

GESTÃO DO VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA:
O CASO DOS ALERTAS DE INUNDAÇÃO PARA PROTEÇÃO DE BENS MÓVEIS EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE UNIÃO DA VITÓRIA

Eduardo Alvim Leite

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, Ph.D.

Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph.D.

Prof. Augusto José Pereira Filho, Ph.D.

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey, Ph.D.

Prof. Webe João Mansur, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2008

LEITE, EDUARDO ALVIM

Gestão do Valor da Informação
Hidrometeorológica: O Caso dos Alertas
de Inundação para Proteção de Bens
Móveis em Edificações Residenciais de
União da Vitória [Rio de Janeiro] 2008

XIX, 224 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia Civil, 2008)

Tese - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1. Valor da informação
 2. Gestão da informação
 3. Sistema de alerta de inundação
- I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha esposa Leda e ao meu filho Otávio,
pelo apoio incondicional, carinho e compreensão
nestes tempos de estudo e pesquisa intensivos.

REFLEXÃO

Complementar a iniciativa de aumentar o quanto se sabe sobre o tempo, o clima e os recursos hídricos, saber e utilizar o quanto não se sabe, constitui-se em estratégia decisiva para agregar valor às informações hidrometeorológicas.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Otto Corrêa Rotunno Filho, pela visão, entusiasmo e disposição demonstrados em todos os momentos, em discussões sobre este trabalho e outros assuntos filosóficos, científicos e profissionais, que muito enriqueceram o meu aprendizado.

Aos colegas do Instituto Tecnológico SIMEPAR, pelas animadas discussões técnicas empreendidas sobre diversos tópicos afeitos às ciências atmosféricas e ambientais, muitos dos quais foram contemplados no presente trabalho.

Aos colegas, demais professores e profissionais do Laboratório de Hidrologia do Programa de Engenharia Civil, bem como de outros programas da COPPE, pelo suporte, incentivo e intercâmbio de conhecimentos e experiências.

À direção do Instituto Tecnológico SIMEPAR, pela autorização para a frequência deste curso de pós-graduação e pela cessão de dados e informações hidrometeorológicas.

À Prefeitura Municipal de União da Vitória e ao Serviço Social Autônomo PARANACIDADE, pela cessão dos dados geográficos e censitários do município de União da Vitória – PR.

À Coordenação Municipal de Defesa Civil e à Sociedade de Estudos Contemporâneos da Comissão Regional Permanente de Prevenção contra Enchentes do Rio Iguaçu – SEC/CORPRERI, pela discussão de aspectos operacionais relacionados ao problema das inundações urbanas na região de União da Vitória.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

GESTÃO DO VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA:
O CASO DOS ALERTAS DE INUNDAÇÃO PARA PROTEÇÃO DE BENS MÓVEIS EM
EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE UNIÃO DA VITÓRIA

Eduardo Alvim Leite

Julho/2008

Orientador: Otto Corrêa Rotunno Filho

Programa: Engenharia Civil

Apesar da relevância das motivações relacionadas aos estudos de valor da informação hidrometeorológica, iniciativas desse tipo têm sido insuficientes, tanto no Brasil quanto em outros países, devido à existência de um conjunto de condicionantes e desafios que limita o seu escopo e seu desenvolvimento.

O trabalho apresenta uma abordagem metodológica que propõe uma mudança de foco de realização de estudos isolados para o estabelecimento de um processo sistemático e estruturado de gestão do valor da informação hidrometeorológica nas organizações sensíveis ao tempo, clima ou recursos hídricos. Essa mudança de foco baseia-se na constatação da existência de múltiplos valores da informação, cada um deles retratando aspectos essenciais da relação entre a informação e seu processo de acesso, assimilação e uso. A metodologia proposta prioriza a perspectiva da Teoria da Decisão, elegendo, como unidade de análise, o processo de tomada de decisão impactado pelas variáveis, fenômenos e informações hidrometeorológicas. Ela enfatiza a importância de integrar diferentes métodos de estimativa de valor e derivar estratégias de gestão da análise combinada dos múltiplos valores estimados. A metodologia também inclui uma tipologia de problemas e uma proposta de estruturação do ambiente de simulação e análise, que contempla o uso da abordagem Dinâmica de Sistemas.

Em consonância com a abordagem metodológica proposta, esta pesquisa apresenta um estudo específico, no qual investiga o valor da informação de alerta de inundações. Os efeitos sobre o valor do alerta da incorporação das incertezas nos processos decisórios e de melhorias na geração das previsões hidrometeorológicas são analisados. Também são apresentadas inovações para o modelo referencial de sistema de previsão e alerta de inundações, para o critério de mensuração do valor da informação e para a estratégia probabilística de emissão do alerta.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

MANAGEMENT OF VALUE OF HYDROMETEOROLOGICAL INFORMATION:
THE CASE OF FLOOD WARNINGS FOR PROTECTION OF MOVABLE ASSETS IN
RESIDENTIAL BUILDINGS OF UNIÃO DA VITÓRIA

Eduardo Alvim Leite

July/2008

Advisor: Otto Corrêa Rotunno Filho

Department: Civil Engineering

Despite the relevance of the motivations for conducting studies about hydrometeorological information value, there are insufficient initiatives with this approach, both in Brazil and in other countries, due to the existence of a set of conditioners and challenges that limits their scope and development.

The work presents a methodological approach for changing the focus from isolated studies to the establishment of a structured and systematic management process of value of hydrometeorological information at organizations that are sensitive to weather, climate or water resources. This change of focus is based on the finding of multiple values of information, each one depicting key aspects of the relationship between information and its process of access, assimilation and use. The proposed methodology prioritizes the perspective of Decision Theory, electing as unit of analysis the decision making process impacted by hydrometeorological variables, phenomena and information. The methodology emphasizes the importance of integrating different methods of value estimation and deriving management strategies by the combined analysis of multiple estimated values. The methodology also includes a typology of problems and a proposal of structure for the environment of simulation and analysis, that considers the use of System Dynamics approach.

In line with the proposed methodology, this research presents a case study, which investigates the value of flood warning information. The effects of the incorporation of uncertainty in decision making processes and of improvements in the generation of hydrometeorological forecasts on the value of warning are analyzed. In addition, innovations are presented for the reference model of flood forecasting and warning system, for the measuring criterion of value of information and for the probabilistic strategy for warning issues.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
	1.1 Relevância do Tema	1
	1.2 Objetivos do trabalho	3
	1.3 Contribuição do trabalho	5
	1.4 Estrutura do documento de tese	7
2	VALOR E INFORMAÇÃO	9
	2.1 Concepções de valor	9
	2.2 Concepções de informação	11
	2.3 Valor da informação	13
	2.4 Caracterização da informação hidrometeorológica	14
3	O PROBLEMA DA ESTIMATIVA E GESTÃO DO VALOR DA INFORMAÇÃO	17
	3.1 Perspectivas teóricas de abordagem do problema de valor da informação	17
	3.2 Fatores gerais condicionantes do valor da informação.....	21
	3.3 Fatores específicos condicionantes do valor da informação hidrometeorológica	24
4	A INFORMAÇÃO E SEU IMPACTO NO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO.....	27
	4.1 Aspectos comportamentais do processo de tomada de decisão nas organizações.....	27
	4.2 Modelo analítico simplificado do processo de tomada de decisão	30
	4.3 Modelo bayesiano ampliado do processo de tomada de decisão	31
	4.4 Modelo bayesiano <i>fuzzy</i> do processo de tomada de decisão	35
5	MODELAGEM DE DECISÃO APLICADA A PROBLEMAS DE VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA	39
	5.1 Modelagem canônica dos processos de tomada de decisão sensíveis à previsão meteorológica.....	39
	5.2 Extensões e generalizações da modelagem canônica.....	41
	5.3 Outros modelos de decisão de avaliação e interpretação convenientes.....	44
	5.4 Relevância do tratamento e comunicação das incertezas para uso em modelos de decisão	45

6	METODOLOGIA PROPOSTA PARA A GESTÃO do VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA	53
6.1	Gestão do valor da informação hidrometeorológica	53
6.2	Abordagem metodológica para gestão do valor da informação hidrometeorológica	54
6.2.1	Configuração do problema e delimitação do espaço de análise.....	55
6.2.2	Seleção e integração dos métodos de estimativa de valor	57
6.2.3	Derivação das estratégias de gestão	60
6.3	Proposta de aplicação da abordagem Dinâmica de Sistemas à modelagem de problemas de valor da informação hidrometeorológica	63
6.3.1	A abordagem Dinâmica de Sistemas	63
6.3.2	Modelagem do valor da informação hidrometeorológica por meio da abordagem Dinâmica de Sistemas.....	66
6.4	Proposta de uma tipologia de problemas de valor da informação hidrometeorológica	70
7	ESTUDO DO VALOR DAS INFORMAÇÕES DE ALERTA DE INUNDAÇÃO: O Caso da Proteção de Bens Móveis em Edificações Residenciais de União da Vitória.....	73
7.1	Objetivos do estudo	73
7.2	Justificativa do estudo.....	73
7.3	Configuração do problema e delimitação do espaço de análise	75
7.3.1	Os impactos e medidas de controle das inundações urbanas.....	75
7.3.2	Avaliação dos impactos das inundações urbanas	78
7.3.3	Sistema de previsão e alerta de inundações	80
7.3.4	O caso das inundações urbanas de União da Vitória	84
7.4	Pressupostos iniciais	86
7.5	Etapas componentes do estudo	87
7.5.1	Simulação do comportamento hidrológico em União da Vitória.....	88
7.5.2	Geração das previsões hidrológicas de vazão e nível	89
7.5.2.1	Verificação da qualidade das previsões	90
7.5.2.2	Modelo auto-regressivo tipo ARIMA.....	91
7.5.2.3	Modelo baseado em filtro de Kalman	93
7.5.3	Avaliação dos impactos das inundações em União da Vitória.....	99
7.5.3.1	Método das perdas médias por edificação atingida	101
7.5.3.2	Método das funções unitárias nível versus perdas	102
7.5.3.3	Sistema de informações geográficas para análise de inundações	104

7.5.4	Simulação dos processos de tomada de decisão	114
7.5.4.1	Decisão de proteção contra inundações	114
7.5.4.2	Decisão de emissão do alerta de inundação.....	118
7.5.5	Metodologia de análise de desempenho do sistema de alerta de inundações.....	124
7.5.6	Metodologia de análise do valor da informação de alerta.....	125
7.6	Resultados do estudo	127
7.6.1	Análise da qualidade das previsões hidrológicas.....	128
7.6.2	Valores de referência sobre os impactos das inundações em União da Vitória.....	133
7.6.3	Análise de desempenho do sistema de alerta de inundações.....	135
7.6.4	Análise do valor da informação de alerta de inundação	144
7.6.4.1	Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação a combinações de estratégias de decisão	144
7.6.4.2	Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação a variações na estratégia subjetiva de decisão.....	148
7.6.4.3	Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação à informatividade da previsão de precipitação	151
7.6.5	Análise das relações entre qualidade e valor do alerta de inundação.....	155
7.7	Conclusões do estudo	161
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	165
8.1	Relativas ao problema da estimativa e gestão do valor da informação hidrometeorológica	166
8.2	Relativas à metodologia proposta de gestão do valor da informação hidrometeorológica	170
8.3	Relativas à estimativa e gestão do valor da informação de alerta de inundação	175
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179

ANEXO A: MODELAGEM DE TIPOS DE PROBLEMAS DE VALOR DA
INFORMAÇÃO POR MEIO DA ABORDAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS

A.1	Modelo razão custo / perda	188
A.2	Modelo razão custo / perda com incorporação de perturbações subjetivas	198
A.3	Modelo razão custo / perda com incorporação de variáveis <i>fuzzy</i>	203
A.4	Modelo razão custo / perda condicionada pela curva de características operacionais.....	205
A.5	Modelo razão custo / perda com o uso de previsões probabilísticas	210
A.6	Modelo generalizado de custos e perda por categoria	214
A.7	Modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas.....	218

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Os quatro níveis da informação (dados, informação propriamente dita, conhecimento e inteligência) e os processos dominantes em sua evolução hierárquica (processamento, análise e síntese)	12
Figura 2.2:	Elementos constituintes de um problema de estimativa do valor da informação, que abrangem os processos de incorporação, suas conseqüências, impactos e resultados esperados	14
Figura 2.3:	Componentes da metodologia de avaliação ambiental integrada do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que abrangem o estado atual do meio ambiente, as pressões humanas e produtivas, seus impactos vinculados e respostas da sociedade	15
Figura 3.1:	Modelo para contabilização de ganhos e custos de um sistema de informações, que reconhece como única fonte de valor a aplicação final da informação pelo usuário	23
Figura 4.1:	Requerimentos de informação conforme a natureza do processo de tomada de decisão (PTD), racionalidade preponderante e o subsistema da organização considerado	29
Figura 6.1:	Esquema representativo da proposta de abordagem metodológica para gestão do valor da informação hidrometeorológica no contexto organizacional	56
Figura 6.2:	Proposta de estruturação do ambiente de simulação para estimativa e análise de sensibilidade do valor da informação hidrometeorológica.....	69
Figura 7.1:	Região de estudo do valor da informação de alerta, envolvendo a cidade de União da Vitória, na bacia do rio Iguaçu, no Estado do Paraná.....	76
Figura 7.2:	Sistema de previsão-resposta de inundações, com os subsistemas de informação e de decisão	81
Figura 7.3:	Sistema integrado de previsão e alerta de inundações utilizado como base referencial no estudo de valor da informação hidrometeorológica.....	83
Figura 7.4:	Vazão representativa do comportamento hidrológico do rio Iguaçu em União da Vitória, para os anos de 1930 a 1999.....	90

Figura 7.5:	Comparativo da acurácia média, medida pelo erro médio quadrático total e negativo, entre previsões de mesma informatividade (0,5) realizadas via matriz de verossimilhança e via modelo baseado em filtro de Kalman	100
Figura 7.6:	Comparativo da acurácia média, medida pelo erro médio quadrático total e negativo, entre previsões de mesmo horizonte (48 horas) realizadas via matriz de verossimilhança e via modelo baseado em filtro de Kalman	100
Figura 7.7:	Distribuição espacial e localização altimétrica das quadras e setores censitários da área urbana de União da Vitória	106
Figura 7.8:	Níveis de enchente ao longo da cidade de União da Vitória, para diferentes tempos de retorno e seções do rio	107
Figura 7.9:	Mapa de delimitação das planícies de inundação em União da Vitória, conforme os tempos de retorno definidos a partir do comportamento das vazões referentes ao posto fluviométrico da ponte ferroviária (seção UV)	108
Figura 7.10:	Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário n° 412820305000026, bairro Navegantes, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas.....	110
Figura 7.11:	Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário n° 412820305000023, bairro São Bernardo, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas.....	111
Figura 7.12:	Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário n° 412820305000002, bairro Centro, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas	112
Figura 7.13:	Funções unitárias de perdas devido a inundações (a), de custos das ações de proteção (b), de redução das perdas devido às inundações (c) e de restrição temporal à implementação de resposta de proteção (d)	117
Figura 7.14:	Diagrama de bloco utilizado na implementação do ambiente de análise e estimativa do valor da informação de alerta de inundação para o caso de União da Vitória	129
Figura 7.15:	Resultado da simulação dos impactos das inundações e valor da informação, em termos das perdas residenciais médias anuais, para o caso da combinação de estratégias probabilísticas	

	(probabilidade conjunta limite de 0,20), modelo de previsão Arima e planície de inundação de 5 anos em União da Vitória.....	130
Figura 7.16:	Comportamento do erro médio quadrático das previsões de vazão máxima em 96 horas dos modelos Arima e filtro de Kalman, para o período de 1930 a 1999.....	132
Figura 7.17:	Comportamento do erro médio absoluto das previsões do tempo de ocorrência da vazão máxima em 96 horas dos modelos Arima e filtro de Kalman, para o período de 1930 a 1999.....	132
Figura 7.18:	Distribuição das perdas residenciais anuais (a) e do índice de impacto social (b) em relação às planícies de inundação consideradas.....	135
Figura 7.19:	Curva do balanço de desempenho característico do sistema de alerta para a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a estratégia de emissão de alerta adotada (determinística ou probabilística) e o modelo de previsão utilizado (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5).....	138
Figura 7.20:	Curva do tempo médio entre o alerta e o início da inundação para a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a estratégia de emissão de alerta adotada (determinística ou probabilística) e o modelo de previsão utilizado (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5).....	138
Figura 7.21:	Relação entre as perdas residenciais anuais totais e o número médio de falso alerta, para o modelo de previsão Arima e a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a combinação de estratégias utilizada na emissão do alerta.....	142
Figura 7.22:	Relação entre as perdas residenciais anuais totais e o número médio de falso alerta, para o modelo de previsão de filtro de Kalman, com informatividade de 0,5, e a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a combinação de estratégias utilizada na emissão do alerta.....	142
Figura 7.23:	Valores relativos da informação de alerta de acordo com a combinação de estratégias, critério de mensuração e modelo de previsão adotados (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5).....	147
Figura 7.24:	Valores relativos da informação, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, considerando o modelo	

	Arima e a estratégia subjetiva, com diversos tempos de atraso para o início da implementação de ações de proteção.....	150
Figura 7.25:	Valores relativos da informação, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, considerando o modelo de Filtro de Kalman, com informatividade de 0,5 e a estratégia subjetiva, com diversos tempos de atraso para o início da implementação de ações de proteção	150
Figura 7.26:	Valores relativos da informação de alerta de inundações, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, para distintas combinações de estratégias, contemplando simulações do modelo Arima e do modelo de filtro de Kalman, com diferentes informatividades da previsão de precipitação, bem como com a previsão de precipitação sempre nula ($p0$) e a previsão perfeita até 24 horas ($p1$)	154
Figura 7.27:	Relação entre o valor relativo da informação de alerta, calculado com base no critério de perdas residenciais médias anuais, e o coeficiente de correlação da vazão máxima prevista em 96 horas, conforme a combinação de estratégias adotada	156
Figura 7.28:	Relação entre o valor relativo da informação de alerta, calculado com base no critério de perdas residenciais médias anuais, e o erro médio absoluto do tempo previsto de ocorrência da vazão máxima, conforme a combinação de estratégias adotada.....	157
Figura 7.29:	Comportamento da defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita, em termos das perdas residenciais médias anuais, para as previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme a combinação de estratégias adotada e o número de previsões perfeitas considerado	160
Figura A.1:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda.....	189
Figura A.2:	Resultado de simulação do modelo razão custo / perda	190
Figura A.3:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto a múltiplas realizações de simulação de eventos e previsões.....	191
Figura A.4:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à variação no custo	192
Figura A.5:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à variação na probabilidade climatológica do evento	193

Figura A.6:	Análise conjunta de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à probabilidade climatológica do evento e ao custo (ou razão custo / perda)	194
Figura A.7:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à qualidade do sistema de previsão (condição de confiabilidade geral)	195
Figura A.8:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à qualidade do sistema de previsão, mensurada através do índice de Brier.....	196
Figura A.9:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com a incorporação de perturbações subjetivas	200
Figura A.10:	Resultado da simulação do modelo razão custo / perda com incorporação de perturbações subjetivas	200
Figura A.11:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à propensão do tomador de decisão em evitar custos presentes.....	201
Figura A.12:	Análise de sensibilidade da diferença entre os valores de informação derivados da decisão bayesiana e do uso do valor de face das previsões, quanto à probabilidade climatológica do evento e ao custo (ou razão custo / perda).....	202
Figura A.13:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com a incorporação de variáveis fuzzy.....	204
Figura A.14:	Resultado da simulação do modelo razão custo / perda com incorporação de variáveis <i>fuzzy</i>	205
Figura A.15:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com ajustamento operacional e tecnológico	207
Figura A.16:	Curvas de características operacionais (ROC) considerando diversos discriminantes de qualidade	208
Figura A.17:	Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto a variações na probabilidade de detecção e na curva de características operacionais.....	208
Figura A.18:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com o uso das previsões probabilísticas	211

Figura A.19:	Análise de sensibilidade do ganho relativo associado à previsão probabilística em relação à previsão determinística binária, para o modelo razão custo / perda, considerando variações na probabilidade de detecção <i>POD</i> e na razão custo / perda	212
Figura A.20:	Análise de sensibilidade do ganho relativo associado à previsão probabilística em relação à previsão determinística binária, para o modelo razão custo / perda, considerando variações na probabilidade de detecção <i>POD</i> e no discriminante de qualidade das previsões <i>d</i>	213
Figura A.21:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo generalizado de custos e perdas por categorias.....	215
Figura A.22:	Resultado da simulação do modelo generalizado de custos e perdas por categoria	216
Figura A.23:	Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas.....	219
Figura A.24:	Função gráfica representativa das perdas unitárias potenciais (em unidades monetárias / hora) associadas a cada valor de vazão	220
Figura A.25:	Resultado da simulação do modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas.....	221
Figura A.26:	Resultados esperados para cada decisão de ação de proteção em função da previsão para o modelo de custos e perdas para variáveis quantitativas.....	223

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1:	Resumo dos impactos dos eventos severos nos EUA em perdas de vidas humanas e perdas econômicas anuais	74
Tabela 7.2:	Perdas financeiras causadas pelas inundações de 1983, 1992 e 1993 em União da Vitória (PR) e Porto União (SC).....	85
Tabela 7.3:	Perdas financeiras unitárias estimadas devido a inundações em União da Vitória, em função do número de edificações inundadas	101
Tabela 7.4:	Valores da curva de probabilidade de níveis e vazões para União da Vitória, referentes ao posto fluviométrico da ponte ferroviária (seção UV)	105
Tabela 7.5:	Características de ocupação das planícies de inundação em União da Vitória, em termos do número de edificações e da área média construída, de acordo com o grupo de classes e a faixa de rendimento nominal mensal do responsável pelo domicílio.....	113
Tabela 7.6:	Medidas de qualidade das previsões hidrológicas dos modelos Arima e filtro de Kalman, abrangendo as variáveis vazão máxima em 96 horas e seu tempo de ocorrência, para o período analisado de 1930 a 1999	131
Tabela 7.7:	Valores de referência sobre impactos das inundações em União da Vitória.....	133
Tabela 7.8:	Valores dos parâmetros de ajuste operacional, resultados e indicadores de desempenho relativos ao sistema de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo Arima.....	140
Tabela 7.9:	Valores dos parâmetros de ajuste operacional, resultados e indicadores de desempenho relativos ao sistema de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo de filtro de Kalman, com informatividade de 0,5	141
Tabela 7.10:	Valores da informação de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo Arima.....	145
Tabela 7.11:	Valores da informação de alerta de inundações baseado nas previsões hidrológicas do modelo de filtro de Kalman, com informatividade da previsão de precipitação de 0,5.....	145
Tabela 7.12:	Valores da informação de alerta de inundações contemplando a estratégia subjetiva de decisão, para os modelos de previsão	

	analisados e diferentes tempos de atraso para o início da implementação das ações de proteção	148
Tabela 7.13:	Valores da informação do alerta de inundações para distintas combinações de estratégias, contemplando simulações do modelo Arima e do modelo de filtro de Kalman com diferentes informatividades da previsão de precipitação, identificados por θ_0 , $\theta_{0,1}$, $\theta_{0,2}, \dots$, θ_1 , bem como com a previsão de precipitação sempre nula (p_0) e a previsão perfeita até 24 horas (p_1)	152
Tabela 7.14:	Qualidade das previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme o número de previsões perfeitas considerado.....	159
Tabela 7.15:	Valor das previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme a combinação de estratégias adotada e o número de previsões perfeitas considerado	159
Tabela 7.16:	Resumo dos valores da informação de alerta derivado das previsões perfeita e dos modelos Arima e filtro de Kalman, conforme a combinação de estratégias adotada para emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção	163

1.1 Relevância do Tema

Informações hidrometeorológicas possuem o potencial de gerar impactos significativos e abrangentes na sociedade como um todo, com profundas repercussões na eficiência econômica e competitividade dos negócios, na segurança e qualidade de vida da população e na sustentabilidade ambiental (USWRP, 1997). As oportunidades para a expansão, diversificação e desenvolvimento de pesquisas, produtos e serviços multiplicam-se e podem acelerar o desenvolvimento científico e tecnológico da área. Um sétimo da economia americana, que corresponde à cerca de um trilhão de dólares por ano, é sensível ao tempo e ao clima e o uso inovador das informações hidrometeorológicas pode afetar positivamente múltiplos setores produtivos, do governo e da sociedade civil. Só nos Estados Unidos, as despesas públicas e privadas para o provimento de previsões meteorológicas são estimadas em US\$ 5 bilhões anuais, as receitas anuais da indústria meteorológica privada aproximam-se de US\$ 1 bilhão (PIELKE JR. e CARBONE, 2002) e a indústria de derivativos de tempo, cuja primeira oferta pública ocorreu em meados de 1998, atingiu valores aproximados de US\$ 7 bilhões (KELLY, 2006). Esses valores apresentados, correspondentes à economia americana, são demonstrativos da importância crescente da meteorologia na vida do país, sendo possível perceber situações similares em diversas regiões do mundo e no Brasil.

