os resultados terão melhoria significativa, com possibilidade de substituição dos dados existentes ou agregação dos novos.

De qualquer forma, os dados utilizados nesta tese foram de grande utilidade para geração dos resultados e sem eles seria inviável a realização do trabalho, já que serviram de base para a calibração e verificação dos modelos construídos com regressão do tipo logística e baseado em redes neurais.

5.2 Relativas aos Métodos Preditivos Utilizados

Em relação aos dois métodos utilizados na geração das previsões de probabilidade e avaliados via o emprego da Curva ROC, área sob a curva ROC e os diagramas de confiabilidade, discriminação e refinamento, assim como mostrado no capítulo 5 pode-se

considerar que os dois métodos empregados forneceram resultados satisfatórios do ponto de vista estatístico.

A partir da leitura de diversos trabalhos que utilizam o modelo baseado em redes neurais (SOM) como método na modelagem de diversos problemas, pode-se confirmar as expectativas que eram de que o SOM possui melhor desempenho quando comparado com a regressão logística. Portanto, este trabalho possui como ponto forte a confirmação de tais expectativas já que o mesmo as corrobora, utilizando uma mesma base de dados e mesmo método de avaliação de desempenho. Entretanto cabe destacar que os resultados deste caso não são garantia de melhor desempenho das redes neurais em outros contextos e aplicações.

A modelagem por regressão teve, inicialmente, em sua fase de concepção, o objetivo de escolher qual a melhor função de ligação entre as três possíveis (Logit, Normit, Gompit), tanto para os dados de chuva produzidos por bacia hidrográfica como para Curitiba. Obteve-se como resultado que a melhor função de ligação foi a Logit tendo como entrada para o modelo os dados produzidos para Curitiba ao invés dos dados por bacia. Tais resultados foram verificados tanto na calibração quanto verificação.

Os resultados do modelo gerado com redes neurais obtiveram melhor qualidade que os por regressão, fato identificado tanto na calibração quanto na verificação, sendo que nesta última, a área sob a curva ROC foi de 0,94.

Espera-se que os resultados obtidos com o SOM melhorem ainda mais no momento que serão disponibilizadas as informações de satélite com resolução de 1 x 1km. Dessa forma, também a resolução dos campos de chuva estimados poderão ser produzidos com resolução de 1 x 1km, reduzindo erros associados a grade hoje possível de ser explorada, que possui 4 x 4km.

A utilização de inteligência artificial, especificamente a rede SOM, é um método alternativo de modelagem de processos relacionados não só ao ambiente natural, mas também relacionado a outras ciências como a medicina, informática, administração entre outras, tendo como grande vantagem a possibilidade de modelar processos não-lineares de forma implícita. Mas como a presente pesquisa indica, a maior limitação encontra-se no tamanho da amostra utilizada para o treinamento e aprendizagem da rede. Acredita-se que para este estudo, os resultados poderiam ser melhorados com uma amostra maior, ou seja, um maior número de dados de estimativa de chuva e também de alagamentos. No entanto, foram utilizados os dados de 2005 a 2010, disponíveis para o momento. Os dados de 2011

poderão ser agregados aos já existentes em 2012 podendo ser incorporados aos resultados e análises.

Outra vantagem do SOM é justamente a sua capacidade de identificação de padrões. Neste sentido, este trabalho possui caráter de inovação e pioneirismo. Inovação, como proposto no início do estudo, pois foram identificados via rede neural os principais padrões de chuva que deflagram os alagamentos em Curitiba e, pioneirismo em função da não identificação na literatura consultada de trabalhos que demonstrem a relação da chuva e ocorrência de alagamentos via rede de Kohonen.

Em relação aos padrões de chuva, foram identificados dois padrões principais que deflagram os alagamentos. A partir dos gráficos de linha e de área elaborados para caracterizar o padrão 1 de chuva, mostrou-se que para a ocorrência de um alagamento deve necessariamente ser registrada chuva no dia do evento, sendo a mesma superior ou igual a 36 mm no dia do evento. Infere-se, portanto que este padrão esteja ligado as chuvas convectivas que ocorrem principalmente no período de verão.

O padrão 2 apresentou características diferentes sendo que o maior índice de precipitação foi identificado para o dia anterior ao do evento mas com valores crescentes de precipitação já a partir do terceiro dia anterior ao do evento. Desta forma, infere-se que tal padrão tenha dinâmica relacionada a entrada de frentes frias, que trazem quantidades significativas de precipitação podendo atuar por diversos dias sobre determinada área.

De forma geral, quando comparados os dois padrões, o padrão 1 apresenta maior frequência e índices pluviométricos podendo ultrapassar os 120 mm acumulados diários. Mesmo com menor frequência, o padrão 2, de acordo com o investigado no trabalho, pode atingir até 100 mm acumulados diários.

Além dos modelos de previsão probabilística construídos, da identificação dos padrões de chuva que deflagram os alagamentos, outro resultado interessante desta tese diz respeito à previsão do número esperado de alagamentos e sua espacialização. Tal iniciativa, até então não identificada nos trabalhos consultados, possui como pontos positivos a possibilidade de identificação e distribuição, via análise histórica, dos locais por bacia hidrográfica com as maiores probabilidades de serem atingidos por alagamentos, e ainda o potencial de que o mapa gerado seja atualizado a cada nova previsão. Com base nisso, é possível afirmar que a geração de um produto cartográfico que traduz o NEA em informação espacial, é de extrema importância para a melhor compreensão e entendimento

por parte de usuários futuros. Sua integração a um sistema de alertas, por exemplo, deve agregar valor e mostrar ainda maior potencial de exploração por parte dos usuários.