Ao lado do significativo e abrangente potencial de impacto das informações hidrometeorológicas, percebe-se uma carência de registros e casos comprobatórios do valor dessas informações para a sociedade em geral ou setores específicos da economia. Os estudos de valor da informação hidrometeorológica constituem-se em meios de explicitar as relações entre investimentos públicos ou privados e resultados auferidos pela sociedade ou organização, entre desenvolvimento científico e tecnológico da área e benefícios sociais, entre ciência e sociedade. Os problemas sociais que podem ser mitigados por meio de informações hidrometeorológicas são as

conexões naturais entre as ciências atmosféricas e ambientais e a sociedade. A identificação, definição e incorporação desses problemas como metas de programas científicos e tecnológicos, bem como a documentação e disseminação dos casos de conexões de sucesso são o caminho para a sustentabilidade do desenvolvimento da área (PIELKE JR., 1997). A demonstração dessas conexões entre o provimento de informação hidrometeorológica e a mitigação de problemas sociais e organizacionais reproduzidas nos estudos de valor influencia a tomada de decisão pública e privada concernente ao tema, no sentido de favorecer o desenvolvimento da área e a reprodução de novos e subseqüentes benefícios associados.

O desafio de associar valor à informação hidrometeorológica dentro de diversos contextos de análise – a nível individual, de uma organização, de um setor produtivo ou da sociedade como um todo – tem se configurado em preocupação crescente, tanto no Brasil quanto no exterior. Agências governamentais, empresas e universidades têm buscado se informar sobre o tema e planejado estudos e projetos na área. As motivações para esse interesse manifesto são variadas e podem ser agrupadas conforme o contexto de análise.

Em um contexto mais geral, como o setorial ou social, a motivação para a estimativa do valor da informação advém da necessidade de demonstração de relevância social, com ênfase econômica, das atividades desenvolvidas pelas agências meteorológicas e de recursos hídricos para a conquista de suporte por recursos públicos. Também nesse contexto, a motivação relaciona-se à busca de orientação para o estabelecimento de prioridades de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, sistemas e serviços.

Em um contexto mais específico, como o individual ou organizacional, a motivação advém da necessidade de justificar os custos dos serviços de provimento dessas informações, tanto por fornecedores quanto por usuários, bem como da oportunidade de identificar novas necessidades em termos de disseminação, capacitação, produtos e / ou serviços customizados para demandas especificadas. Ainda nesse contexto, a motivação relaciona-se aos objetivos de otimizar o uso da informação pelos usuários, descobrir os motivos de utilização parcial ou não utilização das informações atuais, buscando melhorar a utilidade do serviço como um todo.

A relevância dos estudos de valor da informação e as motivações apresentadas para a consecução de projetos na área qualificam o tema como prioritário para desenvolvimento de relações mais profícuas entre provedores e usuários, entre setor governamental e produtivo, entre ciência e sociedade. Essa melhoria de relações possui o potencial de orientar e impulsionar o desenvolvimento sustentável das ciências atmosféricas e ambientais, de forma a garantir conteúdo científico e

tecnológico crescente, embutido em informações hidrometeorológicas relevantes para setores usuários específicos e para a sociedade como um todo.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho possui como objetivo geral apresentar uma abordagem metodológica para gestão do valor da informação hidrometeorológica no contexto organizacional. Diante da relevância das motivações para a estimativa do valor da informação hidrometeorológica e de múltiplos condicionantes e desafios que têm limitado a consecução e o êxito desses estudos para diferentes setores usuários, o trabalho propõe a implantação de um processo sistemático de gestão do valor da informação nas organizações sensíveis ao tempo, clima ou aos recursos hídricos. Esse processo deve incorporar as motivações presentes nos estudos específicos de valor e promover a derivação de estratégias de gestão, tanto para a melhoria contínua do acesso, assimilação e uso das informações, quanto para a inovação de seu processo de produção.

A abordagem metodológica proposta, focada no valor da informação hidrometeorológica dentro de um contexto de análise organizacional, é de aplicabilidade geral em relação ao problema, entendido como uma relação entre um evento ou variável hidrometeorológica e uma conseqüente ameaça ou oportunidade para a organização. Ela enfatiza a importância de conjugar, em um mesmo processo de gestão, com revisões e renovações contínuas, módulos interdependentes, que abrangem a configuração do problema e espaço de análise, a seleção e integração de múltiplos métodos de estimativa de valor e a derivação de estratégias de gestão.

A abordagem metodológica abrange também uma proposta de estruturação do ambiente de simulação e análise do valor da informação hidrometeorológica, na implementação do qual se propõe o uso da abordagem Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*), bem como de uma proposta de tipologia de problemas do valor da informação hidrometeorológica. A proposta de um esquema estruturado de simulação é motivada pela necessidade de modelagem e posterior simulação do processo decisório impactado pelo tempo, clima ou recursos hídricos, conforme orientação de alguns métodos enquadrados sob a perspectiva da Teoria da Decisão. Esse esquema foi configurado para orientar a implementação de ambientes de simulação destinados a estimar e analisar a sensibilidade do valor da informação hidrometeorológica, o qual pode ser aplicado a diferentes problemas e contextos. Uma tipologia de problemas do valor da informação hidrometeorológica foi também proposta com o intuito de subsidiar e acelerar o estudo de valor, na medida em que permite o reconhecimento de

categorias de problemas, que podem se adequar ou admitir extensões ou generalizações para abranger o caso de interesse.

Cabe ressaltar que o escopo de aplicação da abordagem metodológica proposta limita-se à investigação do valor da informação hidrometeorológica no contexto de análise mais específico, no nível de uma ou mais organizações ou indivíduos. Sua aplicação não se conforma com problemas de valor da informação no contexto mais geral, de nível social ou setorial. As motivações do estudo, as perspectivas teóricas de suporte e as metodologias utilizadas distinguem-se, conforme se varia o contexto de análise, e sua reunião sob uma mesma abordagem metodológica limitaria sua utilidade dentro do foco de aplicação pretendido.

Consonante com a abordagem metodológica proposta, no âmbito específico do estudo de valor apresentado, o caso dos alertas de inundação para proteção de bens móveis em edificações residenciais de União da Vitória, este trabalho possui os objetivos de: (1) estimar o valor da informação de alerta hidrológico na redução de perdas econômicas em situações de inundação na cidade referida; e (2) investigar os condicionantes de construção do valor, buscando identificar oportunidades de derivação de estratégias de gestão do valor da informação de alerta. Na estimação do valor da informação, é adaptada e aplicada uma metodologia específica de avaliação de impacto de inundações sobre edificações residenciais e mensurada a contribuição dos alertas na proteção dos bens móveis presentes nessas edificações. Na investigação dos condicionantes de construção do valor, são analisados os efeitos da incorporação das incertezas das previsões nos processos decisórios de emissão do alerta e de implementação de medidas de proteção, verificando as oportunidades de otimização do uso da informação. Também são simuladas inovações na geração das informações, avaliando os efeitos sobre o valor do alerta de inundações, de mudança do modelo hidrológico componente do sistema de previsão, bem como da melhoria das previsões de precipitação que alimentam o modelo hidrológico.

Não obstante aos múltiplos impactos das inundações urbanas e aos demais benefícios que possam estar vinculados a um sistema de alerta, o escopo deste estudo abrangeu somente os impactos negativos das inundações representados pelas perdas econômicas sobre as edificações residenciais e os benefícios vinculados à tomada de decisão sobre proteção dos bens móveis dessas edificações. A delimitação do escopo de estudo foi motivada pelos seguintes fatores: (1) interesse pela estimativa de um valor econômico para a informação de alerta; (2) significância dos valores considerados em relação ao montante de perdas evitáveis com o uso da informação de alerta; (3) consideração das perdas residenciais como fator decisório fundamental da emissão do alerta; e (4) carência de modelos decisórios quantitativos sobre a

proteção contra inundações aplicáveis à diversidade de conteúdo das edificações não residenciais (industriais, comerciais e governamentais). Outros pressupostos mais específicos considerados no estudo são apresentados no item 7.4. As limitações de escopo consideradas impõem sua inclusão nos resultados, análises e conclusões do estudo, e as mesmas devem ser observadas e explicitadas em qualquer extrapolação.

1.3 Contribuição do trabalho

A contribuição geral deste trabalho reside na estruturação de uma abordagem metodológica que propõe uma mudança de foco de realização de estudos isolados de valor da informação para um processo sistemático de gestão do valor da informação hidrometeorológica no contexto organizacional. Essa mudança de foco está principalmente embasada na constatação da existência de múltiplos valores da informação, associados a diferentes métodos de estimativa, cada um deles retratando aspectos essenciais da relação entre a informação e seu processo de acesso, assimilação e uso. O estabelecimento de um processo estruturado e contínuo de gestão pode favorecer a realização progressiva de diversas iniciativas de estudos de valor da informação, contribuindo para o enfrentamento do conjunto de condicionantes e desafios que os caracteriza. Esse processo em curso viabiliza a análise combinada de múltiplos valores da informação, a qual pode subsidiar a derivação de estratégias de gestão voltadas tanto à otimização do seu uso quanto à inovação de sua produção.

Essa abordagem metodológica proposta, especializada na informação hidrometeorológica, incorpora os méritos de: (1) integrar métodos distintos de estimativa de valor da informação; (2) subsidiar a derivação de estratégias de gestão; (3) estruturar esquema de simulação e análise do valor da informação; (4) verificar adequação do uso da abordagem Dinâmica de Sistemas no processo de modelagem e construção do ambiente de simulação e análise do valor da informação; e (5) incorporar uma tipologia de problemas de valor da informação hidrometeorológica, a ser utilizada como referência na modelagem de problemas concretos. Para favorecer a gestão do valor da informação hidrometeorológica é também apresentada a modelagem de problemas típicos por meio da abordagem Dinâmica de Sistemas. Para esses problemas foram derivadas expressões analíticas que buscam explicitar as relações entre o valor da informação e os parâmetros determinantes dos modelos apresentados, bem como foram investigadas estratégias de gestão voltadas à agregação de valor.

A contribuição específica no estudo de valor realizado reside nos seguintes esforços que foram combinados de forma inovadora: (1) adaptação, integração e

aplicação de uma metodologia de avaliação das perdas econômicas devido às inundações sobre as edificações residenciais, que incorpora o processo decisório de proteção dos bens móveis pela população a partir do recebimento do alerta; (2) crítica e adaptação de um modelo de sistema integrado de previsão e alerta de inundações que reconhece os processos decisórios interdependentes de emissão do alerta, por parte da coordenação da defesa civil, e de proteção contra inundações, por parte da população potencialmente atingível; (3) investigação e mensuração dos efeitos conjugados da incorporação das incertezas em cada um dos processos decisórios identificados; (4) proposta de um índice de impacto social das inundações, que busca refletir uma medida da tragédia econômica imposta pelas inundações à população atingida, e utilização desse índice na estimativa de valor; (5) utilização de modelos hidrológicos distintos e do conceito de informatividade da previsão de precipitação para investigar a sensibilidade do valor do alerta à melhoria da qualidade das previsões de precipitação e nível; e (6) proposta de uma estratégia probabilística de emissão do alerta baseado na probabilidade conjunta do nível exceder determinado limite da planície de inundação e do tempo de alagamento ser inferior a um limite necessário à tomada de decisão de proteção.

A combinação desses esforços não só permitiu a estimativa do valor da informação de alerta em relação a dois critérios de mensuração, perdas econômicas residenciais e índice de impacto social, bem como viabilizou a investigação aprofundada dos condicionantes de construção do valor. Essa investigação subsidiou a discussão de estratégias de melhoria no uso e na produção das informações hidrometeorológicas envolvidas no problema estudado de inundações urbanas.

O tema proposto neste trabalho de pesquisa, tanto no que tange à metodologia geral para a gestão do valor da informação hidrometeorológica, quanto em sua aplicação ao problema das inundações urbanas, possui caráter exploratório, que possibilita demandas adicionais de investigação para o aperfeiçoamento e ajuste das abordagens propostas. Embasado em perspectivas teóricas sobre o tema, o trabalho propõe uma abordagem para a gestão do valor da informação hidrometeorológica, testa a proposição em modelos típicos levantados da literatura e em um caso de estudo de valor representativo de um problema real e promove a disseminação dos resultados alcançados. Nesse sentido, ele insere a proposição no processo de desenvolvimento científico, esperando críticas que a invalide ou sugestões que a melhore, em um processo transformativo que questiona e renova sua aplicabilidade permanentemente.

1.4 Estrutura do documento de tese

A primeira parte do documento apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica de trabalhos correlacionados ao tema proposto, que inclui os capítulos 2 a 5. No capítulo 2, discutem-se concepções de valor e informação presentes na literatura e apresentam-se os elementos constituintes de um problema de estimativa do valor da informação. Algumas questões são propostas pelo autor para configurar o problema de associar valor à informação, dentro de um contexto de análise determinado. Também nesse capítulo se caracteriza a informação hidrometeorológica e discute-se o seu processo de produção, com ênfase na realidade brasileira. O capítulo 3 apresenta as perspectivas teóricas de abordagem do problema de estimativa e gestão do valor da informação e discute tanto os fatores gerais, condicionantes do valor da informação, quanto os fatores específicos, associados à informação hidrometeorológica. O foco de interesse do trabalho no contexto mais específico, de nível organizacional e individual, foi determinante na opção de explorar em maior profundidade a Teoria da Decisão, desenvolvida no âmbito das Ciências da Administração. Assim, no capítulo 4, discute-se o impacto da informação no processo de tomada de decisão, no qual são apresentados os modelos analítico simplificado, bayesiano ampliado e bayesiano *fuzzy*, bem como os aspectos comportamentais que condicionam esse impacto nas organizações. O capítulo 5 focaliza a discussão na modelagem de decisão aplicada às informações hidrometeorológicas. Nesse capítulo, são apresentados a modelagem canônica dos processos decisórios sensíveis à previsão meteorológica, suas extensões e generalizações, bem como outros modelos de avaliação e interpretação convenientes. Também, no capítulo 5, discute-se a relevância do tratamento e da comunicação das incertezas e de sua incorporação em modelos de decisão.

Na segunda parte do documento, no capítulo 6, é apresentada a abordagem metodológica proposta para a gestão do valor da informação hidrometeorológica. Nesse capítulo, inicialmente, configura-se o entendimento de gestão do valor da informação, apresenta-se a estrutura da metodologia proposta e discute-se cada um de seus módulos. Também, no capítulo 6, são discutidas a proposta de estruturação de um ambiente de simulação para problemas de valor da informação hidrometeorológica, a aplicação da abordagem Dinâmica de Sistemas na implementação do ambiente, bem como a proposta de uma tipologia de problemas dessa natureza.

Na terceira parte do documento, no capítulo 7, apresenta-se um estudo do valor das informações de alerta de inundação, no qual, utilizando-se da abordagem

metodológica proposta, investiga-se o caso da proteção de bens móveis em edificações residenciais de União da Vitória. Esse capítulo explicita os objetivos do estudo, sua justificativa, a configuração do problema tratado, a delimitação do espaço de análise, os pressupostos, as etapas componentes do estudo, os resultados alcançados e as suas conclusões. A organização das etapas de estudo foi realizada de acordo com o esquema estruturado de simulação e análise do valor da informação hidrometeorológica incluído na abordagem metodológica proposta. Em cada etapa de estudo é discutida a metodologia específica utilizada, que é subjacente ao estudo de valor considerado. Assim, inicialmente, são descritos os componentes hidrológicos de simulação do comportamento histórico e de geração das previsões. Em seguida, discute-se a avaliação dos impactos das inundações e são apresentados os modelos de tomada de decisão de emissão de alerta e de implementação de ações de proteção. Na última etapa, são apresentadas as metodologias de análise do desempenho do sistema e do valor da informação de alerta de inundações.

Na última parte do documento, no capítulo 8, as principais conclusões, recomendações e alguns comentários são apresentados. Eles foram organizados de acordo com a sua abrangência. Assim, são apresentadas as conclusões e recomendações gerais quanto ao problema da estimativa e gestão do valor da informação, quanto à metodologia proposta de gestão do valor da informação hidrometeorológica e quanto à estimativa e gestão do valor da informação de alerta de inundação. O documento inclui ainda o anexo A, que apresenta a modelagem e a análise de sensibilidade de problemas típicos de valor da informação hidrometeorológica, realizadas a partir da abordagem Dinâmica de Sistemas.

2.1 Concepções de valor

O termo valor carrega grande ambigüidade sendo objeto recorrente de pesquisa a busca de uma teoria sistematizada de valor. Segundo GRAEBER (2001), existem três grandes correntes de pensamento que abordam o conceito de valor, que configuram o seu senso sociológico, econômico e lingüístico.

De acordo com GRAEBER (2001), valor no senso econômico, dentro da visão clássica utilitarista, é a percepção da utilidade, o grau pelo qual os objetos são desejados, particularmente quando medido por quanto os indivíduos estão dispostos a pagar para obtê-los. No senso sociológico, valor é a concepção do que é realmente bom, próprio e desejável na vida humana. Trata-se da concepção do desejável, além da utilidade, que possui o papel de influenciar as escolhas que as pessoas fazem entre possíveis e diferentes cursos de ação. No senso lingüístico, a noção de valor confunde-se com identidade e pode, segundo Saussure, citado por GRAEBER (2001), ser entendido como a diferença mais significativa de alguma coisa.

Segundo AGÜERO (1996), que aborda valor em seu senso estritamente econômico, esse conceito aparece em diferentes escolas do pensamento econômico: tem-se a teoria objetiva do valor, sustentada pelos clássicos da Economia, como Smith, Ricardo, Mill e Marx e a teoria subjetiva do valor, defendida pelos neoclássicos, como Jevons, Menger, Böhm-Bawerk, Marshall e Wicksell. Para os clássicos, o conceito de valor desdobra-se em valor de uso e valor de troca. Segundo AGÜERO (1996), por valor de uso entende-se a utilidade particular que tem para um indivíduo qualquer o uso de um bem, por valor de troca entende-se o reconhecimento, por parte da coletividade, desse valor. Para MARX (2004), a utilidade, que se realiza no uso ou no consumo, confere à mercadoria o seu valor de uso e unicamente porque a mercadoria possui um valor de uso que adquire um valor de troca.

Para os neoclássicos em geral, valor é um conceito subjetivo e abstrato a respeito da importância que os bens têm para os indivíduos, e nesse sentido o valor de um bem depende da utilidade marginal do bem que, por sua vez, sustenta-se na sua utilidade e escassez (AGÜERO, 1996). Dentro do pensamento neoclássico, outros economistas posteriores como Walras, Pareto, Hicks, Samuelson e Debreu, da chamada escola do equilíbrio geral, concordam que “o valor é resultado da interação simultânea do comportamento de todos os agentes consumidores e produtores da economia, os quais, dentro de um ambiente concorrencial, conduzem ao equilíbrio geral, continuamente, e estão interagindo para definir o valor de cada um dos bens e as trocas correspondentes” (AGÜERO, 1996, p. 24).

Quanto à forma de medir o valor de um bem ou mercadoria, os clássicos Smith e Ricardo já consideravam o trabalho a causa e a medida do valor. MARX (2004) corroborava a ideia de que é somente o quantum de trabalho ou o tempo de trabalho necessário para produzir um artigo, numa dada sociedade, que determina a quantidade de valor deste artigo. Para ele, a substância do valor é o trabalho e a medida de sua magnitude é a duração do trabalho. De forma geral, segundo AGÜERO (1996), os clássicos concordam que o número de horas de trabalho empregado na confecção ou o poder de compra em trabalho podia medir o valor, embora essa percepção apresente dificuldades práticas e motive a busca de substitutos para a sua mensuração. Já os neoclássicos consideram que o trabalho para elaborar um bem não é decisivo na determinação de seu valor e “utilizam o conceito de valores relativos de troca, que é a relação de troca entre duas mercadorias (Jevons) ou a relação de troca entre uma mercadoria em particular e uma unidade padrão ou a moeda (Walras)” (AGÜERO, 1996, p. 26).

Com base nos conceitos apresentados, pode-se conceber valor como medida relativa do desejo do indivíduo, organização ou sociedade por determinado objeto, compreendida pela diferença de percepção do objeto em questão em relação a outros, em dado momento. Dessa forma, o valor emerge da relação estabelecida entre o indivíduo, organização ou sociedade e o objeto em questão, não se confunde estritamente com as características intrínsecas do mesmo. Se o interesse é o reconhecimento do valor econômico do objeto, pode-se identificar um valor de uso – relativo à utilidade particular do objeto, e um valor de troca – dado pelo reconhecimento coletivo de seu valor.

2.2 Concepções de informação

Conforme a perspectiva disciplinar de análise, o conceito de informação desloca-se de um nível hierárquico de estruturação de dados, com propósito de redução da incerteza, até conjuntos significantes com a competência e a intenção de gerar conhecimento.

A abordagem usual afeita à área da tecnologia da informação caracteriza um contínuo entre dado, informação e conhecimento, cada qual com certo nível hierárquico de organização, significação e contexto. Assim, conforme apresentado por BEAL (2004), dados são registros ou fatos em estado bruto, facilmente estruturados, transferíveis e armazenados. A partir da compreensão das suas relações, obtém-se a informação, que se constitui de dados dotados de relevância e propósito, que exige consenso em relação ao seu significado. Com o entendimento de padrões e princípios, evolui-se para o conhecimento, entendido como combinação de informação, contexto, reflexão e análise, sendo esse último nível de difícil estruturação, captura e transferência. Análise similar foi realizada por MORESI (2000), que descreveu os chamados níveis hierárquicos da informação no processo decisório e incluiu, além de dado, informação e conhecimento, a inteligência. Ele descreveu esse quarto nível como conhecimento que foi sintetizado e aplicado a uma determinada situação, com uso de julgamento e intuição, para ganhar maior profundidade de consciência da mesma. A Figura 2.1 sintetiza esses quatro níveis propostos por MORESI (2000) e apresenta os processos dominantes de sua evolução hierárquica.

COELHO NETTO (2001), em uma análise semiológica, comenta a distinção entre informação e significação presente nos estudos baseados na teoria da informação. Segundo ele, a análise informacional não incorpora o significado da mensagem, o seu conteúdo semântico, ela simplesmente busca identificar a quantidade de informação presente na mensagem, capaz de reduzir a incerteza e retirar o indivíduo do imobilismo da dúvida. A informação surge como agente dissipador de incerteza e cujo objetivo é provocar uma alteração no comportamento das pessoas (COELHO NETTO, 2001). No âmbito da chamada teoria da informação, foram estruturados diversos modelos de informação e comunicação, onde se destaca o clássico modelo de Shannon-Weaver. Esse modelo tem sido criticado por se reduzir a um esquema mecanicista de transmissão de informações, que não incorpora questões como a significação, contexto, relacionamento entre provedor e receptor e influência do meio de comunicação e do sistema social.

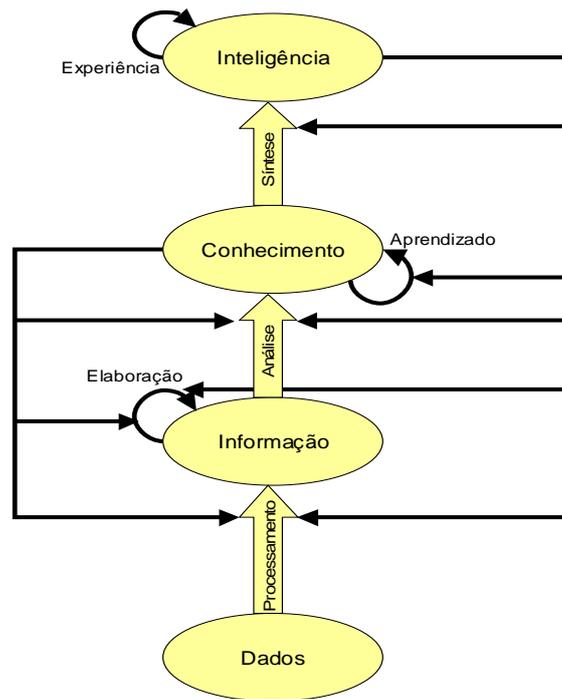


Figura 2.1: Os quatro níveis da informação (dados, informação propriamente dita, conhecimento e inteligência) e os processos dominantes em sua evolução hierárquica (processamento, análise e síntese)

Extraída de MORESI, 2000, p. 17.

MILLER (2005) reforça a distinção introduzida por COELHO NETTO (2001). Ele realça o entendimento de que a informação não possui significação intrínseca, constitui-se simplesmente em suporte para o significado, em veículo pelo qual se provoca ou evoca uma resposta humana. Nessa abordagem, a informação por si só é estática e sem vida – ela simplesmente existe, a espera de ser interpretada, de ter significado atado a ela. Informação idêntica quase invariavelmente provoca diferentes significados em cada um de nós, porque nossos interesses, motivações, crenças, atitudes, sentimentos, senso de relevância, etc. são quase pessoais e estão sempre mudando. Ele apresenta um quadro comparativo entre informação e conhecimento e destaca como características do primeiro em oposição ao segundo; ser estática, independente das pessoas, explícita, digital, fácil de duplicar e disseminar, e sem significado intrínseco. Dentro desse referencial, informação é o gatilho para alertar sobre a necessidade de interpretar eventos, seu papel principal é prover oportunidade para construir significado das entradas sensoriais. Para MILLER (2005), somente os seres humanos podem inteligentemente dar senso e contexto às informações, construir e perceber significados, e comparar interpretações para atingir propósitos compartilhados.

BARRETO (1999) optou por utilizar-se de um conceito mais amplo de informação, como conjuntos significantes com a competência e a intenção de gerar conhecimento no indivíduo, em seu grupo, ou na sociedade. Dessa forma, a informação fica qualificada como um instrumento modificador da consciência do homem e de seu grupo social, deixando de ser unicamente uma medida de organização por redução de incertezas para se constituir na própria organização em si. Ele introduz o conceito de assimilação da informação, como “um processo de interação entre o indivíduo e uma determinada estrutura de informação, que vem a gerar uma modificação em seu estado cognitivo, produzindo conhecimento” (BARRETO, 1999, p. 168). Esse estágio é considerado qualitativamente superior, transcendendo a disponibilidade, o acesso e o uso da informação.

Mesmo a idéia corrente de que informação reduz incertezas não é isenta de críticas. De acordo com THORNGATE (1995), que utiliza a perspectiva das ciências comportamentais, informação é o que existe fora, além de nossos sentidos; ela vive na natureza, nos escritos, nos computadores, no ar. Já conhecimento é o que existe do lado de dentro do indivíduo. A incerteza, assim como o conhecimento, não existe fora, mas somente dentro e o que pode reduzir a incerteza é somente o conhecimento e não a informação.

Da análise conjunta dessas diferentes concepções, pode-se associar o conceito de informação, não só a uma simples coleção de dados, mas a níveis de estruturação e explicitação de relações pragmaticamente elaboradas, que mesmo não incorporando conteúdo semântico por si só, alertam sobre a necessidade de interpretação e provocam nos indivíduos a construção do significado. Dessa forma, a informação constitui-se, através de processos de acesso, assimilação e uso, em meio de redução da incerteza, alteração comportamental e geração de conhecimento.

2.3 Valor da informação

A partir das concepções de valor e informação tratadas anteriormente, pode-se configurar o problema de associar valor à informação, dentro de algum contexto de análise, ao desafio de buscar identificar uma medida do quanto é desejável nesse contexto empreender processos de acesso, assimilação e uso da informação, promovendo, como consequência, a redução de incertezas, alteração comportamental e geração de conhecimentos.

Identificado o problema de uma forma generalizada, é possível realçar diversas questões na análise específica. Algumas dessas questões identificadas são as seguintes: (1) Qual o contexto de análise do valor da informação? O nível individual, a

organização, um setor produtivo, a sociedade como um todo; (2) Como se caracteriza a informação específica, mensagem, tipo ou fonte, em relação a qual se deseja associar valor? (3) Qual conceito de desejável é representativo do valor? O social, que representa o que é bom para a sociedade como um todo; o utilitário, ligado a uma utilidade específica; ou o mercadológico, derivado do reconhecimento coletivo; (4) Qual a métrica mais apropriada para medir o valor nesse contexto? (5) Em que medida cada uma das conseqüências de redução da incerteza, de alteração comportamental e de geração do conhecimento associadas à informação contribui na construção de seu valor? (6) Quais os impactos e resultados vinculados, avaliados em relação aos objetivos, interesses e finalidades do contexto de análise, expressam o desejo e, conseqüentemente, determinam o valor da informação? A Figura 2.2 reúne os elementos constituintes normalmente presentes em um problema de estimativa do valor da informação.

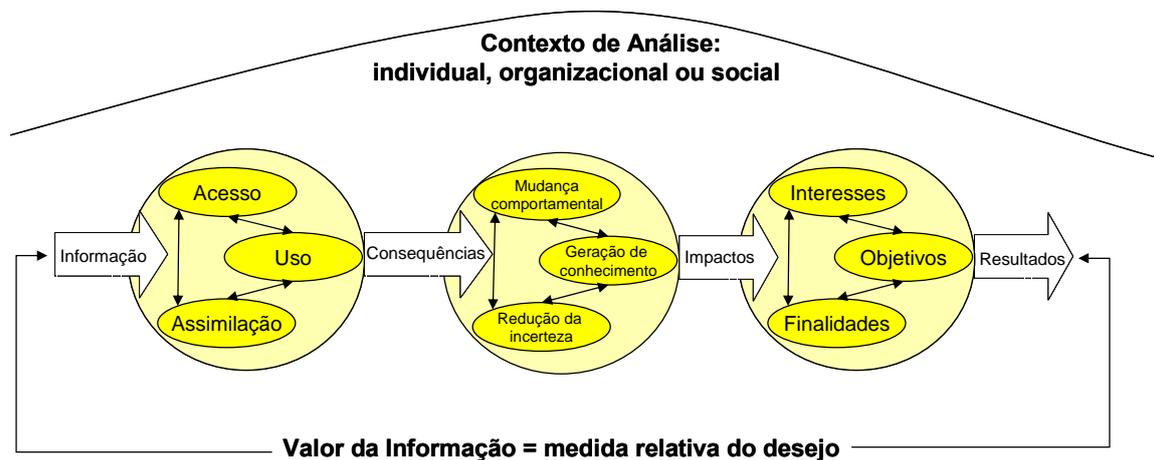


Figura 2.2: Elementos constituintes de um problema de estimativa do valor da informação, que abrangem os processos de incorporação, suas conseqüências, impactos e resultados esperados

2.4 Caracterização da informação hidrometeorológica

O objeto de estudo deste trabalho foi delimitado como o da informação hidrometeorológica, considerada nesse âmbito como uma classe particular das chamadas informações ambientais. Para a sua caracterização fez-se uso de uma metodologia de avaliação ambiental integrada, denominada PIER, discutida em SANTOS e CÂMARA (2002), que o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) tem utilizado para avaliar o estado e as perspectivas do meio ambiente em diversos países e regiões do mundo. Conforme retratado na Figura 2.3, são componentes da metodologia PIER: (1) o estado atual do meio ambiente; (2) as

pressões que as atividades humanas e produtivas exercem; (3) os impactos dessas pressões sobre o meio ambiente e do próprio meio ambiente sobre a sociedade¹ e (4) as respostas coletivas e individuais implementadas visando prevenir impactos negativos, corrigir a degradação ou conservar os recursos naturais. Tomadas em seu conjunto, esses componentes constituem uma base de informações de conteúdo técnico, necessária ao entendimento da dinâmica entre meio ambiente e desenvolvimento.

Com base na metodologia PIER, e de acordo com os propósitos deste estudo, as informações hidrometeorológicas podem ser configuradas como aquelas que caracterizam o estado do meio ambiente, no que concerne à atmosfera e os recursos hídricos. Essa caracterização de estado do recurso natural deve abranger não só a sua condição presente, mas também suas propriedades estatísticas históricas e previsões sobre o seu comportamento futuro.

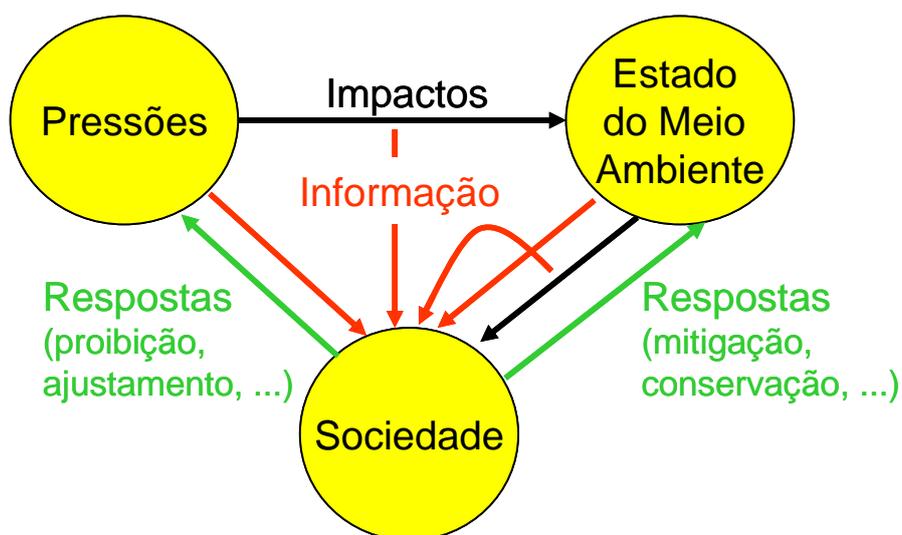


Figura 2.3: Componentes da metodologia de avaliação ambiental integrada do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), que abrangem o estado atual do meio ambiente, as pressões humanas e produtivas, seus impactos vinculados e respostas da sociedade

Adaptada de SANTOS e CÂMARA, 2002, p. 10.

¹ Os impactos do meio ambiente sobre a sociedade, inicialmente implícitos, foram deliberadamente incluídos no diagrama como componentes essenciais de uma avaliação ambiental integrada, conforme sugestão do Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey.

Dessa forma, entende-se como informação hidrometeorológica o conjunto de informações qualitativas e quantitativas sobre o passado, presente e futuro da atmosfera e dos recursos hídricos, que abrange variáveis meteorológicas e hidrológicas específicas, variáveis de qualidade do ar e da água, refletindo suas propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como informações agregadas sobre o estado geral do tempo, clima e dos recursos hídricos.

A análise do processo de produção das informações hidrometeorológicas pode ajudar em sua caracterização. Dentro de uma análise preliminar, é possível reconhecer no mínimo quatro funções prioritárias em um processo de produção da informação hidrometeorológica: (1) o monitoramento das variáveis meteorológicas e hidrológicas; (2) a modelagem e simulação do seu comportamento futuro; (3) a previsão sistemática das condições do tempo, clima e recursos hídricos e emissão de alertas de condições extremas e adversas e (4) a disseminação das informações geradas a múltiplos segmentos usuários. Essas funções, muitas vezes executadas no Brasil de forma segmentada em distintas instituições ou unidades, são interdependentes e devem ser articuladas em um mesmo processo de produção de informações. Elas caracterizam-se por especificações próprias quanto à natureza e o fluxo de informações, regras e normas particulares de conduta, subculturas e crenças típicas, tecnologias apropriadas e requisitos diferenciados de sustentabilidade funcional, que envolvem os aspectos técnicos (equipamentos e métodos), humanos, institucionais, legais e econômicos. Uma análise mais cuidadosa permite identificar o sistema tecnológico ² dominante em cada uma dessas funções: pode-se reconhecer um sistema de base instrumental e eletrônica para a função de monitoramento; um sistema de base científica para a modelagem; um sistema de base técnico-operacional para a previsão e um sistema de base informacional e de comunicação para a disseminação. Dessa forma, pode-se perceber que as informações hidrometeorológicas têm origem em um complexo técnico-científico segmentado e pouco articulado no país, em cujo processo de produção se amplificam contradições conceituais, e têm como destino final o usuário específico ou o grande público que, de maneira geral, encontra dificuldades de entendimento da terminologia e significado das informações que recebe.

² Sistema tecnológico deve ser entendido como o complexo de meios, métodos, conhecimentos, aptidões e aparelhamentos físicos (máquinas e equipamentos), que substancia o processo transformativo organizacional e é combinado singularmente para consecução das estratégias organizacionais.

3 O PROBLEMA DA ESTIMATIVA E GESTÃO DO VALOR DA INFORMAÇÃO

3.1 Perspectivas teóricas de abordagem do problema de valor da informação

O problema da estimativa e gestão do valor da informação tem sido tratado a partir de diversas perspectivas teóricas baseadas em diferentes disciplinas. Dentro do escopo deste trabalho, serão destacadas as principais referências sobre o tema.

Sob a perspectiva de uma abordagem macroeconômica, desenvolve-se uma área de estudo denominada Economia da Informação, que procura determinar os impactos da informação no desenvolvimento (MENOUE, 1993, MCCONNELL, 1995). No âmbito desses estudos, o interesse é mensurar o impacto da informação não sobre um indivíduo ou organização particular, mas sobre o desenvolvimento de um país, setor ou região. Avaliação de impacto nessa abordagem envolve a demonstração de benefícios sociais (políticos, culturais e econômicos), ambientais e outros, que podem ser apontados como consequência do uso efetivo da informação, bem como os problemas ou perdas de oportunidades que podem ser associados ao fato de não se ter (ou não se usar) adequadamente a informação disponível. A metodologia geral proposta tem sido a de construção e busca de relações entre múltiplos indicadores representativos dos recursos informacionais aplicados, produtos e serviços disponibilizados, uso real e potencial desses produtos e serviços, consequências e benefícios associados, dentro de um domínio caracterizado de análise.

Outra abordagem, vinculada à área de Gestão e Tecnologia da Informação, busca definir as relações entre tecnologia e sistemas da informação e a competitividade empresarial (MORESI, 2000, RICHARDS *et al.*, 2001, BEAL, 2004, GÜNTHER, 1998). A demanda por esses estudos tem aumentado proporcionalmente ao volume das despesas em informática e pressão crescente dos acionistas por justificativas racionais de investimento. Dentro dessa linha, busca-se analisar valor da informação como uma função do contexto da organização, da finalidade de sua utilização, dos processos decisórios envolvidos e dos resultados alcançados. Uma idéia corrente defendida é a de que a gestão da informação deve possuir cunho

estratégico, que favoreça, portanto, a formulação, execução e avaliação das estratégias organizacionais e contribua para a consecução dos objetivos estabelecidos. A análise de valor da informação nessa abordagem focaliza a identificação de seus benefícios não só em termos de eficiência operacional, mas também de vantagem estratégica competitiva. GÜNTHER (1998) e RICHARDS *et al.* (2001) focalizam sua análise sobre os chamados sistemas de informações ambientais e discutem as tecnologias disponíveis, as motivações, os usos e benefícios vinculados ao processamento das informações ambientais, tanto no setor público quanto no privado.

Uma terceira abordagem do problema advém da área de Economia e Finanças e tem sido denominada de Ativos Intangíveis (LEV, 2001, HAND e LEV, 2003, UPTON JR., 2001). A informação ganha identidade nas organizações na forma dos chamados ativos de informação, os quais são componentes de uma classe particular de ativos denominada de intangíveis. A avaliação e gestão desses ativos têm despertado interesse crescente entre empresários e investidores, devido à importância que representa na competitividade das empresas dentro da nova economia. Para LEV (2001), riqueza e crescimento na economia atual são dirigidos principalmente pelos ativos intangíveis ou intelectuais. Segundo UPTON JR. (2001), ativos intangíveis são fontes não físicas de benefício futuro provável para a organização, que podem ter sido adquiridos ou desenvolvidos internamente, que possuem vida finita e valor de mercado, de propriedade ou sob controle da organização. Dessa forma, são considerados ativos intangíveis de informação os programas, ambientes computacionais, *softwares*, sistemas de informação, bancos de dados, domínios de internet, etc. Diversas abordagens têm sido propostas para a avaliação e gestão dos ativos intangíveis. Um dos campos de investigação é a construção de métricas não financeiras, voltadas tanto à gestão interna dos ativos, quanto à comunicação externa do desempenho. Esse foi o caminho adotado por abordagens tais como o *Balanced Scorecard*, a Skandia AFS, Karl-Erik Sveiby e o Movimento Sueco, *The Value Chain Scoreboard* e o *The Value Creation Index* (VCI). Outro campo de pesquisa é o desenvolvimento de medidas financeiras para valoração dos ativos intangíveis, o que permite a sua inclusão nos balanços das empresas. Nesse campo, destacam-se as seguintes mensurações baseadas em: (1) custos; (2) valor justo de mercado do ativo (*Fair Value*); (3) valor em uso (*Value-In-Use*), entendido como o valor presente dos fluxos estimados futuros de caixa; e (4) conceito de opções do mercado financeiro (*Real Options*) (UPTON JR., 2001).

Uma perspectiva consolidada utilizada em estudos de valor da informação é baseada na Teoria da Decisão desenvolvida nas Ciências da Administração

(LAWRENCE, 1999, MERKHOFFER, 1987, BENJAMIN e CORNELL, 1970, KAST e ROSENZWEIG, 1976). Essa abordagem possui como unidade de análise o processo de tomada de decisão e avalia o valor da informação conforme seu impacto nesse processo. Devido ao fato de um grande contingente de processos e atividades poder ser enquadrado no modelo geral de tomada de decisão, a aplicação dessa teoria tem sido intensa nos problemas de valor da informação em múltiplos contextos disciplinares, entre os quais a meteorologia e o meio ambiente. Segundo MERKHOFFER (1987), existem três teorias distintas, internamente consistentes, de estudo do processo de tomada de decisão: (1) do custo versus benefício; (2) da decisão; e (3) da escolha social. A premissa básica da teoria de custo versus benefício é que as alternativas devem ser selecionadas de acordo com uma comparação sistemática das vantagens (benefícios) e desvantagens (custos), as quais resultam das conseqüências estimadas da escolha. Essa teoria identifica a melhor alternativa em termos de um critério de eficiência econômica, incorpora o conceito de disposição a pagar para valorar as conseqüências das ações e está focada na maximização do valor agregado de bens e serviços consumidos pelos indivíduos. Sua visão da incerteza advém da caracterização objetiva do ambiente. A segunda, a teoria da decisão, busca descrever como os indivíduos devem tomar decisões em face da incerteza, sustentando que as escolhas logicamente dependem das probabilidades das conseqüências das decisões e da utilidade dessas conseqüências para o tomador de decisão. A idéia central é a da utilidade esperada, cujo valor máximo define a alternativa preferida. Modernamente, a teoria da decisão incorpora forte visão subjetiva, a ser expressa matematicamente na definição das probabilidades e da função utilidade. Ela está focada na tomada de decisão individual, busca atingir consistência nessas decisões e é fortemente orientada a resultados. A terceira, a teoria da escolha social, incorpora a perspectiva de que o critério apropriado para decisão social não é a preferência de alguns simples tomadores de decisão, mas antes, uma síntese racional de preferências de todos os indivíduos que são afetados pela decisão (MERKHOFFER, 1987). Por um lado, teóricos dessa última linha buscam desenvolver maneiras de agregação das preferências individuais em uma função utilidade social; por outro, pesquisadores têm analisado mecanismos pelos quais decisões em grupo podem ser alcançadas diretamente por meio do processo, sem explicitamente desenvolver uma função utilidade grupal. Essa última teoria, baseada nos axiomas da escolha social e princípios da economia do bem-estar, busca reproduzir a preferência social, derivada da síntese eqüitativa das preferências das partes envolvidas.