Sobre a espacialização do NEA, é importante salientar ainda a importância da utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) para geração dos mapas. O SIG possui como principais vantagens trabalhar com base de dados georeferenciadas, sendo possível realizar cruzamentos complexos de informações e ainda automatizar processos levando a economia de tempo em relação a métodos tradicionais de análise. Neste estudo, foi de fundamental importância já que serviu para integrar as informações do NEA geradas em programas externos, realizar as análises espaciais e gerar o produto final traduzido como a espacialização do NEA por km² para as bacias hidrográficas de Curitiba.

Objetiva-se no final deste trabalho, que os resultados e propostas sugeridas tanto para a previsão probabilística quanto para o número esperado de alagamentos possam ser transformados e integrados em um sistema de alerta de alagamentos em Curitiba, que funcione em ambiente operacional e que a Defesa Civil Municipal possa se servir desses resultados em escala diária ou mesmo de 6 em 6 horas. Assim, o modelo construído torna-se parte integrante de uma das fases constituintes do gerenciamento de desastres naturais, denominado de resposta, que juntamente com a prevenção, preparação e a recuperação, formam um ciclo de ações permanentes voltado ao aumento da resiliência e à conseqüente redução do risco a desastres de determinada comunidade.

Importante salientar que, como afirma Tucci (2005), o funcionamento do sistema de previsão-resposta deve ser integrado à operação de ações de cunho estrutural como retificação de canais, construção de galerias pluviais e bacias de contenção mas também combinadas com a execução de outras medidas não estruturais como limpeza periódica de bueiros, recolhimento do lixo acumulada em ruas entre outras.

Ressalta-se que uma vez o sistema de alerta em funcionamento, o mesmo deverá conter facilidades de utilização como interface conveniente e facilidades de aquisição de dados através de planilhas eletrônicas, interfaces com unidades de processamento de sinais, ou arquivos padronizados. Ainda, os usuários deverão passar por período de treinamento, objetivando aprender seu funcionamento. Desta forma, os usuários poderão fazer melhor uso e aproveitamento das informações geradas pelo sistema.

Ainda sobre o sistema de alertas a alagamentos, sabe-se que existem iniciativas de construção e implantação de sistemas em algumas grandes cidades como no caso de São Paulo, que possui o Centro de Gerenciamento de Emergências (CGE), responsável pelo

acompanhamento das condições meteorológicas da cidade e emissão de alertas a partir da previsão de chuvas intensas.

Comparando-se tal iniciativa com a proposta de sistema de alerta sugerido neste trabalho, nota-se que no caso de São Paulo os dados de radar, satélite e provenientes de estações meteorológicas são analisados por um meteorologista e cabe a ele tomar a decisão de emissão ou não do alerta, ou seja, possui natureza subjetiva. Neste trabalho, a partir da análise e geração de todo um arcabouço de resultados, de cunho objetivo e comprovados estatisticamente, é que o sistema se estruturará. Sob esta perspectiva, não foram identificadas na literatura consultada e experiências relatadas, sistemas de alertas com tais características em outras grandes cidades.

Considera-se faltante, portanto, apenas a operacionalização do sistema propriamente dito, para que se tenha como entrada as informações de chuva, o processamento e como saída a previsão probabilística de alagamentos e o número esperado de alagamentos em Curitiba.

Neste sentido cabe uma consideração operacional. Para que seja implementado um sistema de alertas, necessariamente deve-se discutir de que forma será formatada a entrada dos dados de chuva no sistema. Para investigação, nesta pesquisa os dados de entrada foram produzidos a partir das estimativas de chuva horária sendo posteriormente transformada em chuva média por bacia e para Curitiba acumulada de 6 em 6 horas. Operacionalmente e para a emissão de alertas propriamente ditos, acredita-se que a previsão do tempo e especificamente de chuva seja de fundamental importância, ou seja, sugere-se que a entrada de dados contemple a chuva estimada para 3 dias anteriores mais a previsão para o dia (4º dia), sendo que a previsão necessariamente deve ser de muito curto prazo (nowcasting), 6 ou 12 horas próximas, tempo necessário para que a população possa se preparar e até mesmo tomar medidas no sentido de se proteger e mitigar possíveis impactos.

5.3 Considerações Finais e Recomendações

No decorrer desta tese foi assinalada a importância de se construir modelos que de alguma forma possam representar problemas reais e prever condições futuras, tornando-se uma simplificação da realidade. Sabe-se que compreender um determinado problema como a dinâmica dos alagamentos investigada neste estudo é um processo bastante complexo em

função de que não apenas a variável chuva deflagra os alagamentos, mas também problemas relacionados ao dimensionamento de estruturas hidráulicas, limpeza e manutenção de bueiros e galerias pluviais, índice de impermeabilização do solo, lixo entre outros fatores, que são praticamente não mensuráveis.

A totalidade dos resultados alcançados com este trabalho possibilitou a comprovação das teses de que é possível desenvolver modelos de natureza estocástica e empírica que permitem estabelecer a relação entre padrões de chuva e alagamentos bem como prever via rede neural o número esperado de alagamentos, que espacializado levando em conta o histórico observado, indica quais os locais com maior probabilidade de ocorrência de alagamentos por bacia hidrográfica.