Focada sobre as relações entre as ciências atmosféricas e a sociedade, uma nova área multidisciplinar de estudos denominada Aspectos Sociais do Tempo busca investigar os benefícios potenciais e reais que podem ser associados ao desenvolvimento científico e tecnológico da meteorologia (PIELKE JR., 1997, WMO, 1990a, WMO, 1990b, WMO, 2007a, KATZ e MURPHY, 1997a). Essa abordagem tem focado, entre outras questões, no estudo do valor da informação do tempo e do clima em múltiplos contextos e setores, cujo desenvolvimento tem sido considerado vital à continuidade do avanço da meteorologia, frente às mudanças em curso do modelo de financiamento público da ciência e às crescentes reduções orçamentárias governamentais (PIELKE JR., 1997). No desafio de mensurar o valor da informação meteorológica, essa área aproveita opções metodológicas desenvolvidas nos campos da Economia e da Teoria de Decisão. Essas opções metodológicas, investigadas em KAST e MURPHY (1997a), WMO (1990a, 1990b e 2007a), MACAULEY (1997 e 2005), DOSWELL III e BROOKS (1998), STEWART (1997b) e GUNASEKERA (2004) podem ser resumidas nos cinco tipos seguintes: (1) os estudos de caso, que correspondem a investigações intensivas, normalmente realizadas *ex-post* à ocorrência de fenômenos significativos, nos quais, comumente, não se estabelecem as relações causais entre a informação disponível e os benefícios auferidos; (2) as pesquisas de usuário, também conhecidas como avaliações contingenciais, que visam levantar o valor percebido da informação, uma estimativa do valor atribuído à informação, que o usuário estaria disposto a pagar no caso de existência de um mercado; (3) os estudos descritivos, realizados *ex-ante*, que visam identificar o valor real da informação, baseado no comportamento concreto e atual do tomador de decisão; (4) os estudos prescritivos ou normativos, realizados *ex-ante*, que visam identificar o valor ótimo da informação, baseado na construção de modelos analíticos de decisão, estáticos ou dinâmicos, onde o valor da informação é determinado de maneira a maximizar uma função utilidade e (5) os estudos de mercado, que buscam identificar o valor da informação a partir de pesquisa de preços, normalmente utilizando-se de medidas indiretas de valores relacionados às informações de interesse ou por meio de estudos mais sofisticados, baseados na teoria hedônica de preços, onde se utilizam medidas alternativas de capitalização para estimar valores tais como, os dos recursos naturais, de bens e informações de domínio público.

Conforme apresentado, todas essas perspectivas teóricas não são excludentes e utilizam comumente referências cruzadas. De acordo com o objetivo da análise, podem ser utilizadas em conjunto para avaliar em profundidade os múltiplos aspectos do valor da informação. Considerando-se que o contexto de análise de interesse do trabalho abrange o nível organizacional e individual e, frente à possibilidade de

entendimento ampliado das relações de acesso, assimilação e uso da informação via estudo dos processos decisórios sensíveis, optou-se por explorar em maior profundidade a perspectiva das Ciências da Administração, que tem sido objeto de constante análise nos Aspectos Sociais do Tempo. Nesse sentido, o valor da informação hidrometeorológica deve ser analisado sob a perspectiva dos impactos que produzem nos processos de tomada de decisão que ocorrem ao nível das organizações e indivíduos potencialmente afetados pelo tempo, clima ou recursos hídricos. O estudo de valor apresentado no capítulo 7, relativo ao problema das inundações urbanas, abrange decisões no contexto selecionado e envolvem o nível organizacional, das instituições públicas municipais e de defesa civil, e o nível individual, dos responsáveis por domicílios potencialmente afetados pelo fenômeno.

3.2 Fatores gerais condicionantes do valor da informação

Tanto o desenvolvimento de uma estratégia de gestão da informação, quanto a iniciativa de estimar o seu valor em um determinado contexto, precisam incorporar em seu projeto um conjunto de fatores condicionantes que afeta a agregação de valor nos processos de acesso, assimilação e uso da informação. Alguns desses fatores são discutidos a seguir.

MOODY e WALSH (1999) cunharam um conjunto de sete leis que subsidia o entendimento do valor dos ativos de informação. Esse conjunto de leis pode ser assim resumido: (1) a informação é infinitamente compartilhável, não há consumo no processo de uso da informação; (2) o valor da informação aumenta com o uso, sofre do efeito de rede, no qual não há depreciação pelo uso; (3) o valor da informação decresce com o tempo; (4) o valor da informação aumenta com a precisão; (5) o valor da informação aumenta com a integração, pois permite uma visão sistêmica dos processos; (6) quantidade excessiva de informação reduz o seu valor e (7) informação é autogerativa, sendo dotada da propriedade de multiplicação por operações de síntese, análise e combinação. Essas leis são considerações gerais sobre o valor dos ativos de informação, cuja validade deve ser questionada caso a caso.

COELHO NETTO (2001) discute as relações entre repertório e audiência, originalidade e previsibilidade, inteligibilidade e entropia na determinação do valor da informação. Segundo ele, baseado na teoria da informação, valor da informação, na medida da mudança comportamental que deseja provocar, guarda relação direta com a extensão do repertório, mas inversa com o tamanho da audiência, o que limita as mudanças potenciais associadas. Da mesma forma, a informação guarda relação direta com a originalidade e inversa com a previsibilidade, o que pode ameaçar a

mudança pretendida, normalmente restritiva ao novo. Também, o aumento da inteligibilidade da informação é obtido via aumento da redundância para combater a entropia (medida da desordem introduzida em uma estrutura informacional), mas a redundância reduz o potencial de mudança via aumento da previsibilidade. “No campo da informação impõe-se assim, como se pode perceber, uma constante dialética entre opostos, único caminho para a obtenção dos resultados visados” (COELHO NETTO, 2001, p. 131). Um desafio da gestão da informação é encontrar os pontos ótimos de ajuste para as características acima.

Segundo SHAPIRO e VARIAN (2003), a estrutura de custos do provedor de informações não é usual. A produção de bens de informação envolve altos custos fixos, mas baixos custos marginais. O custo de produção da primeira cópia de um bem de informação pode ser substancial, mas o custo de produção (ou reprodução) de cópias adicionais pode ser negligenciável. Dessa forma, a estratégia de definir preço em função dos custos não funciona. Segundo os autores, o preço de bens de informação deve se basear no valor atribuído pelos consumidores. Outra questão levantada por SHAPIRO e VARIAN (2003) é a idéia de que a informação é um bem de experiência, ou seja, os consumidores devem experimentá-la para avaliar o seu valor. Essa visão impõe estratégias de comercialização da informação baseadas em experimentação prévia, reforço da marca e reputação do provedor. Eles ainda realçam a idéia de que, em uma economia da atenção, onde segundo Herbert Simon, a riqueza da informação criou a pobreza da atenção, o valor real produzido por um provedor de informação vem de localizar, filtrar e comunicar o que é útil para o consumidor.

Defendendo a necessidade de um enfoque estratégico para a gestão da informação nas organizações, BEAL (2004) aponta que a informação constitui-se para a organização em: (1) fator de atenção e consciência sobre ameaças e oportunidades; (2) fator de planejamento, servindo como insumo e veículo de sua disseminação; (3) fator de apoio à tomada de decisão; (4) fator de produção, no sentido em que pode agregar valor e qualidade aos produtos e processos; (5) fator de sinergia, favorecendo o intercâmbio de idéias e opiniões entre indivíduos e unidades organizacionais; e (6) fator determinante do comportamento, influenciando comportamentos externos e internos favoráveis às estratégias organizacionais. Segundo BEAL (2004), a estratégia de gestão da informação deve equilibrar os investimentos entre tecnologia, pessoas e processos para ampliar o valor do ambiente informacional e reforçar o uso eficiente e eficaz da informação.

LAWRENCE (1999) reconhece dois estágios distintos da informação, os quais foram denominados de informação estatística e informação pragmática. Segundo ele, informação estatística está focada na transformação cognitiva do conhecimento, que

afeta a distribuição de probabilidade percebida sobre os estados da natureza. Ela precisa ser nova e compreensível e integra as atividades de monitoramento por informação, em antecipação a problemas potenciais de decisão futura. Informação pragmática está focada no impacto potencial que a informação estatística provoca na seleção da decisão e nos resultados em um problema decisório específico. Ela requer referência a um problema e tomador de decisão determinados. Essa diferenciação separa atributos próprios da informação estatística, como coerência, formato, acurácia, de outros, próprios da informação pragmática, como relevância, completeza e disponibilidade. Coerente com a discussão sobre a concepção de informação e seus processos de incorporação, LAWRENCE (1999) propõe um modelo para contabilizar ganhos e custos de um sistema de informações, no qual se reconhece os processos de acesso, cognição e aplicação, e aponta como única fonte de valor da informação sua aplicação final pelo usuário na tomada de decisão. Esse modelo é apresentado na Figura 3.1.

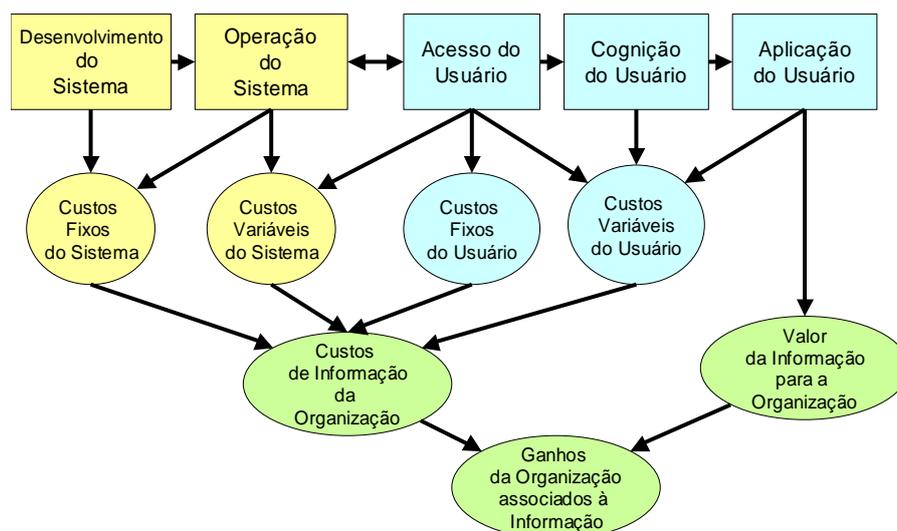


Figura 3.1: Modelo para contabilização de ganhos e custos de um sistema de informações, que reconhece como única fonte de valor a aplicação final da informação pelo usuário

Extraída de LAWRENCE, 1999, p. 12.

Sobre incertezas no processo decisório, CECEZ-KECMANOVIC (1983), comenta que a tomada de decisão pode envolver múltiplas incertezas conforme sua origem, as quais ele denominou incerteza estrutural, relacional, de execução, de objetivo e dos estados da natureza. Segundo sua interpretação, incerteza estrutural está relacionada à determinação do conjunto de alternativas de ação disponíveis; incerteza relacional está vinculada à identificação dos resultados prováveis associados a essas ações; incerteza de execução está relacionada à determinação das probabilidades

associadas aos múltiplos resultados após a execução de uma ação; incerteza de objetivo advém da indefinição quanto a desejos e objetivos e sua relação com o binômio ação – resultado; e incerteza dos estados da natureza está associado ao desconhecimento quanto aos estados futuros possíveis e suas probabilidades de ocorrência. Dentro desse contexto, o papel da informação é incrementar o conhecimento sobre a situação da decisão, de forma a reduzir essas diferentes incertezas, que deterioram o desempenho do processo. O valor da informação pode ser mensurado pela mudança que promove no desempenho do tomador de decisão.

3.3 Fatores específicos condicionantes do valor da informação hidrometeorológica

Pela sua caracterização particular, a informação hidrometeorológica impõe alguns condicionantes tanto para a sua gestão quanto para a estimativa de seu valor. Apesar de alguns autores focarem as discussões sobre as informações meteorológicas, os condicionantes apresentados são extensivos às informações hidrometeorológicas.

Um primeiro condicionante advém da própria configuração da informação hidrometeorológica enquanto caracterizadora do estado do meio ambiente, no que concerne à atmosfera e os recursos hídricos. Nesse sentido, o valor da informação pode ser investigado sob duas perspectivas: (1) a informação como insumo fundamental para o gerenciamento direto dos recursos naturais água e ar, bem como suas conexões para a gestão ambiental integrada ou (2) a informação como fator condicionante da decisão, em contextos ou processos produtivos ou sociais sensíveis ao tempo, clima ou recursos hídricos. Essa dualidade de perspectivas não impede que, em um dado contexto de análise, um dos processos investigados seja a própria gestão ambiental, na qual a informação hidrometeorológica traduzirá os impactos, condicionará a decisão e comunicará os resultados em termos de mudanças no estado do meio ambiente.

Segundo JOHNSON e HOLT (1997), dados e previsões de tempo são produzidos em larga extensão pelo setor público e feito disponível em custos altamente subsidiados para os seus usuários, o que os caracteriza como bens públicos. Dessa forma, segundo eles, para prover racionalidade econômica ao sistema provedor dessas informações, deve-se demonstrar que a taxa de retorno, ou de benefícios relativos aos custos, é consistente com alternativas concorrentes de investimentos dos recursos públicos. Eles alertam para a necessidade de se utilizar

nesses cálculos custos e benefícios sob uma perspectiva abrangente e social, e não fragmentada, privada ou individual.

Outro condicionante tratado por JOHNSON e HOLT (1997) é o fato de que a informação meteorológica é mercadoria considerada não rival e, em larga extensão, não exclusiva, o que prejudica as abordagens baseadas no mercado para estimar o seu valor. Isto significa que dois ou mais consumidores podem simultaneamente utilizar a mesma unidade de informação meteorológica (não rivalidade) e não é possível, em geral, prevenir que certos grupos ou indivíduos utilizem a informação meteorológica disponível (não exclusividade). Essas propriedades implicam em que o equilíbrio de mercado não seja ótimo, pois as externalidades econômicas da informação meteorológica não são incorporadas no processo decisório individual.

As características de sustentação pública e de mercado imaturo agregam à informação hidrometeorológica um caráter de não apropriação, que segundo MACAULEY (1997), deriva do fato de que o uso da informação por uma pessoa não diminui a utilidade da informação para outra (sua utilidade não é apropriada). Outra questão tratada por ele é o caráter estratégico que pode ser agregado às informações meteorológicas, situação na qual o seu valor é representado pela ação antecipada que possibilita ao usuário. Nesse sentido, o acesso exclusivo pode ser incompatível com a sustentação pública e o acesso irrestrito pode anular o benefício generalizado (em alguns casos, se todos sabem, a informação não tem valor). Da discussão dessas características, MACAULEY (1997) conclui que informações desse tipo são bens públicos e devem ser providos pelo governo, como as relativas ao censo, ao tempo, ao clima, ao meio ambiente, etc., sendo difícil saber se os benefícios justificam os custos.

A caracterização particular das informações hidrometeorológicas impõe ao estudo de valor múltiplos desafios identificados nos trabalhos de CHANGNON (2003), DOSWELL III e BROOKS (1998), KAST e MURPHY (1997a), MACAULEY (1997 e 2005), WMO (1990a e 1990b). Um primeiro desafio é a crônica indisponibilidade e a baixa qualidade dos dados de impacto dos eventos e informações hidrometeorológicas nos diversos setores produtivos e sociais, o que impede o desenvolvimento ou fragiliza os resultados dos estudos de valor da informação. Outro desafio importante é o caráter multidisciplinar dos problemas de valor da informação, que pode exigir domínio e experiência ao longo de diversas áreas temáticas, das ciências comportamentais e econômicas, ciências atmosféricas e ambientais, a disciplinas correlatas aos processos decisórios impactados. A necessidade de desenvolvimento de um modelo representativo dos processos decisórios sensíveis, que explicita a relação entre informação e utilidade, exige comumente trabalho cooperativo extensivo entre os pesquisadores e tomadores de decisão. Outro desafio é a necessidade de delimitação

clara do escopo do projeto de estudo do valor, estabelecendo-se o contexto de análise, as variáveis hidrometeorológicas relevantes, os processos decisórios impactados e a abrangência temporal e espacial de avaliação dos benefícios, custos e resultados. A definição frágil do escopo tem sido responsável por aumentos de custos, prazos e insucessos dos projetos. Outros desafios destacados pelos autores abrangem: (1) a agregação dos valores associados a distintos processos de decisão para a geração de uma medida do valor da informação representativa de um contexto mais geral; (2) a escolha da informação mínima de referência, em relação a qual será avaliada a melhoria do resultado do processo decisório; e (3) as maneiras de incluir na função utilidade a aversão ao risco do tomador de decisão, como forma de ajustá-la mais fielmente à realidade.

4 A INFORMAÇÃO E SEU IMPACTO NO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO

4.1 Aspectos comportamentais do processo de tomada de decisão nas organizações

O processo de tomada de decisão (PTD) é eminentemente humano e o seu grau de objetividade varia conforme o tipo de decisão envolvida. A análise das organizações humanas sob o enfoque sistêmico permite reconhecer a existência de três subsistemas principais que as compõem: (1) o institucional ou de relacionamento com o ambiente; (2) o organizacional ou de coordenação; e (3) o técnico ou operacional. Assim, verifica-se uma maior concentração de decisões objetivas, com características analíticas, algorítmicas e programáveis no subsistema técnico, que diminuem no subsistema organizacional e são muito limitadas no subsistema institucional, onde predominam decisões mais subjetivas, com características intuitivas, heurísticas e realizadas por julgamento (KAST e ROSENZWEIG, 1976). O crescente ritmo de automação elimina atividades rotineiras e agrega capacidade de processamento e análise. Processos totalmente automatizados são casos particulares de PTDs programáveis e constituem exceções de tratamento facilitado. Tomando como exemplo o setor elétrico, um caso de PTD no subsistema técnico é a determinação do volume de espera do reservatório de uma usina hidroelétrica; no subsistema organizacional, é a composição de equipes de supervisão e atendimento a falhas na rede de distribuição; e no subsistema institucional, é a determinação de uma estratégia para negociar com o órgão regulador os índices de qualidade do fornecimento de energia.

Uma abordagem recente das ciências comportamentais, apresentada em KERSTEN *et al.* (2000), combina distintos níveis de racionalização com as fases do PTD identificadas por SIMON (1977) para criar um novo modelo do processo decisório. Segundo esse modelo, a solução de problemas e racionalização das decisões é articulada em três níveis: (1) o nível de valores e necessidades, que contém a hierarquia que interpreta o mundo e provê racionalidade; (2) o nível

cognitivo, onde o modelo do mundo é mantido e as necessidades avaliadas frente às oportunidades e ameaças; e (3) o nível de ferramenta e cálculo, que abrange os instrumentos utilizados para visualizar, computar, comparar, analisar e avaliar elementos do problema. Esses níveis são articulados e afetam cada fase do processo: (1) a inteligência, onde o problema é entendido e seus pressupostos são estabelecidos; (2) o projeto, onde a exploração das alternativas e conseqüências é realizada; e (3) a escolha, onde se faz a seleção das decisões e verificações posteriores (KERSTEN *et al.*, 2000). Outros autores, como MERKHOFFER (1987), identificam essas três fases do processo como as de formulação, análise e solução do problema. Abordagens alternativas, que contemplam maior número de fases e realimentação entre as mesmas, são discutidas em MINTZBERG *et al.* (1976), GOMES *et al.* (2002) e BAZERMAN (2004).

Normalmente, o recebimento de novas informações estimula o início do PTD, para o desenvolvimento do qual se busca agregar mais informações para conseguir articular e alimentar os três níveis de racionalização que se fazem presentes em cada fase do processo. Nesse sentido, inicialmente, o impacto da informação no PTD deve ser avaliado em sua capacidade de estimular o processo e criar consciência do problema. Deve também ser avaliado em sua capacidade de agregar valor para cada nível de racionalização em cada fase do PTD. Assim, a informação pode estimular o reconhecimento de necessidades e valores subjacentes, pode subsidiar a avaliação de oportunidades e ameaças e pode alimentar ferramentas e cálculos de apoio visando a definição do problema, a exploração de alternativas e conseqüências e a seleção e verificação da decisão.

Da combinação das abordagens de KERSTEN *et al.* (2000) e KAST e ROSENZWEIG (1976), pode-se afirmar que: (1) quanto mais objetivo, analítico, algorítmico e programável o problema (predominante no subsistema técnico), maior a proeminência do nível de cálculo e mais fechada é a definição do problema e a exploração de alternativas e conseqüências; (2) quanto mais subjetivo, intuitivo, heurístico e baseado em julgamento o problema (predominante nos subsistemas organizacional e institucional), maior a proeminência dos níveis de valores e cognição e mais aberta é a definição do problema e exploração de alternativas e conseqüências. As informações são fundamentais em ambos os casos, mais específicas e detalhadas no primeiro, mais gerais e agregadas no segundo. O volume e diversidade das informações requeridas crescem com a abertura do problema e os novos cenários de turbulência e competição no ambiente das organizações tendem a forçar a abertura dos problemas e valorizar as informações. A Figura 4.1 resume os requerimentos de informação conforme a natureza do PTD.

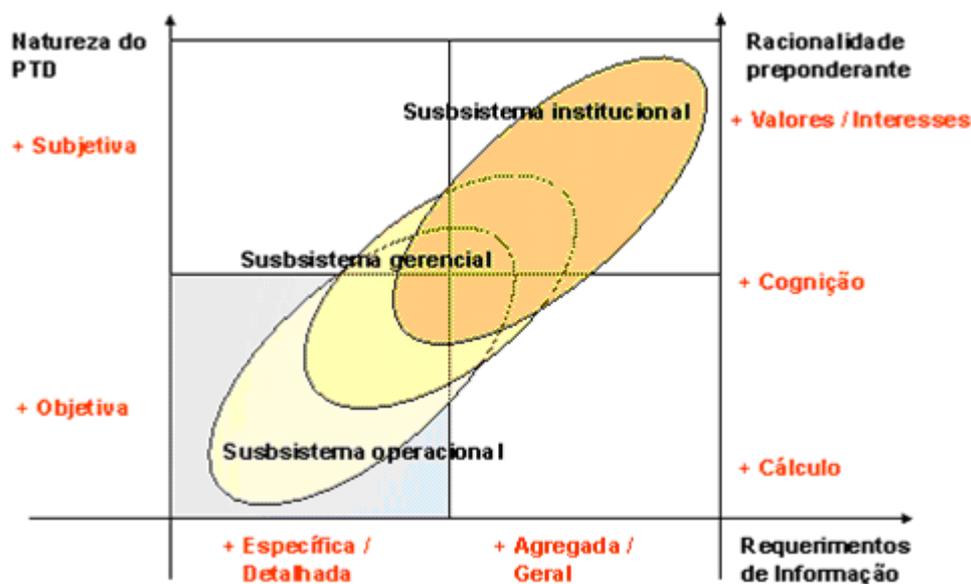


Figura 4.1: Requerimentos de informação conforme a natureza do processo de tomada de decisão (PTD), racionalidade preponderante e o subsistema da organização considerado

A caracterização específica do PTD que é alvo de análise condicionará a abordagem metodológica de avaliação do valor da informação. Assim, de acordo com a perspectiva escolhida, uma abordagem de avaliação do valor da informação, tendo como contexto de análise a organização, deve incluir o reconhecimento, a avaliação e a agregação dos impactos múltiplos da informação em cada PTD significativamente sensível àquele tipo de informação, nos seus subsistemas técnico, organizacional e institucional.