Porém, mais que estes relevantes resultados, o maior impacto desta tese advém de seu conjunto de novas ideias e da sua abordagem holística, que envolve estudos relacionados à meteorologia, estatística, gestão de desastres e geoprocessamento, viabilizando abstrair, prever e localizar situações futuras via a modelagem da variável chuva. Por conseguinte, esta tese representa uma iminente contribuição à ligação da área de Meteorologia com a de Geografia como um todo, posto que enfatiza o entendimento da dinâmica relacionada aos alagamentos e contribui no que diz respeito ao aumento da resiliência da população e mitigação dos possíveis impactos advindos dos alagamentos, visto que projeta um sistema de alertas. Por tudo isso, considera-se este trabalho como uma abertura para um amplo e fértil terreno de novas pesquisas na área de Geografia, utilizando-se de outras ciências como no caso da estatística para compreender determinados fenômenos relacionados à dinâmica e distribuição espacial.

Destaca-se aqui, também, que a ênfase desta tese não consistiu na universalidade dos modelos apresentados em questão, mas sim a sua contribuição à arte de modelar problemas reais e com isso desenvolver um dispositivo heurístico, voltado à compreensão da dinâmica relacionada aos alagamentos em Curitiba.

Este dispositivo, além de permitir o aprendizado sobre a dinâmica dos alagamentos, estimule aplicações criativas a fim de se testar hipóteses sobre os diversos fatores (além da chuva) que podem influenciar a ocorrência dos alagamentos. Ainda, este dispositivo deve ser visualizado como potencial instrumento de suporte a tomada de decisão para a emissão dos alertas, possibilitando identificar o que e onde se tem as maiores probabilidades de ocorrência de eventos. Além disso, a partir da identificação histórica e de tendências de determinados locais frequentemente atingidos por alagamentos, este dispositivo poderá

ainda servir como ferramental para os órgãos públicos realizarem campanhas mitigatórias dos impactos ou até mesmo utilizando-se de medidas de caráter estrutural para resolver o problema.

Como possibilidades de aplicação e discussões abertas para trabalhos vindouros, vislumbram-se: i) a aplicação dos modelos construídos em áreas adjacentes a Curitiba como, por exemplo, a Região Metropolitana de Curitiba já que do ponto de vista espacial acredita-se que a chuva não tenha variabilidade muito grande podendo os dados já processados serem empregados para outras áreas; ii) comparar os dados de estimativas de chuva com os dados de previsão, com o objetivo de definir uma formatação dos dados a serem utilizados de forma operacional como entrada no sistema de alertas a alagamentos. Ainda, utilizar de forma conjunta os dados de estimativas e de previsão na calibração dos modelos, com intuito de verificar seu desempenho e comparar com os resultados gerados neste trabalho, que utiliza apenas os dados de estimativa de chuva; iii) a partir da aquisição futura dos dados da área atingida pelos alagamentos (polígonos) rever, agregar ou propor uma nova metodologia para espacialização do NEA; iv) estudar qual o período histórico (3, 4, 5 anos ou mais) de dados de localização das ocorrências de alagamentos que deve ser utilizado na espacialização do NEA, já que em função da dinâmica própria da cidade os locais de alagamentos podem sofrer modificações; v) estudar alternativas de recalibração dos modelos no sentido de aumentar seu desempenho principalmente no que diz respeito à previsão do número esperado de alagamentos; vi) estudar metodologias para a espacialização da probabilidade de ocorrência de alagamentos, obedecendo as regras e leis da probabilidade, no sentido de garantir que a probabilidade conjunta apontada no espaço da bacia hidrográfica (representada por uma grade de tamanho “n”) corresponda a probabilidade específica desta bacia. vii) investigar os tempos de recorrência dos padrões de chuva e/ou se existe recorrência para determinados padrões.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, R F., ANDREW J. NEGRI. A Satellite Infrared Technique to Estimate Tropical Convective and Stratiform Rainfall. **Journal of Applied Meteorology**: Vol. 27, No. 1, 1988, pp. 30–51.

AGACHE, A. Plano de Urbanização de Curitiba. **In: Boletim PMC. Curitiba.** 1943. N. 12. Nov & Dez. 106p.

ALFARO, F. M.; OYAGUE, P. R. **Sistema Nacional de Información Ambiental.** Lima, 1997.

ANDRADE, J. P. **Previsão hidrometeorológica visando a sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas.** São Carlos. Dissertação - EESC, USP 2006.

ANTONIO, M. A. **Considerações sobre Integração de medidas de chuva por radar.** 111p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1984.

ANTONIO, M. A. **Técnica de ajuste em tempo real de medidas de chuva com radar.** 156p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP, Botucatu, SP, 1998.

AUSTIN, P. M. (1987). Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. **Monthly Weather Review**, v. 115. 1987, p. 1053-1071.

AVILA, A. M. H. **Estimativa de precipitação em regiões tropicais utilizando imagens do satélite GOES 12.** Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2006

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas compensatórias em drenagem urbana. **Associação brasileira de recursos hídricos.** Porto Alegre, 2005, 266p.

BARGE, B. L. *et al.* (1979) Rainfall measurements by weather radar: applications to hydrology. **Water Resour. Res.** v. 15, n. 6, p. 1380-1386.

BARREDO, J. **Sistemas información geográfica y evaluación multicriterio en La ordenación del territorio.** Editorial RA-MA, España. 1996. 261 p.

BATTAN, L. J. **Radar Observations of the Atmosphere.** The University of Chicago. Press, Chicago. Illinois, 1973. 324 p.

BAILEY, T.; GATRELL, A. **Interactive Spatial Data Analysis.** Longman Scientific and Technical, London, 1995.