No caso das informações hidrometeorológicas, o reconhecimento acima pode ser dividido em dois esforços complementares. O primeiro consiste em identificar na organização alvo de análise o conjunto dos PTDs que são sensíveis ao estado da atmosfera ou dos recursos hídricos, aqui denominados PTDs-S, ou seja, aqueles nos quais mudanças no estado desses recursos naturais afetam, de alguma forma, o resultado do PTD. O segundo esforço consiste em identificar, entre os PTDs-S, um subconjunto dos PTDs que são sensíveis às informações hidrometeorológicas, denominados PTDs-SI, ou seja, aqueles em que informações históricas, do presente ou do futuro sobre o estado da atmosfera ou recursos hídricos podem afetar, de alguma forma, o resultado do PTD. Exemplos de iniciativas nessa direção são os trabalhos de LEITE et al. (2002) e LEITE e MORO (2004), focados sobre o setor elétrico.

A questão subsequente deve concentrar-se na exploração das formas como a informação afeta os PTDs-SI. Modelos têm sido desenvolvidos para analisar a sensibilidade e medir os resultados do PTD frente à incorporação de informação. A concepção de esquemas gerais de aplicação direta é difícil frente ao caráter subjetivo normalmente manifesto em algum grau nos PTDs e à diversidade de situações de análise.

4.2 Modelo analítico simplificado do processo de tomada de decisão

Identificados os PTDs-SI relevantes, o desafio é, para cada um deles, desenvolver, calibrar e avaliar um modelo representativo do processo de tomada de decisão que permita estabelecer relação entre a informação hidrometeorológica, outras informações relevantes, alternativas de ação possíveis e conseqüências potenciais associadas. Conforme comentado, a abordagem metodológica adequada, que permita o desenvolvimento desse modelo, depende fortemente da caracterização do PTD em análise. Para PTDs mais objetivos, de forte caracterização analítica, tem-se utilizado, como abordagem do problema, dentro da perspectiva escolhida das Ciências da Administração, a teoria bayesiana de decisão, que associa o valor da informação à melhoria que provoca ao resultado do PTD sob condições de incerteza. Nessa abordagem, conforme discutido por JOHNSON e HOLT (1997), o PTD pode ser estruturado a partir da identificação dos seguintes componentes: (1) um estado atual do mundo, que abrange o estado da atmosfera e dos recursos hídricos; (2) um conjunto prévio de alternativas de ação viáveis nesse estado a_i ; (3) um conjunto de estados futuros possíveis do mundo e_j ; (4) uma função conseqüência $c(a_i, e_j)$ associada a cada combinação de alternativa de ação versus estado futuro; e (5) uma função utilidade associada à função conseqüência $u[c(a_i, e_j)]$. Segundo esse modelo, se uma variável de estado é importante para o PTD, o tomador de decisão desenvolve uma probabilidade subjetiva sobre a ocorrência de cada estado futuro p_j . O objetivo do tomador de decisão nesse modelo é maximizar o valor esperado da função utilidade. Assim:

$$E_0 = \max_{a_i} \sum_j \{p_j u[c(a_i, e_j)]\} \quad (\text{sem informação}) \quad (4.1a)$$

$$E_k = \max_{a_i} \sum_j \{q_{k,j} u[c(a_i, e_j)]\} \quad (\text{com informação}) \quad (4.1b)$$

e o valor da informação VI_k , posterior ao recebimento da mensagem k , é dado por:

$$VI_k = E_k - E_0 \quad (4.2)$$

onde:

E_0 - resultado esperado do PTD com o uso das probabilidades subjetivas iniciais p_j ; e

E_k - resultado esperado do PTD com o uso das probabilidades revisadas $q_{k,j}$, estimadas a partir do recebimento da mensagem k .

O papel da informação hidrometeorológica nesse modelo, além da caracterização do estado atual e do conjunto viável de alternativas de ação, é permitir uma revisão das probabilidades subjetivas sobre os estados futuros. Assim, em vez de utilizar p_j , obtendo o resultado E_0 , o tomador de decisão utiliza $q_{k,j}$, obtendo E_k . O valor da informação VI_k , condicional à mensagem recebida mas anterior à realização do estado, é obtido pela diferença entre ambos os valores esperados da função utilidade. O valor da informação anterior ao recebimento de qualquer mensagem, conhecido como valor da fonte de informação, é dado por:

$$VI = \sum_k r_k E_k - E_0 \quad (4.3)$$

onde r_k é a probabilidade de recebimento da mensagem k . Esse último valor pode então ser comparado com os custos fixos e variáveis de acesso, assimilação e uso da informação pelo usuário, para se obter o ganho (ou perda) incremental relativo à incorporação da informação no PTD.

Esse modelo analisado impõe ao PTD, além da caracterização prévia de um número finito de estados atual e futuro e de alternativas de ação, a existência de funções consequência e utilidade conhecidas e válidas no futuro, o reconhecimento das probabilidades iniciais ou anteriores e a estimação das probabilidades revisadas ou posteriores, fruto da incorporação das informações. Apesar de suas limitações, esse modelo tem sido utilizado nos estudos de valor das previsões meteorológicas e climáticas para múltiplos setores, conforme literatura da área de Aspectos Sociais do Tempo.

4.3 Modelo bayesiano ampliado do processo de tomada de decisão

LAWRENCE (1999) tem investigado modelos mais abrangentes de PTDs e conseqüentes valores que podem ser associados à incorporação de informações. Ele discute um conjunto de medidas de valor da informação que pode, conforme o PTD sob análise, contribuir para um entendimento amplificado das relações entre informação, resultado e utilidade. Segundo ele, para problemas de decisão em que o resultado é quantificável e mensurável em unidades monetárias, o nível final de riqueza total é freqüentemente o objetivo mais próprio para o tomador de decisão e esse deve ser tratado como uma variável aleatória, dependente da riqueza inicial, das ações e estados da natureza. Por sua vez, a função utilidade do tomador de decisão é

uma função objetivo mais geral que a riqueza final ou resultado. Essa função, conforme definida por Von Neumann-Morgenstern, indica a preferência do tomador de decisão por somas alternativas de dinheiro e incorpora suas atitudes em relação ao risco.

Assim, segundo LAWRENCE (1999), as seguintes relações são estabelecidas:

$$W = \omega(w, x, a) \quad (4.4a)$$

$$u(W) = u(\omega(w, x, a)) \quad (4.4b)$$

onde W é o nível de riqueza final quando o tomador de decisão com riqueza inicial w escolhe a ação $a \in \mathbf{a}$ e o estado $x \in \mathbf{X}$ ocorre, enquanto $u(.)$ é a função utilidade aplicada sobre a riqueza final.

O problema decisório \mathbf{D} passa a compreender os seguintes elementos:

$$\mathbf{D} = \langle \mathbf{a}, \mathbf{X}, \omega, u, w, \mathbf{I}, \mathbf{C}(\mathbf{I}) \rangle \quad (4.5)$$

onde:

- \mathbf{a} - espaço de alternativas de ação;
- \mathbf{X} - espaço dos possíveis estados da natureza;
- $\omega(.)$ - função resultado definida no espaço $\mathbf{W} \times \mathbf{X} \times \mathbf{a}$, que corresponde ao nível de riqueza final;
- \mathbf{W} - conjunto de riquezas potenciais;
- $u(.)$ - função utilidade do tomador de decisão;
- w - riqueza inicial;
- \mathbf{I} - informação disponível acerca das variáveis aleatórias do problema; e
- $\mathbf{C}(\mathbf{I})$ - função de custo da informação.

A estrutura de informação disponível para o tomador de decisão \mathbf{I} é dada pelo conjunto:

$$\mathbf{I} = \{\mathbf{Y}, p(x, y)\} \quad (4.6)$$

onde \mathbf{Y} é o espaço de mensagens potenciais e $p(x, y)$ a distribuição de probabilidade conjunta do estado da natureza x e da mensagem relativa ao estado y .

Em problemas de decisão que não envolvem a incorporação de informação, denominados decisões sob incerteza, o único conhecimento disponível é a própria probabilidade a priori $p(x)$ definida em \mathbf{X} . Essa situação de mínima informação inicial, representada por $\mathbf{I} \downarrow$, é definida pelo conjunto:

$$\mathbf{I} \downarrow = \{p(x)\} \quad (4.7)$$

Uma primeira medida do valor incremental da informação incorporada em um processo de tomada de decisão é denominada incremento de utilidade e representa o acréscimo na utilidade esperada do tomador de decisão devido ao aumento informacional do PTD. Esse valor é dado por:

$$\hat{V}_I^u = U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I}) - U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I} \downarrow) \quad (4.8a)$$

ou

$$\hat{V}_I^u = E_y \max_a E_{x|y} u(\omega(w, x, a)) - \max_a E_x u(\omega(w, x, a)) \quad (4.8b)$$

onde:

- \hat{V}_I^u - valor de incremento de utilidade de uma estrutura de informação \mathbf{I} , dado u ;
- $U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I})$ - utilidade esperada da decisão \mathbf{D} após a otimização, dado uma estrutura de informação \mathbf{I} ;
- $U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I} \downarrow)$ - utilidade esperada da decisão \mathbf{D} após a otimização, dado uma estrutura de informação nula; e
- E - operador de valor esperado.

Conforme observado por LAWRENCE (1999), essa medida possui algumas deficiências práticas que podem ser minimizadas. O principal problema aparece quando o tomador de decisão não é neutro em relação ao risco, o que torna esse valor expresso em utilidades e não em unidades monetárias.

A medida mais comumente utilizada para avaliar os benefícios pragmáticos de incorporar uma estrutura de informação \mathbf{I} corresponde ao seu preço de demanda, também denominada valor de demanda, disposição a pagar ($WTP=Willig-to-Pay$) ou variação de compensação. Seu valor é aquele que torna verdadeira a seguinte identidade:

$$U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I}, V_I^u) = U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I} \downarrow) \quad (4.9a)$$

ou

$$E_y \max_a E_{x|y} u(\omega(w - V_I^u, x, a)) = \max_a E_x u(\omega(w, x, a)) \quad (4.9b)$$

onde:

- V_I^u - valor de demanda de uma estrutura de informação \mathbf{I} , dado u ;
- $U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I}, V_I^u)$ - utilidade esperada da decisão \mathbf{D} após a otimização, dado uma estrutura de informação \mathbf{I} , da qual se reduziu V_I^u da riqueza inicial do tomador de decisão; e
- $U(\mathbf{D}^* | \mathbf{I} \downarrow)$ - utilidade esperada da decisão \mathbf{D} após a otimização, dado uma estrutura de informação nula.

Da equação (4.9b) pode-se deduzir que o preço de demanda representa o quanto é possível reduzir da riqueza inicial de forma a manter sua utilidade equivalente àquela da decisão não informada. Segundo LAWRENCE (1999), o preço de demanda de uma informação é o custo máximo não estocástico que um tomador de decisão

está disposto a pagar para se mover de uma decisão não informada para uma decisão informada.

Uma medida final do valor da informação é aquela conhecida por valor de oferta, alternativamente denominada preço de oferta, disposição a aceitar (*WTA=Willing-to-Accept*) ou variação equivalente. Seu valor é aquele que torna verdadeira a seguinte identidade:

$$E_y \max_a E_{x|y} u(\omega(w, x, a)) = \max_a E_x u(\omega(w + \tilde{V}_I^u, x, a)) \quad (4.10)$$

onde \tilde{V}_I^u é o valor de oferta de uma estrutura de informação **I**, dado u .

Alternativamente, o valor de oferta representa o quanto é necessário acrescentar à riqueza inicial para manter a sua utilidade equivalente àquela da decisão informada. Segundo LAWRENCE (1999), se o tomador de decisão possui uma estrutura de informação, o valor de oferta é o montante mínimo que ele estaria disposto a aceitar para renunciar o seu uso.

É possível demonstrar que em uma situação simplificada, no qual se tem neutralidade ao risco e riqueza inicial não estocástica, as três medidas de valor da informação equivalem-se e podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$W = w + \pi(x, a) \quad (4.11a)$$

$$V_I^N = E_y \max_a E_{x|y} \pi(x, a) - \max_a E_x \pi(x, a) \quad (4.11b)$$

onde:

V_I^N - valor de uma estrutura de informação **I** para um tomador de decisão neutro em relação ao risco; e

$\pi(x, a)$ - função resultado.

Nessa situação simplificada, se o valor da informação é maior que o custo de seu acesso, assimilação e uso, o tomador de decisão deve incorporar a informação em seu PTD, tornando a decisão informada.

Esse modelo bayesiano ampliado, apresentado por LAWRENCE (1999), de conotação fortemente econômica, possui como mérito principal o tratamento da função resultado e de sua utilidade como funções objetivo gerais. Essa abordagem possibilita a expressão do resultado em termos do nível final de riqueza total, além da forma clássica aditiva de riqueza inicial mais ganhos, bem como o tratamento diferenciado em relação ao risco do tomador de decisão, além do caso mais comum de neutralidade. A aplicação do modelo gera múltiplos valores da informação (incremento de utilidade, valor de demanda e valor de oferta), cuja análise conjunta enriquece o entendimento do problema. Como se poderia esperar, concernente à sofisticação do modelo, cresce também a demanda por levantamentos e pesquisas, capazes de

reconhecer e expressar, para o caso em estudo, o comportamento da riqueza e utilidade do tomador de decisão, quando impactado pela incorporação de novas informações. Como suporte, LAWRENCE (1999) apresenta uma coleção de modelos de interpretação e avaliação convenientes para expressão da riqueza e utilidade, mas sua seleção e aplicação a um caso concreto normalmente não são imediatas e exigem esforço de adaptação.

4.4 Modelo bayesiano *fuzzy* do processo de tomada de decisão

A teoria dos conjuntos nebulosos (*fuzzy set theory*) abrange meios de representar matematicamente as incertezas associadas a situações vagas ou imprecisas presentes em um problema à mão. Segundo ROSS (1995), essas incertezas podem ter origem devido à complexidade do problema, ignorância, falta de informação ou carências de medição de elementos particulares do problema. Diferentemente dos processos aleatórios, nos quais realizações particulares são estritamente questões do acaso, modeladas pela teoria das probabilidades, essas incertezas não aleatórias impossibilitam tratamento adequado por meio dessa teoria. Conforme discutido por ROSS (1995), os processos de decisão clássicos estatísticos envolvem a noção de que a incerteza sobre o futuro pode ser caracterizada probabilisticamente. O modelo bayesiano *fuzzy* incorpora, além dessa incerteza probabilística, ambigüidade a respeito da informação nova, dos estados da natureza e das alternativas de ação do PTD.

Sejam consideradas inicialmente as seguintes variáveis: $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, $i=1, n$ é o conjunto dos possíveis estados da natureza; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, $j=1, m$ é o conjunto das alternativas de ação; $X = \{x_1, x_2, \dots, x_r\}$, $k=1, r$ é o conjunto de novas informações; $P = \{p(s_1), p(s_2), \dots, p(s_n)\}$ é o conjunto de probabilidades associadas aos estados da natureza ou probabilidades a priori; $p(x_k/s_i)$ é a probabilidade condicional da nova informação x_k dado o estado s_i ; e u_{ji} é a função utilidade associada ao par alternativa de ação – estado a_j-s_i .

Assim, pela teoria bayesiana já discutida, o valor do conjunto de informação X $V(x)$ é dado por:

$$V(x) = E(u_x^*) - E(u^*) \quad (4.12a)$$

$$E(u^*) = \max_j E(u_j) = \max_j \sum_{i=1}^n u_{ji} p(s_i) \quad (4.12b)$$

$$E(u_x^*) = \sum_{k=1}^r E(u^* | x_k) p(x_k) = \sum_{k=1}^r \left[\max_j E(u_j | x_k) \right] p(x_k) \quad (4.12c)$$

onde

$$E(u_j | x_k) = \sum_{i=1}^n u_{ji} p(s_i | x_k) = \sum_{i=1}^n u_{ji} \frac{p(x_k | s_i)}{p(x_k)} p(s_i)$$

$$p(x_k) = \sum_{i=1}^n p(x_k | s_i) \cdot p(s_i)$$

e o valor da informação perfeita $V(x_p)$ é dado por:

$$V(x_p) = E(u_{x_p}^*) - E(u^*) \quad (4.13)$$

onde

$$E(u_{x_p}^*) = \sum_{k=1}^r E(u_{x_p}^* | x_k) p(x_k) = \sum_{k=1}^r [\max_j \sum_{i=1}^n u_{ji} p(s_i | x_k)] p(x_k)$$

nos quais $p(s_i | x_k) = 1$ ou 0 , conforme o caso da informação x_k validar ou refugar o estado futuro s_i e $E(\cdot)$ é o operador de valor esperado.

Seja agora considerada a introdução de informação nova *fuzzy* através dos eventos \underline{M} com função de pertinência $\mu_{\underline{M}}(x_k)$, $k = 1, 2, \dots, r$ e probabilidade de ocorrência $p(\underline{M}) = \sum_{k=1}^r \mu_{\underline{M}}(x_k) p(x_k)$, onde é válida a condição de os eventos \underline{M}

constituírem um sistema de informações *fuzzy* ortogonal. Assim:

$$\Phi = \{\underline{M}_1, \underline{M}_2, \dots, \underline{M}_g\} \quad (4.14a)$$

$$\sum_{t=1}^g \mu_{\underline{M}_t}(x_k) = 1 \quad \text{para } k = 1, 2, \dots, r \quad (4.14b)$$

Dentro dessas considerações, o valor da informação *fuzzy* pode ser determinado de maneira análoga ao caso clássico:

$$V(\Phi) = E(u_{\Phi}^*) - E(u^*) \quad (4.15)$$

onde

$$E(u_{\Phi}^*) = \sum_{t=1}^g E(u^* | \underline{M}_t) p(\underline{M}_t) = \sum_{t=1}^g \left[\max_j E(u_j | \underline{M}_t) \right] p(\underline{M}_t)$$

$$E(u_j | \underline{M}_t) = \sum_{i=1}^n u_{ji} p(s_i | \underline{M}_t) = \sum_{i=1}^n u_{ji} \left[\frac{\sum_{k=1}^r p(x_k | s_i) \mu_{\underline{M}_t}(x_k) p(s_i)}{p(\underline{M}_t)} \right]$$

Considere-se agora uma extensão do caso anterior, onde serão incluídas as possibilidades de que os estados da natureza e as alternativas de ação sejam também eventos *fuzzy*, denominados respectivamente de \underline{F} e \underline{A} , com a condição de que os eventos representativos dos estados da natureza constituem um sistema ortogonal

($\sum_{s=1}^q \mu_{\underline{F}_s}(s_i) = 1$ para $i = 1, 2, \dots, n$). Previamente devem ser identificadas as utilidades

relativas aos pares ação *fuzzy* – estado *fuzzy* $u_{js} = u(\underline{A}_j, \underline{F}_s)$. De acordo com essas

novas considerações, o valor da informação *fuzzy* $V(\Phi)$ passa a ser determinado da seguinte forma:

$$V(\Phi) = E(u_{\Phi}^*) - E(u^*) \quad (4.16)$$

onde

$$E(u^*) = \max_j E(u_j) = \max_j \sum_{s=1}^q u_{js} p(\underline{F}_s) = \max_j \sum_{s=1}^q u_{js} \left[\sum_{i=1}^n \mu_{\underline{F}_s}(s_i) p(s_i) \right]$$

$$E(u_{\Phi}^*) = \sum_{t=1}^g E(u_{\underline{M}_t}^*) p(\underline{M}_t) = \sum_{t=1}^g \left[\max_j E(u_j | \underline{M}_t) \right] p(\underline{M}_t)$$

$$E(u_j | \underline{M}_t) = \sum_{s=1}^q u_{js} p(\underline{F}_s | \underline{M}_t)$$

$$p(\underline{F}_s | \underline{M}_t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^r \mu_{\underline{F}_s}(s_i) \mu_{\underline{M}_t}(x_k) p(x_k | s_i) p(s_i)}{p(\underline{M}_t)}$$

e o valor da informação perfeita *fuzzy* $V(\Phi_p)$ é dado por:

$$V(\Phi_p) = E(u_{\Phi_p}^*) - E(u^*) \quad (4.17)$$

onde

$$E(u_{\Phi_p}^*) = \sum_{s=1}^q u(\underline{A}_{\underline{F}_s}^* | \underline{F}_s) p(\underline{F}_s) = \sum_{s=1}^q \left[\max_j u(\underline{A}_j, \underline{F}_s) \right] p(\underline{F}_s)$$

Acerca da posição relativa entre os diversos valores da informação, ROSS (1995) cita Tanaka *et al.*, segundo os quais é válida a seguinte relação: $V(\Phi_p) \geq V(x_p) \geq V(x) \geq V(\Phi) \geq 0$. Essa relação é consistente com o fato de que a informação Φ é caracterizada pela incerteza e aleatoriedade, conseqüentemente agregando menor valor que a informação x . Também a informação perfeita x_p , mesmo conhecendo os estados verdadeiros da natureza s_i , mantém a incerteza presente nos estados *fuzzy* \underline{F} , o que reduz o seu valor em relação à Φ_p .

Sobre a abordagem *fuzzy* da teoria bayesiana, ROSS (1995, p. 352) conclui que “normalmente as utilidades para todos os estados e todas as alternativas não podem ser formuladas devido à insuficiência de dados, aos altos custos para obter essas informações e restrições de tempo (...) Assim, uma abordagem que possa ser baseada em estados *fuzzy* e alternativas *fuzzy* e que possa acomodar informação *fuzzy* é uma ferramenta poderosa para tomar decisões preliminares de políticas de ação”.

A despeito das potencialidades levantadas por ROSS (1995) quanto ao emprego do modelo bayesiano *fuzzy* em problemas decisórios, agrega-se a necessidade de levantamento das funções de pertinência concernentes, conforme o caso, às informações novas, aos estados da natureza, às alternativas de ação e a outras

variáveis ou parâmetros do problema considerados ambíguos. Também se introduz a obrigatoriedade da ortogonalidade para os conjuntos de estados e informações *fuzzy*, o que pode não corresponder ao levantamento empreendido. Segundo ROSS (1995), para essa investigação existe um conjunto de métodos que pode ser utilizado para atribuição de valores ou funções às variáveis *fuzzy*, métodos esses em número superior àqueles existentes para assinalar funções de densidade de probabilidade para variáveis aleatórias. Esses métodos abrangem o uso da intuição, da inferência, do ordenamento de preferência, da racionalização indutiva, bem como técnicas mais sofisticadas como redes neurais e algoritmos genéticos. Uma questão fundamental que permanece subjacente ao uso de qualquer modelo, é a necessidade de reconhecimento da natureza e fonte das incertezas presentes no problema em mão e seleção da ferramenta mais adequada para o seu tratamento e análise, de acordo com o escopo e objetivos pretendidos. Paralelamente à sua coerência interna, uma metodologia torna-se aplicável e útil na medida em que favorece a captura dos elementos da realidade que se deseja representar.

5 MODELAGEM DE DECISÃO APLICADA A PROBLEMAS DE VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA

5.1 Modelagem canônica dos processos de tomada de decisão sensíveis à previsão meteorológica

O modelo mais largamente utilizado na representação dos PTDs sensíveis às previsões de tempo e clima é o denominado razão custo / perda (*cost-loss ratio*), conforme apresentado por MURPHY e EHRENDORFER (1987). Esse modelo simplifica o PTD, limitando o tomador de decisão a duas alternativas de ação: tomar ação preventiva de custo C , o que elimina a perda L , caso determinado evento meteorológico futuro ocorra; ou, não tomar a ação preventiva e incorrer na perda L , caso o evento futuro ocorra. O objetivo para o tomador de decisão é minimizar o valor esperado das despesas totais envolvidas no processo. A informação em análise é a previsão meteorológica binária do evento referido, que possui um conjunto de probabilidades condicionais, dado a ocorrência ou não do evento, que determinam sua qualidade. Considerando-se a probabilidade climatológica de ocorrência do evento $p=P[\text{evento}=1]$, as probabilidades condicionais $p_{11}=P[\text{evento}=1|\text{previsão}=1]$ e $p_{10}=P[\text{evento}=1|\text{previsão}=0]$ e as probabilidades marginais $\pi_1=P[\text{previsão}=1]$ e $\pi_0=P[\text{previsão}=0]$, pela aplicação da teoria bayesiana de decisão, discutida para o caso geral no item 4.2, tem-se que:

$$EC = \min(C, pL) \quad (5.1a)$$

$$EF = \pi_1 \min(C, p_{11}L) + \pi_0 \min(C, p_{10}L) \quad (5.1b)$$

$$EP = pC \quad (5.1c)$$

onde:

EC - resultado esperado com o uso da informação climatológica;

EF - resultado esperado com o uso da informação de previsão (imperfeita); e

EP - resultado esperado com o uso da informação perfeita.

O valor da informação pode ser derivado da seguinte forma:

$$VF = EC - EF \quad (5.2a)$$

$$VP = EC - EP \quad (5.2b)$$

onde:

VF - valor da informação imperfeita; e

VP - valor da informação perfeita.

KATZ e MURPHY (1997b) avançaram na análise do modelo razão custo / perda ao expressar o valor da informação em função da qualidade da previsão. Segundo eles, com base em alguns pressupostos e simplificações, como a idéia de confiabilidade geral (*overall reliability*), onde:

$$\pi_1 = p \quad (5.3a)$$

$$\pi_0 = 1 - p \quad (5.3b)$$

$$p_{10} = (1 - p_{11})p / (1 - p) \quad (5.3c)$$

é possível reduzir o conjunto de parâmetros de qualidade da previsão a somente uma das suas probabilidades condicionais, por exemplo, p_{11} e considerando que $0 < p \leq C/L$, chega-se a seguinte expressão para o valor da informação $VF(q)$, como uma função da qualidade da previsão q (expressão análoga se sustenta para o caso alternativo em que $C/L < p < 1$):

$$VF(q) = \begin{cases} p\{[p + (1-p)q]L - C\} & \text{para } q^* < q \leq 1 \\ 0 & \text{para } q \leq q^* \end{cases} \quad (5.4)$$

onde

$$q = (p_{11} - p) / (1 - p) \quad (5.5a)$$

$$q^* = (C/L - p) / (1 - p) \quad (5.5b)$$

Apesar de suas limitações intrínsecas, esse modelo revela uma relação entre o valor da informação VF e um indicador da qualidade da previsão q . A função $VF(q)$ mostra que existe um limite para a qualidade da previsão q^* , abaixo do qual o seu valor é nulo, além do formato convexo de sua curva (a função derivada é não decrescente). Estudos mais sofisticados, que consideram situações dinâmicas (múltiplos estágios de decisão em cascata) em horizontes finitos e infinitos, continuam a confirmar o formato convexo da função VF , mostrando um crescimento do valor da previsão a taxas cada vez maiores quando se aproxima da informação perfeita ($q=p_{11}=1$) (KATZ e MURPHY, 1997b). Por outro lado, a revisão de simplificações e a investigação de outros índices de qualidade da previsão mostram que o atributo qualidade possui natureza multidimensional (não pode ser representado não ambigualmente por um único escalar) e indicadores simples de acurácia (*Brier score*, por exemplo) levam a

existência de um envelope que abriga relações de um para muitos em ambos os sentidos (da acurácia para o valor e vice-versa) (MURPHY e EHRENDORFER, 1987). Estudos sobre a forma desses envelopes vêm sendo desenvolvidos, inclusive para previsões por conjuntos e modelos mais gerais da razão custo / perda (RICHARDSON, 2000 e 2001, ZHU *et al.*, 2002). Outra abordagem de estudo da relação entre qualidade e valor vem sendo desenvolvida com base na teoria da suficiência estatística, onde se busca derivar medidas de qualidade que, sob condições específicas conhecidas, guardam relação direta com o valor utilitário bayesiano. Exemplo de estudo nessa linha é o de KRZYSZTOFOWICZ (1992), o qual mostrou que o módulo do coeficiente de correlação de Pearson ordena conjuntos de previsões pelo seu valor, desde que a distribuição da variável de interesse seja normal e a função de verossimilhança entre previsão e observação possa ser aproximada por um modelo linear-normal.

Além de seu potencial de utilização em múltiplas situações, esses estudos baseados em modelos da razão custo / perda têm permitido investigar a sensibilidade do valor da previsão em relação à qualidade da informação. Os resultados principais indicam a necessidade de as agências meteorológicas calcularem e explicitarem múltiplos indicadores de qualidade para serem avaliados quanto à sua relação com o valor da informação em cada caso particular de interesse, além de desmistificarem a idéia corrente de que quanto maior a acurácia da previsão, maior, necessariamente, é o seu valor. Nas situações reais, o conceito de qualidade vai além de indicadores de acurácia ou exatidão da previsão, compreendendo também atributos de disponibilidade, pontualidade, acessibilidade, adequabilidade ao uso, entre outros. Todos atuam em conjunto na determinação do valor da informação. O formato convexo que tem sido encontrado nas relações entre valor e medidas de qualidade, considerando-se que ainda se está distante de uma previsão meteorológica perfeita (especialmente para previsões climáticas), mostra que grandes investimentos podem ser necessários para se melhorar a qualidade, com reflexos diretos proporcionalmente menores em seu valor. Essa situação realça a importância dos estudos de valor para motivar o maior aproveitamento do atual potencial de uso e garantir a continuidade dos investimentos para melhoria da qualidade das previsões meteorológicas.

5.2 Extensões e generalizações da modelagem canônica

Diversos níveis de extensão e algumas generalizações têm sido propostas para incrementar a aplicabilidade da modelagem canônica do tipo razão custo / perda a projetos específicos de estudo do valor da informação hidrometeorológica.

Uma primeira extensão foi proposta por MURPHY (1976), que abrange a possibilidade da ação de proteção poder eliminar ou apenas reduzir a perda associada à ocorrência de evento meteorológico adverso. Ele mostra que nesses casos a regra de decisão depende somente da razão entre o custo de proteção e a porção da perda que pode ser reduzida com a ação de proteção. Outra extensão na mesma direção foi proposta por BRIGGS (2005), que introduz parcela de custo ou pagamento para se ter acesso à previsão especializada, que é devida independentemente da ocorrência de evento adverso futuro e de sua previsão. Ele propõe o cálculo de um índice de valor generalizado, com incorporação do custo da informação, e apresenta teste estatístico formal que deve acompanhar análises baseadas nesse índice.

Uma extensão mais significativa foi proposta por MURPHY e YE (1990), que apresenta uma versão do modelo razão custo / perda dependente do tempo. Essa versão contempla a possibilidade do tomador de decisão postergar a decisão de proteção em vista a obter previsões mais acuradas em algum tempo mais tarde (menor horizonte de previsão), reconhecendo que o custo de proteção crescerá com o decréscimo do horizonte de previsão. A versão do modelo decisório apresentada, que considera constante a perda associada à ocorrência do evento meteorológico adverso, permite a investigação do valor da informação e do tempo de decisão ótimo em múltiplas situações, contemplando formas gerais e específicas das funções de acurácia e de custos de proteção em relação ao horizonte de previsão.

Uma primeira generalização do modelo razão custo / perda proposta por MURPHY (1985) envolve a configuração do processo decisório considerando a existência de n graus de evento adverso e disponibilidade de n níveis de ação de proteção. Nesse modelo, o resultado, em termos da combinação de custos e perdas, aumenta linearmente e uniformemente (ou permanece constante) quando o nível de proteção diminui e o grau de evento adverso aumenta, o que permite a derivação de expressões analíticas para o valor da informação dependentes somente da razão custo / perda, das probabilidades climatológicas e posteriores do evento, dada a previsão, e da dimensão do problema n . MURPHY (1985) discute também possíveis extensões desse modelo, como alterações na relação entre resultados e grau de evento adverso ou nível de proteção, introdução da aversão ao risco e a utilização de previsões probabilísticas, rompendo a restrição de existência de somente n possíveis previsões.

Modelos decisórios dinâmicos baseados na forma canônica são também discutidos por KATZ e MURPHY (1997b). Essas generalizações são consideradas dinâmicas, antes que estáticas, dentro da perspectiva de que ações presentes e passadas e suas conseqüências econômicas influenciam ações e conseqüências

futuras. Nesse sentido, o objetivo pode ser otimizar o resultado em uma seqüência de decisões, estabelecida em um horizonte finito ou infinito de tempo. Essas classes de problemas, denominadas de horizonte finito ou infinito, podem ainda incorporar considerações econômicas sobre diferenças entre valores futuros e presentes, estimadas a partir da introdução de uma taxa de retorno ou desconto, dando origem a modelos ditos descontados. Para KATZ e MURPHY (1997b), a determinação da seqüência ótima de decisão nessas classes de problemas envolve a derivação de equações recursivas tratadas comumente a partir de uma abordagem metodológica denominada programação dinâmica estocástica. Segundo eles, a equação recursiva para o valor esperado mínimo da despesa total associada à previsão imperfeita $E_n(q)$ em um problema dinâmico de horizonte finito não descontado é dada por:

$$E_n(q) = p \min\{C + E_{n-1}(q), p_{11}L + (1 - p_{11})E_{n-1}(q)\} \\ + (1 - p) \min\{C + E_{n-1}(q), p_{10}L + (1 - p_{10})E_{n-1}(q)\} \quad (5.6)$$

onde:

- n - número de decisões;
- q - qualidade da previsão;
- p_{11} e p_{10} - probabilidades condicionais de ocorrência do evento dado a previsão de evento e de não evento;
- p - probabilidade climatológica do evento;
- C - custo da medida de proteção; e
- L - perda associada à ocorrência do evento adverso.

As probabilidades condicionais p_{11} e p_{10} podem ser expressas como uma função da qualidade da previsão q , através das equações (5.3c) e (5.5a). Para o caso de um problema dinâmico considerado infinito e descontado, a equação recursiva do valor esperado da despesa descontada associada à previsão imperfeita $E(q)$ é dada por:

$$E(q) = p \min\{C + \alpha E(q), p_{11}L + (1 - p_{11})\alpha E(q)\} \\ + (1 - p) \min\{C + \alpha E(q), p_{10}L + (1 - p_{10})\alpha E(q)\} \quad (5.7)$$

onde α é a taxa de retorno ou desconto e q é a qualidade da previsão.

Essas formas generalizadas dinâmicas baseadas nos modelos razão custo / perda ou em funções utilidade mais gerais têm sido utilizadas em problemas que exigem otimização de seqüências de decisões em determinado período de tempo, os quais são comumente encontrados na programação agrícola, na gestão de reservatórios e no planejamento energético.

5.3 Outros modelos de decisão de avaliação e interpretação convenientes

Embora os modelos de decisão do tipo razão custo / perda venham dominando os estudos de valor da informação hidrometeorológica, outros modelos simplificados de avaliação e interpretação convenientes podem representar processos decisórios sensíveis à informação hidrometeorológica.

De maneira geral, os modelos decisórios são afetados pela estrutura econômica do resultado e pela preferência pessoal do tomador de decisão em relação ao risco. Conforme discutido por LAWRENCE (1999) e apresentado no item 4.3, os casos mais convenientes são aqueles em que a riqueza inicial é não estocástica, o resultado final pode ser expresso em termos de uma riqueza inicial mais ganhos e o tomador de decisão é neutro em relação ao risco. Essas condições tornam iguais os valores da informação conhecidos como incremento de utilidade, preço de oferta e preço de demanda. Enquadrados nessa situação, LAWRENCE (1999) apresenta modelos de função resultado linear em relação a uma variável de estado contínua, nos quais somente o valor esperado da variável é relevante para a escolha entre as ações disponíveis. Esse tipo de modelo é largamente utilizado em problemas de determinação de estoques em vista a uma demanda aleatória por determinado produto. Também modelos de função resultado quadrática e côncava nas ações representam situações de tratamento conveniente. Nesses casos, a regra de seleção da decisão ótima é linear em função do valor esperado da variável de estado. LAWRENCE (1999) identifica aplicabilidade dessa classe de modelos em problemas de decisão de produção em que o lucro estocástico é também quadrático ou na solução de conflito entre rapidez e acurácia em relação a informações que afetem a produção. KRZYSZTOFOWICZ (1983c) faz uso de um modelo de decisão quadrático para investigar o valor da informação associado à seleção das decisões ótima e sub-ótima nos casos de previsões categóricas e probabilísticas da variável de estado.

Para os casos de problemas onde a neutralidade do tomador de decisão em relação risco não pode ser considerada, LAWRENCE (1999) discute a conveniência de modelos com função utilidade do tipo exponencial côncava, com resultados separáveis e não separáveis entre riqueza inicial e ganhos, e apresenta como exemplos aplicações em problemas de investimentos e apostas. Também exemplos de modelos dinâmicos com variáveis de estado categorizadas são apresentados, nos quais se discute o impacto dos atrasos de observação e implementação no valor da informação.

MORGAN e HENRION (1990) investigam uma série de tipos de modelos de decisão, buscando estabelecer condições, nas quais a incorporação das incertezas

sobre a variável de estado influencia a seleção da decisão ótima e, conseqüentemente, o valor da informação. Os tipos analisados por eles envolveram: (1) função de perda linear com espaço de decisão discreto, de uso generalizado; (2) a função quadrática para variáveis de estado e decisão, comumente utilizada na estimação de parâmetros contínuos; (3) a função cúbica do tipo J , usual em problemas de decisão de planejamento de capacidades em infra-estrutura; (4) a função bi-linear com descontinuidade, comum em decisões de reposição de estoques e tamanho de plantas industriais; e (5) a função catástrofe, cujo forte degrau de perdas está comumente relacionado a problemas de projeto de elementos estruturais, cuja ruptura resulta em danos extremos. Processos de tomada de decisão sensíveis à informação hidrometeorológica admitem comumente formulação baseada nos tipos analisados por MORGAN e HENRION (1990). A sensibilidade desses tipos de modelos à incorporação das incertezas e as conseqüências para a modelagem de problemas de valor da informação hidrometeorológica são discutidas a seguir.

5.4 Relevância do tratamento e comunicação das incertezas para uso em modelos de decisão

As informações hidrometeorológicas em geral, conforme tratadas no item 2.4, e as previsões em particular, não são capazes de expressar, com toda a extensão e fidelidade, o estado atual e o comportamento futuro da atmosfera e dos recursos hídricos (WILKS, 1995, YEVJEVICH, 1974, WMO, 2007b). Nesse sentido, as informações climatológicas e de monitoramento incluem as incertezas provenientes dos processos imperfeitos de mensuração e estimação, enquanto as previsões, baseadas em modelos preditivos de natureza objetiva ou subjetiva, incorporam as incertezas de propagação de erros, de compreensão e de representação dos fenômenos naturais.

WILKS (1995) apresenta duas razões para a permanente incerteza presente nas previsões meteorológicas: o uso de modelos matemáticos, que não são capazes de representar completamente a física que governa o comportamento futuro da atmosfera e o problema denominado caos dinâmico, que foi identificado por Lorenz e está relacionado à sensibilidade de sistemas dinâmicos não lineares às suas condições iniciais. Como a atmosfera exibe esse comportamento caótico e não pode ser completamente observada, essa incerteza inicial é propagada em seus estágios futuros e contamina a previsão. Conforme observado por Zeng *et al.*, citado em WILKS (1995, p. 4), “assim como a relatividade eliminou a ilusão newtoniana de tempo e espaço absoluto, e a teoria quântica eliminou o sonho newtoniano e einsteiniano de

processo de mensuração controlável, o caos elimina a fantasia laplaciana de previsibilidade determinística do tempo”.

YEVJEVICH (1974) analisa os processos naturais determinantes do comportamento hidrológico e os classifica como essencialmente aleatórios. Segundo ele, a previsão hidrológica, mesmo concebida na forma de um modelo determinístico, incorpora necessariamente variáveis aleatórias e, portanto, possui geralmente um resultado também aleatório. Em sua análise, YEVJEVICH (1974) identifica o domínio da abordagem determinística nos estudos hidrológicos, que evoluiu de uma fase de descoberta de periodicidades para uma fase de busca da melhor função resposta. Ele também mostra os problemas advindos de seu emprego generalizado e defende uma abordagem combinada, determinística e estocástica, no estudo e previsão hidrológicos.

Reconhecendo as limitações inerentes às previsões meteorológicas e climáticas, a Organização Meteorológica Mundial elaborou declaração oficial, código EC-LIV 2002, sobre as bases científicas que fundamentam o processo de elaboração dessas previsões e das incertezas presentes em cada componente do processo, envolvendo a observação e assimilação de dados, a compreensão da atmosfera, a previsão e disseminação das informações (WMO, 2007b). Essa declaração realça as características caóticas e não lineares da atmosfera e a existência de fenômenos físicos não totalmente entendidos e representados nos modelos numéricos de previsão. O resultado é que “a incerteza sempre existe – mesmo em nosso conhecimento sobre o estado corrente da atmosfera. Ela cresce caoticamente no tempo, sendo que muito das novas informações introduzidas no início não mais agrega valor, até somente a informação climatológica permanecer” (WMO, 2007b, p. 210).

As fontes potenciais de incertezas em processos gerais de aplicação de modelos foram analisadas por MORGAN e HENRION (1990). Esses autores identificaram as seguintes fontes: (1) variação estatística, comumente relacionada a erros aleatórios nos processos de mensuração direta de variáveis de interesse; (2) julgamento subjetivo, inevitavelmente presente na concepção e aplicação de modelos e na eliminação de erros sistemáticos dos processos de mensuração; (3) imprecisão lingüística, que exige a busca de especificação clara dos eventos e variáveis tratados nos modelos; (4) variabilidade natural das variáveis de interesse, que necessitam ser representadas pela distribuição de probabilidade de suas populações; (5) aleatoriedade inerente e não previsibilidade de certas variáveis, que devem ser reconhecidas como não redutíveis em princípio; (6) desacordo entre especialistas a respeito de abordagens adequadas ou variáveis não mensuráveis diretamente; e (7)

aproximações, conscientemente introduzidas nos modelos em sua representação da realidade. KRZYSZTOFOWICZ (1999) analisou as incertezas na previsão hidrológica e agregou-as em três classes categorizadas como operacional, de entrada e hidrológica. A incerteza operacional abrange dados faltantes ou errados, erros humanos de processamento e intervenções imprevistas; a incerteza de entrada refere-se à aleatoriedade das variáveis que alimentam os modelos de previsão e a hidrológica incorpora as demais incertezas presentes nos modelos, parâmetros, estimações e erros de mensuração. Dentro do contexto discutido, pode-se afirmar que as informações hidrometeorológicas exibem limites de qualidade e previsibilidade, e que esses limites são impostos por questões de natureza teórica, tecnológica e financeira (KRZYSZTOFOWICZ, 2001).

Essa noção de incerteza, inerentemente presente nas informações hidrometeorológicas, deve ser traduzida, dentro de uma concepção pragmática, no verdadeiro papel que essas informações podem desempenhar: o de reduzir, e não eliminar, as incertezas sobre o estado atual e futuro da atmosfera e dos recursos hídricos. Essa concepção afasta a ilusão da certeza, introduzida pelo formato dominante de previsão determinística. Segundo KRZYSZTOFOWICZ (2001), esse formato força o previsor a suprimir informação e julgamento acerca da incerteza e pode criar na mente do usuário a ilusão da certeza, a qual pode, em muitos casos, levá-lo a decisões sub-ótimas. Conforme se discutiu nos modelos de decisão, a incerteza não só deve ser reconhecida como incorporada no modelo decisório com vistas a maximizar o valor esperado da utilidade, o que é realizado por meio de sua expressão em termos de uma distribuição de probabilidades dos estados futuros. Isto é condizente com os princípios da racionalidade bayesiana, citados por KRZYSZTOFOWICZ (1999), que estabelece: (1) a incerteza deve ser quantificada em termos de uma distribuição de probabilidades; e (2) as decisões devem ser tomadas com base nessa distribuição de probabilidades antes que sobre o valor de face das estimativas.

Uma análise aprofundada das situações onde se torna mais relevante o tratamento explícito das incertezas foi realizada por MORGAN e HENRION (1990). Segundo eles, essas situações críticas abrangem os casos em que: (1) o tomador de decisão tem significativa aversão ao risco; (2) o modelo utiliza dados e informações incertas de diversas fontes; (3) decisão sobre comprar informação adicional para reduzir incerteza deve ser considerada; (4) a função resultado é muito assimétrica em relação a alguma variável de interesse; (5) algumas variáveis do problema têm distribuição de probabilidades muito assimétrica; (6) o exame da incerteza de determinada variável pode mudar a avaliação sobre a sua melhor estimativa; (7)

considerações sobre incertezas podem ser utilizadas como guia para refinamento do modelo; (8) existe a necessidade de avaliar a confiabilidade da análise para subsidiar o tomador de decisão no balanço entre diferentes abordagens; e (9) o estudo precisa demonstrar responsabilidade ética, sendo explícito acerca de suas limitações.