BENETI, C., NOZU, I., SARAIVA, E. Monitoramento da Precipitação e de Eventos de Tempo Severo com Radar Meteorológico no Estado do Paraná. **X Congresso Brasileiro de Meteorologia, VII Congresso da FLISMET,** Brasília – DF. 1998:

BENETI, C. A. A.; CALVETTI, L.; PEREIRA FILHO, A. J. **Estimativa da Precipitação por Radar e Pluviômetros na Região Metropolitana de Curitiba - Resultados Preliminares**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2002, Foz do Iguaçu. CD-ROM.

BENETI, C. A. A.; CALVETTI, L.; PSCHIEDT, I. PEREIRA FILHO, A.J. Avaliação de estimativas de precipitação por satélite utilizando dados de estações de superfícies e radar meteorológico: verificação preliminar no Paraná. In **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis-SC, Ago. 2006.

BERGER A. R. Assessing Rapid Environmental Change Using Geoinicators. **Environment Geology**, Springer, Berlin, v. 1, n. 32, p. 35–44, 1997.

BISHOP, C.M., 1995. **Neural Networks for Pattern Recognition**. Clarendon Press, Oxford.

BORGES, K. A. de V. **Modelagem de Dados geográficos: Uma extensão do modelo OMT para aplicações geográficas**. Belo Horizonte. 128p. Dissertação (Mestrado em Administração Pública. Área de concentração: Tecnologias da Informação) - Escola de Governo - Fundação João Pinheiro, 1997.

BRANDÃO, A. Clima Urbano e Enchentes na Cidade do Rio de Janeiro. In: Guerra, A. J. T. e Cunha, S. B. (Orgs). **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand, 2001.

BRANDES, E. A. (1975). Optimising rainfall estimates with the aid of radar. **Journal of Applied Meteorology**, v. 14, n. 7, p. 1339-1345.

BRASIL Manual de Desastres – Volume I – Desastres Naturais. Ministério da Integração Nacional. 2003.

BREDA, A. **Avaliação de melhorias para um sistema de previsão hidrológica horária**. Curitiba. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

BREDA, A.; LEITE, E. A. SILVEIRA, R. B.; GONÇALVES, J. E. FREIRE, L. S. Avaliação do uso de métodos subjetivo e objetivo de previsão de chuva na simulação hidrológica de curto prazo. In: **II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**. Rio de Janeiro, 2008.

BRITO, Fausto. O deslocamento da população brasileira para as metrópoles. **Estudos avançados**. [online]. 2006, vol.20, n.57, pp. 221-236. ISSN 0103-4014.<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142006000200017>.

CALHEIROS, R. V. (1982) **Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico**. São Carlos, SP, tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento, EESCUSP, 229 p.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J. Integração do radar meteorológico doppler do Simepar e uma rede pluviométrica para a estimativa da precipitação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 11. 2003, Belo Horizonte. CD-ROM.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; GONÇALVES, J. E.; MOREIRA, I.; DUQUIA, C.; BREDAS, A. e ALVES, T. A. (2006). Definição de Classes de Precipitação para utilização em Previsões por Categoria e Hidrológica. In **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis-SC, Ago. 2006.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PSCHIEDT, I.; STRINGARI, D. e PEREIRA FILHO, A. J. Integração de Estimativas de Precipitação por Radar, Satélite e Pluviômetros: Análise Espacial para o Paraná. In **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. São Paulo – SP, Nov. 2007.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; ANTUNES, R. L.; OLIVEIRA, A. C. Estimativas de precipitação por radar e satélite: análise de relações ZR e integração com rede de pluviômetros. In **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Belo Horizonte - MG, Set. 2009.

CALVETTI, L. BENETI, C., DUQUIA, C., MOREIRA, I., PSCHIEDT, I.: **Estimativa Integrada de Precipitação (SIPREC) para a Região Sul do Brasil utilizando dados obtidos por radar, satélite e pluviômetros**. Curitiba- PR, 2010, (Relatório do Projeto Previsão de Eventos Extremos no Sul do Brasil – FINEP 14) Disponível em http://circam.com.br/finep14/Rel_FINEP14_Prec.PDF

CALHEIROS, R. V.; ANTONIO, M. A. Aplicações do radar de Bauru para fins hidrológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., Manaus. **Anais...** Manaus: 13 p. 1979.

CALHEIROS, R. V. e Antonio, M. A. Evolução de uma tempestade de verão conforme observada pelo radar de Bauru. **Anais**, 31a. Reunião Anual da SBPC (Fortaleza, SBPC, São Paulo, 10 pag. 1979.

CALHEIROS, R. V. **Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico**. 229p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1982.

CANALI, N. MURATORIA.M. Síntese da evolução geomorfológica da bacia de Sedimentação de Curitiba. In: **3º.Simpósio Regional de Geologia**. Curitiba. Sociedade Brasileira de Geologia. Núcleo de São Paulo; novembro, 1981, Atas, vol.2, 389p.

CRAMER, J. S. **Econometric applications of Maximum Likelihood Methods**, Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia: introdução**. São Paulo: Hucitec-Edusp. 1979, 106 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CRICHTON, D. **The risk triangle**. In: INGLETON, J. (ed) **Natural Disaster Management**. Tudor Rose Holdings Limited, Leicester, Inglaterra, 1999, p. 102-103.

COLLIER, C. G. Accuracy of rainfall estimates by radar, part II: comparison with raingauge network. **J. Hydrology**, v. 83, p. 225-235. 1986

COLLINSON, P. **Of bombers, radiologists, and cardiologists: time to ROC**. *Heart* 80:215–217. 1998.