A análise dos casos em que o tratamento das incertezas afeta ou não a seleção da decisão merece especial atenção. A partir da aproximação pela série de Taylor da função de perdas ou resultado, MORGAN e HENRION (1990) caracterizam essas situações.

Assim:

$$y - y^0 = \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^0) \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]_{X^0} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - x_i^0)(x_j - x_j^0) \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right]_{X^0} + \dots \quad (5.8)$$

$$E[y - y^0] \approx \sum_{i=1}^n E[x_i - x_i^0] \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]_{X^0} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E[(x_i - x_i^0)(x_j - x_j^0)] \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right]_{X^0}$$

onde:

$X = (x_1, \dots, x_n)$ - vetor de variáveis de entrada;

$y = f(X)$ - função de perdas;

X^0 - vetor nominal de entrada; e

$y^0 = f(X^0)$ - valor da função de perdas correspondente ao vetor nominal.

Se para todo $i=1$ a n , $x_i^0 = E[x_i]$, então $E[x_i - x_i^0] = 0$ e a expressão do valor esperado da diferença $y - y^0$ torna-se:

$$E[y - y^0] \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \text{cov}[x_i, x_j] \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \right]_{X^0} \quad (5.9)$$

onde $\text{cov}[x_i, x_j]$ é a covariância entre x_i e x_j .

Dessa forma, quando a função de perdas é linear, ou em outras situações em que a derivada segunda da função de perdas é próxima de zero, o valor esperado $E[y]$ é igual ou muito próximo ao valor da função correspondente ao valor esperado de entrada $y^0 = f(X^0)$. A incorporação da incerteza não altera o valor esperado da função de perda para longe de seu valor nominal y^0 , com base no qual é realizada a seleção da decisão. Um caso clássico analisado por MORGAN e HENRION (1990) refere-se ao uso da função de perdas quadrática. Essa função, do tipo $k(d - x)^2$, $k > 0$, na qual a decisão que a minimiza d é igual ao valor esperado da variável de entrada x , também não possui decisão afetada pelo tratamento das incertezas. O fato da seleção

da decisão não ser afetada não elimina os demais benefícios indiretos citados, vinculados ao tratamento explícito das incertezas.

Não obstante às situações apresentadas, em muitos outros casos também analisados por MORGAN e HENRION (1990), que envolvem funções de perdas com assimetrias, o efeito da incorporação das incertezas foi significativo e alterou a seleção das decisões ótimas. Esses casos abrangeram a função cúbica, a função bi-linear com descontinuidade e a função tipo catástrofe. Para medir esse efeito, MORGAN e HENRION (1990) definiram uma medida denominada Valor Esperado de Inclusão da Incerteza, calculada pela diferença, em termos de perdas, entre a decisão ótima ignorando a incerteza e a decisão ótima bayesiana, e aplicaram-na sobre os casos citados. Os resultados demonstraram que, para algumas situações, a perda por ignorar a incerteza pode ser muito maior que a perda devido à própria incerteza, ou seja, incorporar a incerteza pode ser muito mais importante do que obter mais informação para reduzi-la.

Os PTDs sensíveis às informações hidrometeorológicas abrangem comumente descontinuidades e fortes assimetrias na função resultado, em especial aqueles relacionados aos eventos extremos, constituindo-se em processos decisórios potencialmente impactados com a incorporação das incertezas. Em diversos usos levantados, é possível identificar um ou mais valores críticos, a partir dos quais o resultado é diferentemente afetado, gerando descontinuidades ou degraus, similares aos estudados por MORGAN e HENRION (1990). Assim, por exemplo, pode-se verificar que o alerta de inundação em áreas urbanas (KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS, 1983a e 1983b), bem como a gestão de reservatórios para múltiplos usos (TEEGAVARAPU e SIMONOVIC, 1999) são casos de funções de perdas descontínuas, onde o tratamento das incertezas possui grande potencial para afetar a seleção da decisão ótima e o seu resultado final.

Para fomentar o processo decisório bayesiano é necessário estimular o tomador de decisão no sentido da derivação da distribuição posterior de probabilidades sobre o estado futuro que lhe afeta, por meio do processamento e comunicação das incertezas das informações a serem utilizadas. Essas incertezas podem ser identificadas e comunicadas em um esforço específico próprio, de atualização periódica conforme o caso, ou serem incorporadas no próprio processo de geração e disseminação de informações, dando origem às chamadas previsões probabilísticas. Para o primeiro caso, podem ser combinados ou não estudos para a análise e propagação das incertezas em modelos preditivos (MORGAN e HENRION, 1990), com processos de verificação climatológica das informações (MURPHY e WINKLER, 1987, JOLLIFFE e STEPHENSON, 2003, WILKS, 1995), revelando aspectos estruturais ou históricos das

incertezas. No caso da geração de 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 (KRZYSZTOFOWICZ, 2001). Um aspecto fundamental das previsões probabilísticas 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 vantagens em relação ao caso anterior e contribuir com ganhos adicionais no resultado, conforme a sensibilidade do processo decisório. As previsões probabilísticas têm sido geradas a partir de diversos métodos analíticos, numéricos ou mistos, com base em três perspectivas: (1) foco na incerteza histórica identificada por meio de verificação estatística; (2) foco na incerteza futura identificada por simulação em modelos preditivos de múltiplos cenários determinísticos e (3) foco na incerteza estrutural, que propaga e combina as incertezas passadas e futuras, comumente com processadores do tipo bayesiano. Relação de autores que utilizaram métodos de geração de previsões baseados nas perspectivas (1) e (2) é apresentada por JOLLIFFE e STEPHENSON (2003, p. 137). As denominadas previsões por conjunto (*ensemble forecasts*), originadas da aplicação da perspectiva (2), têm sido amplamente utilizadas na área da meteorologia. Exemplos de métodos baseados na perspectiva (3) compreendem os apresentados por KRZYSZTOFOWICZ (1999 e 2002), para previsão hidrológica de nível, e por BERROCAL *et al.* (2007), para previsão de temperaturas.

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 (KRZYSZTOFOWICZ, 1998 e 2001).

Especificamente sobre o valor das previsões probabilísticas, merecem destaque os trabalhos de MURPHY (1977) e KRZYSZTOFOWICZ (1983c). O primeiro autor

compara o valor de diversos tipos de previsão (climatológica, por categorias, probabilística e perfeita) em um ambiente de decisão do tipo razão custo / perda. MURPHY (1977) demonstra que se a previsão por categoria é derivada da previsão probabilística e essa última apresenta confiabilidade geral, então o valor de suas previsões é maior que o valor das previsões climatológicas e por categorias, para todas as atividades e operações (isto é, para todos os valores da razão custo / perda). Mesmo nas situações em que a previsão não apresenta confiabilidade geral, essas relações favoráveis às previsões probabilísticas mantêm-se para amplos domínios da razão custo / perda. O segundo autor analisa o mesmo problema, considerando um ambiente de decisão quadrático de período simples e a expressão da incerteza por meio de um intervalo fixo de confiança. KRZYSZTOFOWICZ (1983c) demonstra que as previsões probabilísticas possuem valor no mínimo igual às previsões determinísticas, se as primeiras são suficientes (em termos estatísticos) em relação às segundas. Ele também reporta as perdas de oportunidade que podem estar presentes para o tomador de decisão que não utiliza a racionalidade bayesiana. Outros trabalhos sobre o valor das previsões probabilísticas incluem STUART (1982), ZHU *et al.* (2002), THOMPSON e ZUCCHINI (1990) e MURPHY (1991).

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 (KRZYSZTOFOWICZ, 1998). A noção de certo ou errado associado a uma previsão individual não é mais aplicável. De acordo com Lichtenstein *et al.*, citado em KRZYSZTOFOWICZ (1998), a qualidade de acerto só pode ser avaliada estatisticamente, para um conjunto de previsões. TAY e WALLIS (2000) comentam que a incerteza incorporada na previsão carrega em si também uma incerteza, e esse segundo nível de incerteza tem sido objeto direto de investigação na medida em que cresce a disseminação e uso das informações probabilísticas. JOLLIFFE e STEPHENSON (2003) e KATZ e MURPHY (1997a) 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. Esse último instrumento, utilizado para verificação da confiabilidade das previsões do tipo densidade de probabilidade ou por conjuntos, é baseado na transformada integral de probabilidades, que calcula a probabilidade acumulada até cada observação, gerando uma série de valores, os quais devem ser independentes e uniformemente

distribuídos (TAY e WALLIS, 2000). A preocupação com a confiabilidade da previsão justifica-se na medida em que a mesma afeta diretamente o valor derivado dessas informações (MURPHY, 1977, KRZYSZTOFOWICZ, 1983c) e esforços no desenvolvimento de metodologias de recalibração, aplicáveis em especial às previsões por conjuntos, vêm sendo empreendidos (por exemplo, BERROCAL *et al.*, 2007). Esse último fato realça a conveniência de uso dos processadores bayesianos para a derivação de previsões probabilísticas, pois os mesmos possuem a propriedade de auto-calibração, o que garante a confiabilidade das informações geradas (KRZYSZTOFOWICZ, 1999 e 2002).

A capacidade de entendimento do usuário e a correta interpretação das informações disseminadas de forma probabilística têm se constituído para alguns em argumento recorrente para limitar a expansão desse tipo de previsão. Pesquisas nesse sentido têm sido desenvolvidas para reconhecimento do problema e proposição de estratégias de superação (MORGAN e HENRION, 1990, MURPHY *et al.* 1980, PATT, 2007). O 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. Técnicas e formatos para a comunicação de probabilidades têm sido tratados em MORGAN e HENRION (1990) e TAY e WALLIS (2000).

6 METODOLOGIA PROPOSTA PARA A GESTÃO DO VALOR DA INFORMAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA

6.1 Gestão do valor da informação hidrometeorológica

Conforme identificadas na introdução, as motivações vinculadas às iniciativas de estudo do valor da informação hidrometeorológica, nos contextos individual e organizacional, abrangem interesses tanto na elaboração de justificativas de financiamento e suporte para decisões de investimentos, quanto na identificação de oportunidades de melhoria no uso e na produção dessas informações. Apesar da relevância dessas motivações e da consciência da necessidade de estudos desse tipo em um cenário público e empresarial que discute e promove cada vez mais a tomada de decisão baseada em critérios racionais de agregação de valor, as iniciativas nesse sentido têm sido insuficientes no mundo e raras em nosso país. A complexidade, os condicionantes e desafios identificados na literatura e discutidos no capítulo 3, bem como os custos e prazos associados ao seu desenvolvimento, têm limitado a consecução de estudos do valor da informação hidrometeorológica, bem como frustrado o êxito de diversas iniciativas, como a relatada por STEWART *et al.* (2004) e comentada por GLAHN (2005). Além disso, estudos específicos têm apresentado abordagem metodológica incompatível com o seu escopo e sofrido críticas de usuários e especialistas quanto aos pressupostos assumidos. Como o esforço inicial de modelagem do PTD e de construção do instrumento de valoração da informação normalmente já consumiu todo o tempo e recursos previstos, a incorporação das sugestões e conseqüente revisão dos modelos são prejudicadas e o uso de seus resultados finais pode sofrer restrições devido à falta de uma aceitação generalizada na organização.

Diante desse contexto e frente à relevância das motivações apresentadas para provedores e usuários das informações hidrometeorológicas, bem como para o desenvolvimento científico e tecnológico da área, propõe-se a implantação de um processo sistemático de gestão do valor da informação nas organizações sensíveis,

que incorpore as motivações de estudos específicos e promova a derivação de estratégias de gestão para a melhoria contínua do acesso, assimilação e uso dessas informações. Como as motivações manifestadas estão, em diferentes graus, comumente presentes em um mesmo problema de valor da informação, esse processo de gestão deve ser capaz de reunir ambos os enfoques presentes nos estudos de valor da informação: (1) obter uma estimativa predominantemente econômica do valor, para justificar financiamentos e balizar novos investimentos; e (2) buscar entender o processo de construção do valor, que permita a derivação de estratégias de gestão com objetivos de otimização do uso e inovação do processo de produção das informações. Dessa forma, um processo de gestão do valor da informação, implantado em uma organização usuária sensível, deve favorecer a consolidação de referências de valor suficientemente robustas para sustentar investimentos e promover o aprimoramento do uso e desenvolvimento de novas aplicações, contribuindo para a construção de um relacionamento mais produtivo entre provedores e usuários dessas informações.

Dentro dessa abordagem, gestão do valor da informação deve ser visto como um processo contínuo, concomitante ao uso da informação. A revisão e / ou ampliação permanente dos estudos de valor da informação, bem como a renovação do problema e / ou do contexto de análise, permitem a expansão progressiva do conhecimento sobre os usos e aplicações, os impactos e resultados, os custos e limitações dessas informações e os seus benefícios reais e potenciais, mensurados em relação aos objetivos, finalidades e interesses da organização alvo de análise. Todo esse processo subsidia a elaboração de estratégias mais racionais e ajustadas, constituindo-se em instrumento de gestão para a agregação de valor à informação hidrometeorológica no contexto organizacional.

6.2 Abordagem metodológica para gestão do valor da informação hidrometeorológica

Um processo estruturado de gestão do valor da informação hidrometeorológica deve abranger pelo menos três módulos interdependentes assim identificados: (1) configuração do problema e delimitação do espaço de análise; (2) seleção e integração dos métodos de estimativa de valor; e (3) derivação das estratégias de gestão. Cada módulo incorpora um conjunto de atividades, cuja consecução ordenada visa, incrementalmente, aprofundar o conhecimento sobre o problema, por meio do emprego progressivo de métodos de valoração mais elaborados. Esse processo promove a consolidação, na organização como um todo, de estimativas de valor cada

vez mais precisas e confiáveis, possibilitando a derivação de estratégias de gestão mais eficazes na promoção do valor da informação. A abordagem utilizada neste trabalho, que incorpora o esquema de estimativa progressiva dos valores da informação inicialmente proposto por LEITE e ROTUNNO FILHO (2004), é apresentada na Figura 6.1.

6.2.1 Configuração do problema e delimitação do espaço de análise

De acordo com o esquema apresentado na Figura 6.1, cada esforço de gestão do valor da informação é realizado sobre um problema e contexto de análise definidos. O sentido de problema deve ser aquele discutido por PIELKE JR. (1997), o qual surge de um senso de dissonância entre como as coisas são e como deveriam ser, que cria um dilema a respeito do qual se pode fazer alguma coisa, e cujo ato de definição é integrativo e interpretativo. No âmbito dessa metodologia, problema deve ser entendido como uma relação entre um evento de tempo, clima ou de recursos hídricos e uma conseqüente ameaça ou oportunidade relevante para a organização. Assim, a configuração de um problema engloba o reconhecimento do fenômeno hidrometeorológico de interesse e a qualificação de seus impactos potenciais sobre a própria organização ou seus interesses, objetivos ou finalidades. Em relação ao problema definido, é necessário determinar o contexto de análise, no âmbito do qual se investigará o valor da informação. Nesse sentido, de acordo com os conceitos discutidos no capítulo 2, é no contexto de análise que se pesquisará o papel da informação hidrometeorológica na satisfação dos desejos dos tomadores de decisão em relação ao problema definido. Também é no contexto de análise que os processos decisórios sensíveis serão desenvolvidos e a informação será acessada, assimilada e utilizada. Com a configuração do problema e determinação do contexto de análise pode-se tipificar o foco da investigação e identificar o ponto de vista prevaiente. Como exemplos de apontamento de problema e contexto, podem-se citar: (1) a questão da gestão de reservatórios de múltiplo uso e a investigação do valor da previsão hidrológica no contexto de uma agência estadual de gestão de recursos hídricos; e (2) a questão do risco de falhas em linhas de transmissão e o estudo do valor das informações de descargas atmosféricas no contexto de uma empresa concessionária de energia elétrica.

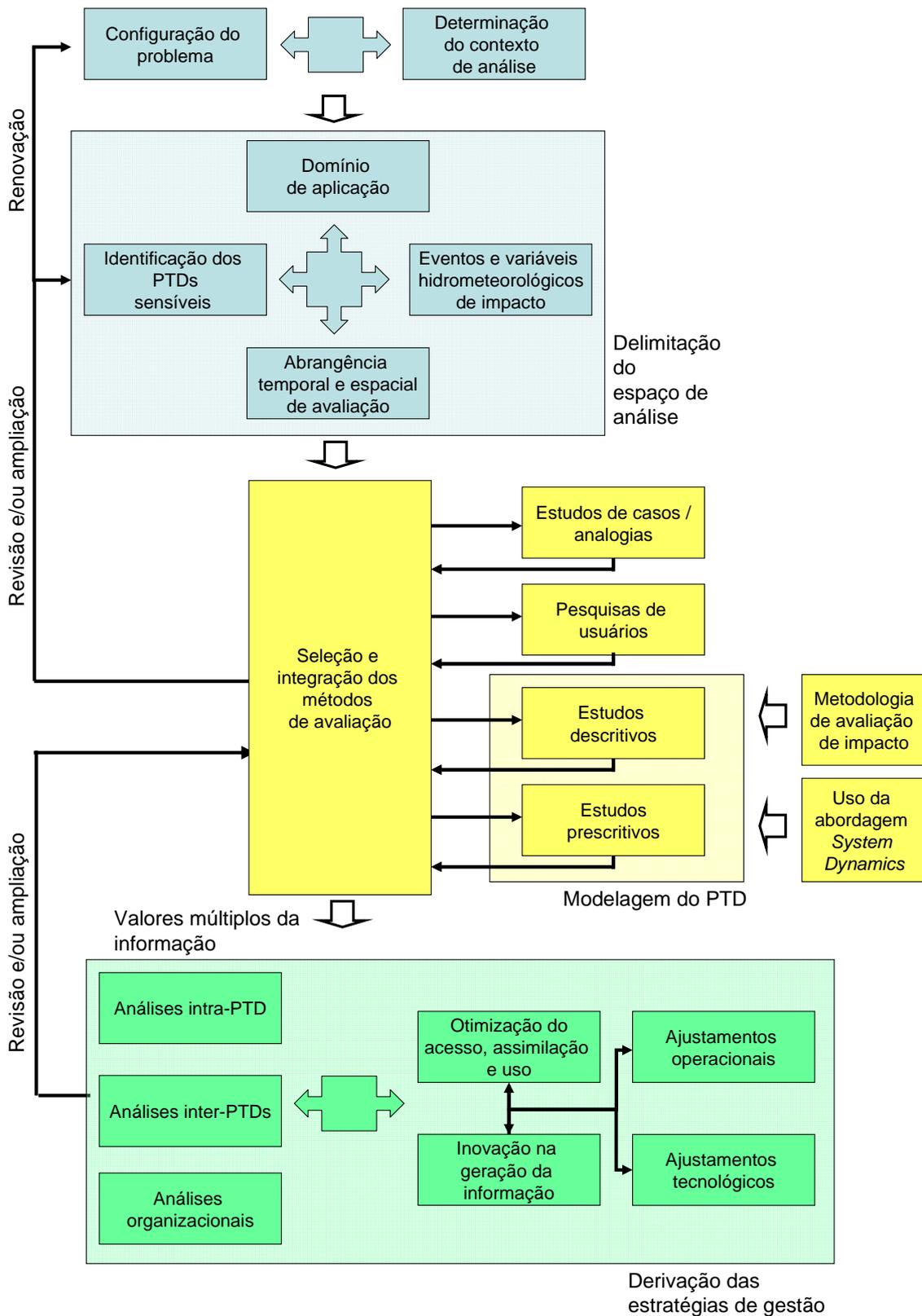


Figura 6.1: Esquema representativo da proposta de abordagem metodológica para gestão do valor da informação hidrometeorológica no contexto organizacional

De acordo com a abordagem proposta, na seqüência é necessário delimitar o espaço de análise válido para a investigação inicial de valor, o qual pode ser revisado ou ampliado para cada projeto de estudo subsequente. Nessa fase, de forma integrada, busca-se determinar: (1) o domínio de aplicação do projeto específico em desenvolvimento, o qual deve identificar e caracterizar o caso em estudo; (2) os processos decisórios sensíveis candidatos à análise e os respectivos tomadores de decisão; (3) os eventos e variáveis hidrometeorológicas que provocam impacto nos PTDs selecionados e as informações que condicionam os seus resultados; e (4) a abrangência espacial e temporal de avaliação dos benefícios, custos e resultados envolvidos no estudo de valor. A investigação dos processos decisórios sensíveis deve abranger todo o contexto de análise, incluindo os subsistemas técnico, organizacional e institucional das organizações envolvidas. A prioridade de seleção dos PTDs pode ser influenciada por sua relevância, interesse organizacional, nível de objetividade e estruturação, facilidades de acesso e disponibilidade de dados. A determinação da abrangência de avaliação qualifica os resultados, no sentido em que determina até quando e onde pesquisar: só os efeitos imediatos a nível interno e local ou efeitos de médio e longo prazos, a nível regional, nacional ou global.

6.2.2 Seleção e integração dos métodos de estimativa de valor

Com o espaço de análise delimitado, a abordagem propõe a seleção e aplicação progressiva de distintos métodos de estimativa de valor e a integração dos valores resultantes de cada avaliação. A defesa da utilização concomitante de diferentes métodos reside na verificação da existência de múltiplos valores da informação resultantes da aplicação desses métodos, cada um revelando aspectos fundamentais para a derivação de estratégias de gestão relativas ao uso e à produção das informações. As opções metodológicas para estimativa do valor da informação, apresentadas no item 3.1, indicadas para utilização nessa abordagem, que contempla o contexto de análise individual e organizacional, abrangem os estudos de casos, as pesquisas de usuários, os estudos descritivos e os estudos prescritivos, os dois últimos exigindo modelagem do PTD.

Os estudos de casos realizados no domínio de aplicação, bem como a derivação de valor por analogia com outros estudos de casos similares podem produzir aproximações, ainda que especulativas, de valores da informação associados aos PTDs selecionados no espaço de análise. A crítica predominante aos estudos de casos é a sua realização *ex-post* aos eventos, o que impede a incorporação adequada da incerteza prévia dominante a respeito da ocorrência futura dos eventos e de suas

conseqüências (KATZ e MURPHY, 1997a). No âmbito desses estudos, para os PTDs selecionados, é normalmente possível estimar um valor representativo do impacto total associado aos eventos hidrometeorológicos de interesse, o qual se denominou de valor de controle, pois corresponderia ao benefício caso se tivesse o controle total sobre a natureza. Também é comumente possível estimar a porção evitável desses impactos com a utilização de uma informação perfeita sobre as condições presentes e futuras do tempo, clima ou recursos hídricos, o qual se denominou de valor perfeito-posterior. Esses dois valores denotam a magnitude dos benefícios que estão envolvidos no problema definido e, apesar de inatingíveis, podem orientar a derivação de estratégias de gestão. A fragilidade dessas estimativas não deve ser considerada empecilho à sua análise e avaliação cruzada, permanecendo importante explicitar os pressupostos e considerá-las como primeiras aproximações, na ausência de informação mais confiável.