COLTRINARI, Mudanças ambientais globais e geoindicadores. **Pesquisas em Geociências**, Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. v. 28, n.2, p.307-314, 2001.

CORDEIRO NETO, O. M. HESPANHOL, I.; TUCCI, C.E.M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília:UNESCO, 2001. 156 p.

CUNHA, M. I. R. **Aspectos socioeconômicos e ambientais das inundações no Brasil no período de 2003 a 2006**. Brasília, 2007. 189 f. Dissertação (Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável). Universidade de Brasília.

DANNI-OLIVEIRA, I.M. **A cidade de Curitiba/PR e a poluição do ar. Implicações de seus atributos urbanos e geocológicos na dispersão de poluentes em período de inverno**. São Paulo, 330p. Tese (Doutorado) USP, 1999.

DREW, D. **Processos Interativos Homem-Meio Ambiente**. 4ª ed. São Paulo: Bertrand Brasil, 1998.

DESCHAMPS, M. V. **Vulnerabilidade Socioambiental na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2004. 192 f. Tese (Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná.

DESTEFANI, D. Nostalgia. In: **GAZETA DO POVO**. Curitiba. 1999. 26 de set.

EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. **The Annals of Statistics** 7: 1-25. 1979

EFRON, B. & TIBSHIRANI, R. J. **An Introduction to the Bootstrap**. New York: Chapman e Hall. 1993

EIRD, Terminología: **Términos principales relativos a la reducción del riesgo de desastres**, Disponível em <<http://www.eird.org/esp/terminologia-esp.htm>> Acesso em maio de 2008.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. EMBRAPA, Brasília, 1999

EM-DAT: OFDA/CRED **International Disaster Database**. Université Catholique de Louvain -Brussels – Belgium Disponível em <www.em-dat.net> Acesso em maio de 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY – EEA. **Environmental indicators: typology and overview**. Copenhagen: E.E.A, 1999. (Technical Report, 25). Disponível em: http://www.eea.eu.int/TEC25/en/tech_25_text.pdf. Acessado em: julho, 2008

FAUSET, L. **Fundamentals of neural networks – Architectures, algorithms and applications**. Prentice-Hall, 1994.

FARHAT C. A. V. **Análise de diagnóstico em regressão logística**. 2003. Dissertação (Mestrado em Estatística)-Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FENDRICH, R. Histórico de acidentes hidrológicos em Curitiba. Bacia Hidrográfica do rio Belém. In: LIMA, R. E. **Uso dos solos e dos rios: conceitos e aplicações para a região de Curitiba**. Curitiba:UFPR – NIMAD. 2000. 149p.

FENIANOS, E. E. SADE, S. **Centro. Aqui nasceu Kúr'ý'týba**. Curitiba: Universidade, 1996.1000p.

FORTUNATO, R. A. **Subsídios à prevenção e controle das inundações urbanas: bacia hidrográficas do rio Belém, município de Curitiba – PR**. Curitiba, 2006. 237 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná.

FREEMAN, J. A.; SKAPURA, D. M. **Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1991.

GEISSLER, H. J. e LOCH, R. E. N. Análise histórica das enchentes em Curitiba – PR: medidas propostas e conseqüências observadas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. P. 507-523. (CD-ROM).

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações a respeito das inundações no Brasil. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa, Nov. 2005, 1, CD-rom.

GIUNTOLI, I. **Sistema Web-GIS participativo associado a indicadores de gestão descentralizada de risco de inundações**. São Carlos, 2008. 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo.

GJERTSEN, U. et al. (2003). **Gauge-adjustment of radar based precipitation estimates – a review**. COST 717 Workgroup 2 Report, 28p. Disponível em: <http://www.smhi.se/cost717/doc/WDD_02_200310_1.pdf>. Acesso: 10/01/2009

GONÇALVES, N.M.S. **Impactos Pluviais e Desorganização do espaço Urbano em Salvador – BA**. São Paulo: Tese de Doutorado em Geografia Física, Universidade de São Paulo, 1992.

GONÇALVES, F. M. **Utilização de Radar Meteorológico em Hidrologia**. São Paulo: 2005. 116 f. Tese (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GOVERNO DO PARANÁ & JICA – Agência de Cooperação Internacional do Japão. **Plano Diretor para Utilização de Recursos hídricos do estado do paraná**. Relatório setorial. Curitiba. 1996. In: www.hidricos.mg.gov.br/relprin/indice.htm. Acesso em Fev 2009.

GUILLOT, B. **Satellite Precipitations Contraintes Techniques et Physiques, Analyse de Quelques Methodes, Problemes de Recherche et de Validation**. Veil. Clim. Satel., n.55, p. 27- 38, 1995.

HACK, Lucy Pinto. O clima urbano de Petropolis - RJ - Analise dos impactos ambientais das chuvas de verão nas áreas de riscos e nas inundações. In: SANT'ANNA NETO, J. L. (Org.) **Os climas das cidades brasileiras**. Presidente Prudente: (s.n.), 2002: 89- 114.

HAIR, Jr., J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005

HANLEY J. A, McNeil B.J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. **Radiology** 143:29-36. 1982.

HARVEY, L. O., K. R. HAMMOND, C. M. Lusk, and E. F. MROSS, The application of signal detection theory to weather forecasting behavior. **Mon. Wea. Rev.**, 120, 863–883. 1992.

HAYKIN, S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1998.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e prática**. Trad. Paulo Martins Engel. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

HENDERSON-SELLERS, A. **Satellite Sensing of a Cloud Atmosphere: Observing the Third Planet**, Taylor & Francis Ltda., USA, 1984.

HESTERBERG, T.; MOORE, D. S.; MONAGHAN, S.; CLIPSON, A.; EPSTEIN, R. Bootstrap methods and permutation tests. In: **The practice of business statistics: using data for decisions**. New York: W.H. Freeman, 2003. cap. 18.

HIPÓLITO, J. R.; MACEDO, M. E.; RODRIGUES, A. e SARAMAGO, M., 1995. **Real-Time Flood Warning System for the Alenquer River Basin**. III International Symposium on Hydrological Applications of Weather Radar, Sao Paulo, Brasil, Agosto.

HOGAN, D. J. et al **Urbanização e Vulnerabilidade Socioambientais diferenciadas: o caso de Campinas**. Disponível em: <<http://www.unicamp.br>> Acesso em: 26 fev. 2007.

HORNER, W.W.; JENS, S.W. Surface runoff determination from rainfall without using coefficients. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, New York, v.107, n.3, p.1039-1117, 1941.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Applied Logistic Regression**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 2000.

HUNTER, S.M. WSR-88D Radar rainfall estimation: capabilities, limitations and potential improvements. **National Weather Digest**. vol. 20, p. 26-38, 1996.

IAP. **Monitoramento da qualidade das águas na região metropolitana de Curitiba**. Instituto Ambiental do Paraná. Curitiba, 2005.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Summary for Policymakers. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>> Acesso em: 26 fev. 2007.

IPPUC – INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. **Normas e critérios para o parcelamento do solo**. Curitiba: IPPUC, 1983.

IPPUC – INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA. Aspectos físicos-territoriais. In: **Análise, diagnóstico e diretrizes do Plano Municipal de Desenvolvimento Urbano –PMDU**. Curitiba, vol.I, nov/1985.

_____. **Curitiba em dados – 2008**. Curitiba: IPPUC, 2008. CD-ROM

IPPUC e PMC. Curitiba:a Revolução ecológica. Curitiba. Lagarto editors. 1992

JICA. Japan International Cooperation Agency. The master plan study on the utilization of water resources in Paraná state in the Federative Republic of Brazil. **Volume H – Flood control**. 1995. 99 p.

JOLLIFFE, I. T. and STEPHENSON, D. B. **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science**. Wiley. 240pp. 2003.

JUSEVICIUS, M. A. R.; BENETI, C.; DUQUILA, C. G.; LEITE, E. A. Monitoramento meteorológico e alerta de condições de tempo severo no tronco de 765kV no Paraná e em São Paulo. In: **XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Florianópolis, SC, 2011.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. 2006. 273f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

KHARIN, V. V. & ZWIERS, F. W. On the ROC score of probability forecast. **J. Climate** **16**, 4145-4150. 2003.

KHURE, W. L. ISO 14031 **Environmental performance evaluation EPE**. New Jersey. Prentice Hall PTR. 1998.

KOBYAMA, M. **Prevenção de desastres naturais – Conceitos básicos**. Editora Organic Trading, 2006.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F. Quantitative method to distinguish flood and flash flood as disasters. **SUISUI Hydrological Research Letters**, v.1, p.11-14, 2007.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F. Identificação dos riscos. **Revista Emergência**. 2011

KOHONEN, T. **Self-Organizing Maps**. 3a edition, Springer: Finland, 2000.

KOHONEN, T. **Self-Organizing Maps**. 3 ed. Berlim: Springer-Verlag. 2001

KRON, A., et al. **Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks**. Disponível em <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/485/2006/nhess-6-485-2006.html>. Acesso em Fevereiro de 2009.

LAVELL, A. (1999). **Gestión de Riesgos Ambientales Urbanos**. (F. F. Latina, Ed.) Disponível em <http://www.desenredando.org/public/articulos/1999/grau/GestionDeRiesgosAmbientalesUrbanos-1.0-sep-12-2001.pdf> Acesso em 05/01/20010.

LEITE, E. A. **Gestão do Valor da Informação Hidrometeorológica: O Caso dos Alertas de Inundação para Proteção de Bens Móveis em Edificações Residenciais de União da Vitória**. 2008. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

LEITE, E. A. & ROTUNNO FILHO, O. C. Sistema de previsão probabilística de eventos de raios – SIPPER. In **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis-SC, Ago. 2006.

LEITE, E. A. IGARASHI, A. T. JUSEVICIUS, M. A. R. Sistema de previsão probabilística espacial de eventos de descarga atmosféricas e sua aplicação na vigilância meteorológica do sistema elétrico. In: **XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, 2011**.

LEITE, E. A. BRENDA, A.; SABÓIA, J. P. J. Sistema de previsão probabilística de variáveis hidrológicas e sua aplicação no alerta de inundações. In: **XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Florianópolis, SC, 2011**.

LIMA, R.E. Inundações. Aspectos conceituais, consequências e alternativas de enfrentamento. In: LIMA, R.R. **Uso dos solos e dos rios: Conceitos e aplicações para a região de Curitiba**. Curitiba, UFPR – NIMAD. 2000. 194p.

LIMA, C. DE A. **A ocupação de áreas de mananciais na Região Metropolitana de Curitiba: do planejamento à gestão ambiental urbana-metropolitana**. Curitiba: Tese de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná,

2000.

LUDWIG JR O. & MONTGOMERY E. **Redes Neurais. Fundamentos e Aplicações com Programas em C.** Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna LTDA, 2007.

MAACK, R. **Geografia Física do estado do Paraná.** São Paulo: Livraria José Olimpio Editora, 1981.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Banco de dados de desastres naturais: análise de dados globais e regionais. **Caminhos de Geografia**, v.6, n.19, p. 130-149, 2006.

MARCELINO, E. V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos.** Santa Maria: INPE, 2008.

MARANDOLA JR., E. & HOGAN, D. J. Riscos e perigos: o estudo geográfico dos *natural hazards*. ENCONTRO TRANSDISCIPLINAR SOBRE ESPAÇO E POPULAÇÃO. 1, 2003, Campinas. **Anais...** Campinas: NEPO/ABEP, 2003. 13p. [CD-ROM]

MARSHALL, J. S; PALMER, W. MCK. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**. 5, p. 165-166, 1948.

MAYS, L. Water resources Engineering – chapter 14 **Flood Control**. Wiley and Sons, New York. 2001.

MASON, I. A model for assessment of weather forecasts. **Aust. Meteor. Mag.**, 30, 291–303. 1982:

MASON, S.J. & GRAHAM, N.E. Conditional probabilities, Relative operating characteristics and relative operating levels. **Weather and Forecasting** 14:713-725. 1999

MASON, S.J. On using "climatology" as a reference strategy in the Brier and ranked probability skill scores. **Mon. Wea. Rev.**, 1891-1895. 2004

MAZZA, L. G. Iguaçu, o nosso Ganges, o nosso Reno. **In: IPPUC. Memória da Curitiba Urbana.** Curitiba, 1990, v.3

MEDIONDO, E.M. Flood risk management of urban waters in humid tropics: early warning, protection and rehabilitation. **Workshop on Integrated Urban Water Management in Humid Tropics**, UNESCO I HP-VI, 04-2005, Foz do Iguaçu, Brasil, 2005.

MEDIONDO, E.M. Reducing vulnerability to disasters in urban areas of humid tropics, In: J Goldenfum et al (eds) "**Urban water management in humid tropics**", UNESCO, Paris (accepted, under revision), 2008.

MENDES, H.C. **Urbanização e Impactos Ambientais: Histórico das Inundações e Alagamentos na Bacia do Gregório, São Carlos – SP.** São Carlos. Dissertação

(Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

MENDONÇA, F.A. **Clima e criminalidade – ensaio analítico da correlação entre a temperatura do ar e a incidência de criminalidade urbana**. Curitiba: Ed. UFPR, 2001.

METZ, C. E. **Basic principles of ROC analysis**. Semin. Nucl. Med. Orlando, v.8, n.4, p. 283-298, Oct. 1978.

MINEROPAR. Minerais do Paraná. **Minas do Paraná**. Curitiba, 2006. 105p.

MMA. **Cidades sustentáveis: subsídios à elaboração da Agenda 21 Brasileira**. Brasília: Ministério de Meio Ambiente. 2000. 155p.

MMA. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos. Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. 3rd ed. New York: Wiley, 2001.

MONTGOMERY D. C.; RUNGER R. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1991. 241p.

MONTEIRO, C. A. F. Teoria e Clima Urbano: um projeto e seus caminhos. IN: **Clima Urbano**. MONTEIRO & MENDONÇA, 2003.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MÜLLER, M.; MÜLLER I.I.; FILL, H. D. Análise da enchente de janeiro de 1995 na região metropolitana de Curitiba. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Recife, 1995. **Anais**, v. 3, p. 147-152.

MUNICH-RE – **Topics Geo, Annual review: Natural Catastrophes 2004**. 2005.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, 20, p. 121-140, 2005.

NUNES, F.G. et al. **Propriedades morfométricas e aspectos físicos da bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba-PR**. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. Goiânia, 2006.

OECD. Organization for Economic Cooperation and Development. **Core set of indicators for environmental performance reviews**. Paris: OECD, 1993.

PENHA, R, N. **Um estudo sobre regressão logística binária**. Disponível em <http://www.iem.efei.br/dpr/td/producao2002/PDF/Renata.PDF>. Acessado em junho de 2010.

PENNING-ROUSELL, E.; FLOYD, P.; RAMSBOTTOM, D.; SURENDRAN, S. (2005) Estimating Injury and Loss of Life in Floods: A Deterministic Framework. **Natural Hazards** 36, 2005, 43-64.

PEREIRA FILHO, A. J., K. C. Crawford e Hartzell, C. **Statistical Objective Analysis Scheme (SOAS) for Improving WSR-88D Rainfall Estimates**. Vol.1: Comparative Analysis Between Stage III and the SOAS over WSR-88D Overlapping Areas. Report R-96-08, 58 pp, Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior. 1996:

PEREIRA FILHO, A. J., **Integração dos dados de Precipitação do Radar Meteorológico e da Rede Telemétrica de São Paulo via Análise Objetiva Estatística**. Relatório Técnico, FCTH. 1999

PEREIRA FILHO, A. J. ; CRAWFORD, K. C. ; HARTZELL, C. . Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. **Weather and Forecasting**, v. 13, n. 4, p.1016-1028, 1998.

PEREIRA FILHO, A., NAKAYAMA, P. T. e NEGRI, A. Gauge, radar and satellite areal rainfall estimates. **Sixth International Symposium Hydrological Applications of Weather Radar**. Melbourne, Austrália. 2004:

PEREZ FILHO, A. et al. Monitoramento e Gerenciamento de Bacias Urbanas Associados à Inundação: Diagnose da Bacia do Ribeirão Quilombo na Região Metropolitana de Campinas Utilizando Geotecnologias. **Revista do Departamento de Geografia**, 19 44-54 p. 2006.

PLATE E. J. Flood risk and flood management. **Journal of hidrology**, n267, p.2-11. 2002.

POLÍTICA NACIONAL DE DEFESA CIVIL (PNDC). Resolução nº 2/CONDEC-Conselho Nacional de Defesa Civil, de 12 de dezembro de 1994,

PNUD. **La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo. Un informe mundial**. Dirección de Prevención de Crisis y de Recuperación. New York, 2005.

ROSA, R. **O uso dos SIGs para o zoneamento: uma abordagem metodológica**. São Paulo, 1995, 214 f. Tese (Doutorado em Geografia Humana) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo

ROSA, P. T. M. **Modelos de “Credit Scoring”: regressão logística, chaid e real**. Dissertação (Mestrado em Estatística)-Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

RODRIGUES, J. O. et al. Equações de intensidade – duração – frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecostes, Ceará. **Scientia Agraria**. V.9, n. 4, p. 511-519, 2008.

RUMELHART, D. E., HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning representations by backpropagation errors. **Nature**, v. 323, p. 533–536, 1986.

RUFINO, R. C. **Avaliação da qualidade ambiental do município de tubarão (SC) através do uso de indicadores ambientais**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2002.

SANT'ANNA NETO, J. L. **As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica**. São Paulo: USP/FFLCH, 1995.

SOUZA, C. R. G. Risco a inundações, enchentes e alagamentos em regiões costeiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 231-247. (CD-ROM)

STANSKI, H. R., WILSON, L. J. e Burrows, W. R. **Survey of common verification methods in meteorology**. www Tech. Rep. 8, WMO/TD 358, 1989. 114 pp.

SUDERHSA. **Plano diretor de drenagem para a bacia do rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 2002. Relatório Final, vols. 3, 4, 6 e 7.

SUGAI, M.R.B.; FILL, H.D.O.A. Tempo de recorrência associado à precipitação máxima provável na Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia**, Rio de Janeiro, v. 8, n. p. 1, 110,1990.

SWETS, J. A. Form of empirical ROCs in discrimination and diagnostic tasks: Implications for theory and measurement of performance. **Psychological Bulletin**,99, 181–198. 1986.

SWETS, J' Measuring the accuracy of diagnostic systems'. **Science** **240**, 1285 -1293. 1988.

SWETS J. A. Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: collected papers. Mahwah, NJ; Lawrence Erlbaum Associates, 1996.

TOBIN, G. A; MONTZ, B. E. **Natural hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Press, 1997. 388p.

TODINI, E. An operational decision support system for flood risk mapping forecasting and management. **Urban Water**, v.1, p.131-143, 1999.

TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ Ed. USP, 1993, 626 p.

TUCCI, C. E. M.; Porto, R. L. L.; Barros, M. T. (org) **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS,1995.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. (capítulo 3)

TUCCI, C.E. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. PORTO, R.BARROS, M. (Org). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/Ed.UFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M. & BERTONI, J. C (Org). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TREBY, E. J.; CLARK, M. J.; PRIEST, S. J. Confronting flood risk: Implication for insurance and risk transfer. **Journal of environmental management** 81, 351-359. 2006.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.

TURNER, M.G., WEAR, D.N. AND FLAMM, R.O. Landscape ownership and land-cover change in the southern Appalachian highlands and the Olympic Peninsula. **Ecololy Apply**. 6: 1150–1172. 1996.

VARGAS C.I.C, OLIVEIRA F.S.B.F. OLIVEIRA A., CHARNECA N. Análise da Vulnerabilidade de uma Praia Estuarina à Inundação: Aplicação à Restinga do Alfeite (Estuário do Tejo). **Revista de Gestão Costeira Integrada**.8(1):25-43, 2008.

VENTICINQUE, E. M.; CARNEIRO, J. S.; MOREIRA, M. P.; FERREIRA, L. O uso de regressão logística para espacialização de probabilidades. **Megadiversidade**. v. 3, nº 1-2, Dez 2007. Disponível em: http://www.conservation.org.br/publicacoes/files_mega3/4ousoderegressaologica.pdf. Acesso em 21/06/2010.

WARREN, R.E. Predictive modelling of archaeological site location: a primer. In K.M.S. Allen, S.W. Green, e E.B.W. Zubrow, (eds) *Interpreting Space: GIS and archaeology*: 90-111. London: Taylor & Francis, 1990.

WHITE, G.F. (ed) **Natural Hazards (local, national, global)**. New York, Oxford University Press USA, 1974.

WILKS, D. S. Statistical Weather Forecasting. In: WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction**. San Diego, California, International Geophysics series. V. 59.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction**. Academic Press, 1995 467 pp.

UNDP – United Nations Development Programme. **Reducing disaster risk: a challenge for development**. New York, USA: UNDP, 2004. 129p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Estimation of probable maximum precipitation.**, WMO – N.332, Secretariat of the WMO, Geneva, 1973

ZANELA, E. **O impacto das precipitações, as inundações e a percepção das comunidades atingidas, da imprensa e dos gestores públicos: um estudo de caso no**

bairro Cajuri – Curitiba – PR. Curitiba, 2005. 209 p. Tese (Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná.

ZHANG, J., ZHOU, C. XU, K. WATANABE, M. Flood disaster monitoring and evaluation in China. **Environmental Hazards**, v.4, p.33-43, 2002.

ZWEIG M.H., CAMPBELL G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. **Clinical Chemistry** 39:561-577. 1993