Outra opção metodológica a ser integrada é a pesquisa de usuários capaz de gerar estimativas dos valores percebidos da informação. Nessa etapa, por meio do emprego de recursos metodológicos apropriados para pesquisas de opinião (entrevistas estruturadas, semi-estruturadas ou não estruturadas, aplicação de questionários, entre outros), busca-se, para cada processo decisório sensível, o reconhecimento do valor percebido da informação hidrometeorológica, considerando-se duas situações: (1) percepção dos tomadores de decisão do valor da informação perfeita, considerada como aquela de máxima acurácia e condições ideais de fornecimento, o qual se denominou valor perfeito-percebido; e (2) percepção de valor da informação atual que vem sendo utilizada nos processos decisórios sensíveis, o qual se denominou valor imperfeito-percebido. A idéia intrínseca presente nos valores percebidos é que os mesmos representam a motivação organizacional para a manutenção, a melhoria ou a inovação, pois esses valores estão subjacentes à tomada de decisão concernente ao tema. Outras informações relativas ao uso, à estrutura e ao funcionamento do PTD e atributos de qualidade relevantes devem ser também investigados nessa etapa.

As demais opções metodológicas a serem empregadas, envolvendo os estudos descritivos e prescritivos, exigem a modelagem combinada ou não do processo decisório, na qual deve ser incorporada metodologia específica de avaliação que contemple tanto o impacto do tempo, clima ou recurso hídrico sobre os resultados desejados do PTD, quanto o papel condicionante da informação hidrometeorológica sobre esses resultados. Essa metodologia específica é de domínio científico da aplicação em análise, o que torna a sua utilização dependente de agregação no projeto de competência especializada no tema. Outra necessidade no emprego dessas

opções é a construção de um ambiente de simulação e análise do valor da informação, no qual se possa proceder à investigação dos condicionantes de construção do valor. Nesse sentido, esta metodologia propõe o uso da abordagem Dinâmica de Sistemas dentro de um esquema estruturado de modelagem, conforme discussão realizada no item 6.3.

Os estudos descritivos visam a obtenção de estimativas dos valores reais da informação, conforme determina o seu uso atual. Essa etapa contempla uma investigação aprofundada do PTD, de sua caracterização, do balanço entre os domínios de objetividade e subjetividade, do detalhamento de sua estrutura e funcionamento, da identificação das alternativas de decisão, das regras, das restrições, dos objetivos, das probabilidades subjetivas utilizadas e dos custos e perdas associados. Essa investigação deve viabilizar a construção de um modelo capaz de refletir o resultado, da forma mais realista possível, nas mais variadas situações enfrentadas pelo tomador de decisão. Para esse fim, conforme discussão empreendida por STEWART (1997a), metodologias diversas podem ser combinadas, tais como entrevistas, análise de protocolos, experimentos de decisão e análise de julgamento. O objetivo desses estudos é estimar um valor representativo da informação atual ou proposta para uso, baseado no comportamento real do tomador de decisão, o qual se denominou valor imperfeito-descritivo. Também é possível simular o valor associado ao uso da informação perfeita no modelo descritivo derivado, dando origem a um valor denominado perfeito-descritivo. Caso a modelagem do PTD contemple a introdução da aversão ao risco do tomador de decisão ou nas situações em que a riqueza final não admite a forma simplificada aditiva de riqueza inicial mais ganhos, é possível determinar adicionalmente os valores de demanda e de oferta da informação, conforme abordagem de LAWRENCE (1999), discutida no item 4.3. Esses valores traduzem uma medida da disposição a pagar (a receber) do tomador de decisão pelo uso (não uso) da informação objeto de análise. Também, comumente, um valor de referência deve ser estimado, relativo a uma informação mínima ou nula, sempre disponível, em relação ao qual se calcula o valor da informação em análise. Essa situação referencial normalmente abrange os casos de não uso de informação hidrometeorológica ou uso das informações de persistência ou climatológica, informações anteriores disponíveis, entre outras. O valor imperfeito-descritivo e o valor de referência denotam, respectivamente, a situação atual ou proposta de agregação de valor e a situação base de retorno, compatível com o nível tecnológico anterior das informações, que ocorreria caso as condições de sustentabilidade do provimento das informações analisadas fossem eliminadas. A análise comparativa entre diferentes valores da informação exige a explicitação do valor de referência em uso, bem como a

possibilidade de conversão, obtendo-se novos valores estimados em relação a um mesmo valor de referência.

Os estudos prescritivos visam a obtenção de estimativas dos valores potenciais da informação atual ou proposta para uso. Esses estudos representam um esforço de abordagem analítica do PTD para a construção de um modelo suficientemente tratável, para o qual se possam reconhecer, explicitamente, uma função objetivo, pressupostos e restrições e sobre o qual se possam aplicar técnicas de otimização para determinar o valor máximo que pode ser agregado pelas informações sob análise. Esse valor, o qual se denominou valor imperfeito-normativo, não se confunde com o valor imperfeito-descritivo, pois o tomador de decisão pode estar atuando de uma forma sub-ótima, por diversas razões, entre as quais, a incompreensão do significado das informações, desconsideração das incertezas, racionalidade limitada (STERMAN, 2000), complexidade da função consequência ou utilidade, aversão ao risco, etc. Processando convenientemente o modelo, também é possível derivar um valor perfeito-normativo, associado à informação perfeita, e valores de referência, conforme discutido no parágrafo anterior. Um esforço adicional previsto na abordagem compreende a agregação dos valores da informação estimados para os distintos PTDs em uma medida do valor integral para todo o contexto de análise. Essa agregação pode compreender esforços para o registro dos valores em bases ou métricas comuns ou conversíveis, bem como um sistema de pesos para refletir a importância relativa de cada valor, de cada PTD, no valor agregado.

Como subsídio para a modelagem dos processos decisórios e estimativa do valor da informação, modelos analíticos baseados na teoria bayesiana, foram apresentados no capítulo 4, para o caso geral, e no capítulo 5, especializados para as informações hidrometeorológicas. Nesse sentido, também foi estruturada uma proposta de tipologia de problemas de valor da informação hidrometeorológica, apresentada no item 6.4.

6.2.3 Derivação das estratégias de gestão

A estimativa progressiva dos múltiplos valores da informação e do valor de controle dos eventos ou variáveis de tempo, clima ou de recursos hídricos, bem como análises de sensibilidade desses valores quanto a critérios de qualidade da informação permitem uma reflexão sobre as potencialidades e limitações de ações voltadas a uma maior agregação de valor da informação hidrometeorológica no contexto de análise. Conforme sugestão de LEITE e ROTUNNO FILHO (2004), esses valores da informação hidrometeorológica devem ser organizados em uma matriz que permita

inter-comparação facilitada dos diversos valores para um mesmo PTD, entre os distintos processos decisórios e em relação à organização como um todo. Assim, a reflexão sugerida pode ser estruturada em análises do tipo intra-PTDs, inter-PTDs e organizacionais, e deve ter por objetivo a derivação de estratégias de gestão que, conforme o caso, podem ser orientadas para: (1) a redução da dissonância entre os valores estimados da informação (percebidos, normativos e descritivos); (2) para o incremento da qualidade e / ou representatividade das informações; ou (3) em ambas as direções, buscando máxima agregação de valor. A primeira orientação estimula a elaboração de estratégias voltadas à otimização do acesso, assimilação e uso da informação. A segunda orientação favorece o surgimento de estratégias voltadas à inovação no processo de geração das informações. A combinação das orientações estimula a busca de ajustamentos operacionais e tecnológicos, integrando uso e produção das informações. No âmbito desta abordagem, estratégia deve ser entendida como conjunto estruturado de ações premeditadas e de execução não imediata, projetado para atingir determinados objetivos ou para tornar mais fácil a compreensão e solução de problemas identificados (PORTER, 1986). É relevante ressaltar que as estratégias de gestão, diante de um problema definido, em determinado contexto e organização, não podem ser derivadas de forma direta e automática, com garantia de sucesso. Sua formulação, em processos formais ou informais de planejamento, envolve comumente investigação de múltiplos fatores internos e externos ao contexto de análise e inspiração dos participantes. Nesse sentido, a abordagem proposta busca identificar procedimentos de análise e caracterizar ações potenciais que possam integrar estratégias de agregação de valor às informações hidrometeorológicas, de forma a favorecer o processo de formulação das mesmas.

As análises intra-PTDs dos valores da informação favorecem a derivação de estratégias focadas em determinado uso específico representado pelo PTD, que podem objetivar o tratamento de necessidades ou oportunidades detectadas de: (1) conscientização dos tomadores de decisão; (2) ajustamentos e capacitação de uso; (3) melhorias do serviço de provimento das informações; (4) pesquisa e inovação na geração de novos produtos ou informações de maior qualidade. Por exemplo, diferenças significativas entre os valores imperfeito-percebido e imperfeito-descritivo ou entre os valores perfeito-percebido e perfeito-normativo comumente indicam necessidade de conscientização dos tomadores de decisão e dirigentes quanto aos benefícios atuais ou limites vinculados ao uso da informação. Diferenças entre os valores imperfeito-descritivo e imperfeito-normativo normalmente indicam necessidade de capacitação do pessoal quanto ao significado e uso das informações disponíveis ou

planejadas e / ou ajuste no processo usuário para aproveitamento pleno das informações. Propostas de melhoria das informações podem impactar diferentemente os valores imperfeito-descritivo e imperfeito-normativo, o que revela necessidade de análise combinada desses valores, nas condições atuais e propostas, para a formulação de estratégias de aquisição e / ou produção dessas informações. Análises comparativas entre os valores de referência, imperfeito-normativo e perfeito-normativo, de condições técnicas do serviço de provimento e dos custos envolvidos podem orientar a formulação de estratégias voltadas à melhoria do serviço e / ou mostrar a premência de pesquisa e inovação na geração das informações. A análise de sensibilidade do valor da informação quanto a atributos específicos de qualidade ou a tipos pré-determinados de erros pode revelar oportunidades e orientar esforços de melhoria na geração das informações, com impactos significativos no seu valor. Enquanto os valores percebidos criam motivação e favorecem ou não as mudanças, os valores descritivos e normativos (perfeitos e imperfeitos) subsidiam os estudos de custo versus benefícios, utilizados para respaldar a decisão e viabilizar os investimentos necessários ao aprimoramento do uso e geração das informações.

As análises inter-PTDs dos valores da informação favorecem o estabelecimento de prioridades entre estratégias voltadas a diferentes usos, aplicações ou processos em uma cadeia de decisão, visando o direcionamento dos recursos quanto à necessidade ou oportunidade de investimentos, esforços de pesquisa e inovação, melhorias planejadas e / ou capacitação de pessoal. Também essas análises permitem identificar processos usuários potencialmente mais afetados com a interrupção do provimento das informações. Assim, por exemplo, PTDs com valores de controle muito expressivos e valores perfeitos relativamente baixos ou nulos podem ser priorizados para estudos de viabilidade de geração de informações novas, de forma a se criar condições de minimizar as perdas associadas à atividade, bem como análise de alternativas de convivência com o risco representado pelo evento de tempo, clima ou de recursos hídricos. A análise comparativa entre PTDs das diferenças entre valores imperfeitos e de referência podem alimentar estratégias de distribuição interna dos custos dos serviços de provimento dessas informações para a organização.

As análises organizacionais dos valores agregados da informação permitem consolidar estratégias destinadas a orientar a ação institucional quanto à manutenção, à melhoria e à inovação dos serviços de informação, respaldando investimentos em infra-estrutura, pesquisa e desenvolvimento, capacitação de pessoal, consultorias e prestação de serviços a serem compartilhados pela organização. Análise agregada dos valores percebidos, descritivos e normativos (perfeitos e imperfeitos, atuais e propostos) subsidiam a tomada de decisão equilibrada entre modernização do uso e /

ou da produção das informações. A conscientização permanente dos dirigentes, com ajustes dos seus valores percebidos, e os estudos de custo versus benefício agregados favorecem os investimentos, o incremento da qualidade e o aprimoramento do uso das informações, o que rende benefícios para a organização alvo, o contexto de análise e a comunidade de meteorologia e de recursos hídricos.

As análises intra-PTDs, inter-PTDs ou organizacionais, bem como a investigação da sensibilidade dos valores de informação podem indicar oportunidades de agregação de valor a partir de estratégias de ajustamento no uso e produção da informação. Os ajustamentos requeridos podem ser de natureza operacional ou tecnológica. Ajustamentos operacionais contemplam variação não estrutural das características internas do processo de produção ou uso das informações, envolvendo comumente ajustes e recalibrações tanto nas atividades de monitoramento, previsão e disseminação, quanto no acesso, assimilação e uso das informações. Esses ajustamentos geram comumente impactos sobre atributos de qualidade tais como disponibilidade, pontualidade, acessibilidade, confiabilidade e adequabilidade ao uso, entre outros. Ajustamentos tecnológicos abrangem mudanças estruturais via inovação tecnológica da infra-estrutura e dos processos, incorporação de novos métodos e procedimentos, capacitação de profissionais, pesquisa e desenvolvimento de novos modelos e metodologias para produção e uso das informações. Esses ajustamentos geram comumente novas informações ou impactam a exatidão, a acurácia ou capacidade de discriminação das informações existentes. Exemplo de investigação dos impactos desses ajustamentos no valor da informação, tendo como base um modelo decisório do tipo razão custo / perda condicionado pela curva de características operacionais, é apresentado no Anexo A, item A.4. Também, no estudo de valor apresentado no capítulo 7, são investigadas situações de ajustamentos operacionais e tecnológicos sobre a produção e uso da informação, nas quais se analisa a sensibilidade do valor dos alertas de inundação, para casos de decisão baseados em informações determinísticas e probabilísticas, de diferentes níveis de qualidade.

6.3 Proposta de aplicação da abordagem Dinâmica de Sistemas à modelagem de problemas de valor da informação hidrometeorológica

6.3.1 A abordagem Dinâmica de Sistemas

A abordagem de enfoque sistêmico denominada Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*) e os ambientes desenvolvidos para a sua implementação (como os

programas STELLA da High Performance Systems e VENSIM da Ventana Systems) foram avaliados como opção metodológica e suporte computacional adequado para a modelagem e simulação dos PTDs e tratamento dos problemas de valor da informação.

De uma forma ampla, Dinâmica de Sistemas, discutida em FORRESTER (1971 e 1994), STERMAN (2000), MIT (1992) e NEWTON (2004), pode ser entendida como uma abordagem para o estudo do mundo ao nosso redor, nos seus aspectos sociais, tecnológicos ou ambos, no qual se busca entender as causas estruturais do comportamento dos sistemas. Essa abordagem foi introduzida pelo Prof. Jay Forrester do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e desenvolveu-se a partir da década de 70. Segundo FORRESTER (1994), o interesse na abordagem Dinâmica de Sistemas está se espalhando devido ao fato de as pessoas apreciarem suas habilidades únicas de representar o mundo real. Ela pode aceitar a complexidade, a não linearidade e as estruturas de realimentação que são inerentes aos sistemas físicos e sociais. A abordagem Dinâmica de Sistemas é uma metodologia utilizada para entender o comportamento dos sistemas ao longo do tempo, ou seja, sua dinâmica. Seu pressuposto básico é que a estrutura do sistema determina seu comportamento e a melhoria da compreensão do sistema advém do entendimento das relações entre estrutura e comportamento.

Na abordagem Dinâmica de Sistemas os estados e ações do sistema real são representados por estoques e fluxos (ou níveis e taxas) de matéria, energia e / ou informação, aos quais são adicionados metas (ou objetivos) e processos de mensuração dos resultados e discrepâncias. A simulação por meio de Dinâmica de Sistemas permite a identificação de ciclos de realimentação, atrasos sistêmicos e conseqüências não intencionais nos sistemas estudados. Essa abordagem enfatiza o conhecimento dos mecanismos causais subjacentes, sejam os mesmos diretamente observáveis ou não, antes que as correlações observadas ou estatisticamente construídas. Segundo FORRESTER (1971), modelos baseados em Dinâmica de Sistemas não são derivados estatisticamente de séries de dados temporais, em vez disso, eles são declarações acerca da estrutura do sistema e das políticas que guiam as decisões.

Conforme apresentado por STERMAN (2000), a relação entre estoques e fluxos é definida pelas seguintes equações integral e diferencial:

$$E(t) = \int_{t_0}^t [FE(s) - FS(s)]ds + E(t_0) \quad (6.1a)$$

$$\frac{d(E)}{dt} = FE(t) - FS(t) \quad (6.1b)$$

onde:

- $E(t)$ - estoque no momento t ;
 $FE(t)$ - fluxo de entrada no momento t ; e
 $FS(t)$ - fluxo de saída no momento t .

Segundo NEWTON (2004), Dinâmica de Sistemas é tipicamente utilizada para produzir informação condicional e projeções do comportamento dinâmico dos sistemas, com ênfase na identificação de tendências em vez da precisão dos resultados, o que representa avanço no nível de entendimento atualmente permitido pelos modelos mentais não explícitos ou pela intuição. Outro aspecto dessa abordagem é o tratamento diferenciado que permite das seguintes fases do processo de modelagem: (1) estruturação do funcionamento do sistema; (2) dedução dos efeitos de propostas de mudança; e (3) considerações sobre valores e metas. Essa distinção entre fases contribui para a construção do entendimento coletivo do sistema e a obtenção de consenso sobre intervenções e conseqüências.

Conforme discutido em STERMAN (2000), Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada na modelagem dos seguintes sistemas: (1) naturais, em problemas como equilíbrio em ecossistemas, mudanças climáticas, crescimento populacional e comportamento dos sistemas físicos; (2) sociais, em problemas como criminalidade, epidemias, sistemas macroeconômicos, educacionais e de segurança; e (3) sócio-técnico-ambientais, em problemas de desenvolvimento sustentável, planejamento urbano e administração e negócios. Em relação aos sistemas sociais, a abordagem Dinâmica de Sistemas tem sido privilegiada, pois permite a incorporação de variáveis humanas e sociais, tais como motivações, desejos, expectativas, percepções e metas, etc. e ajuda a projetar e aperfeiçoar esses sistemas, caracterizados por FORRESTER (1971) como sistemas não lineares de múltiplos ciclos de realimentação. Segundo NEWTON (2004), Dinâmica de Sistemas tem também sido considerada, por definição, como uma ferramenta de sustentabilidade, pois permite identificar e comunicar a racionalidade das melhores políticas de longo prazo, o desenvolvimento de projetos colaborativos, a comunicação efetiva e o entendimento generalizado.

Obviamente, a abordagem Dinâmica de Sistemas não transforma o processo de modelagem em tarefa fácil e sem custos, nem elimina o esforço teórico e empírico necessário para avançar o conhecimento sobre os sistemas reais. Também, conforme o problema em mão, outras abordagens e metodologias devem ser adicionadas de forma a permitir melhor retratação da realidade, redução da complexidade e pragmatismo na consecução dos propósitos da modelagem.

Um último aspecto relevante dessa abordagem, presente nos ambientes de simulação analisados (STELLA e VENSIM), é a força de comunicação que eles incorporam dos pressupostos do modelo e do comportamento dinâmico do sistema, o qual pode ser condicionado a parâmetros e condições de contorno ajustáveis. Essa característica fortalece o trabalho de construção de modelos mais realísticos e principalmente úteis. Afinal, conforme discutido por SAYÃO (2001, p. 83), “um modelo assume a natureza ambígua de ser igual e desigual à realidade que ele modela. Ele possui a sua própria forma e estrutura, independente do original que representa; as afinidades e divergências entre o modelo e a realidade devem ser ‘expressáveis’ e expressadas (grifo nosso)”. Complementarmente, STERMAN (2000) comenta que a questão principal que analistas e clientes devem enfrentar não é se o modelo é verdadeiro, mas se ele é útil. Ele enumera as principais razões da baixa utilidade de modelos, onde destaca: a falta de incorporação de questões básicas acerca da adequação do modelo ao seu propósito; a tendência dos analistas em manter os pressupostos do modelo escondidos dos clientes e usuários; e falhas na identificação e inclusão de pessoas chaves no processo de modelagem. Sobre Dinâmica de Sistemas, STERMAN (2000) comenta que a força de comunicação do comportamento dinâmico do sistema cria empatia e interesse, desenvolve o espírito crítico dos usuários e realimenta o analista com críticas e sugestões de melhoria. No seu conjunto, essa força de comunicação do ambiente favorece a modelagem como um todo, tornando-a parte de um processo interativo de aprendizagem e solução de problemas.

6.3.2 Modelagem do valor da informação hidrometeorológica por meio da abordagem Dinâmica de Sistemas

A abordagem Dinâmica de Sistemas apresentada no item 6.3.1 incorpora uma série de características que se mostra adequada à modelagem do PTD e ao estudo do valor da informação hidrometeorológica.

As razões dessa adequação são as seguintes: (1) Dinâmica de Sistemas foi concebida para a modelagem de sistemas que incorporem aspectos tanto sociais quanto tecnológicos, o que é o caso dos PTDs envolvendo o uso de informações de base técnica; (2) Dinâmica de Sistemas busca entender as causas estruturais do comportamento dos sistemas, o que pode revelar condições atuais e oportunidades de otimização do uso da informação, subsidiando a estimativa dos valores descritivos e normativos da informação; (3) Dinâmica de Sistemas aceita a complexidade, a não linearidade e estruturas de realimentação, o que comumente está presente em PTDs

eminentemente humanos, que buscam adaptação progressiva a metas e procedimentos organizacionais variáveis; (4) Dinâmica de Sistemas busca entender o comportamento dinâmico dos sistemas, o que pode subsidiar a observação de tendências nos resultados dos PTDs e no valor da informação, quando sujeitos a políticas decisórias variadas; (5) Dinâmica de Sistemas pode incorporar variáveis humanas e sociais como metas, expectativas, percepções e motivações, bem como processos de mensuração de resultados e discrepâncias, os quais podem ser constituintes relevantes do PTD alvo e condicionantes do valor da informação; (6) Dinâmica de Sistemas privilegia a análise de tendências em vez da precisão dos resultados, o que favorece ao tratamento de problemas como o de valor da informação, onde o conhecimento das variáveis envolvidas e de suas relações e condições de contorno é comumente incerto e incompleto; (7) Dinâmica de Sistemas permite a diferenciação de fases, separando a estruturação do problema da análise dos resultados, o que minimiza as críticas quanto à abrangência e pressupostos considerados no estudo de valor e (8) Dinâmica de Sistemas favorece o desenvolvimento de projetos colaborativos, comunicação efetiva e entendimento generalizado, o que é fundamental em iniciativas cooperativas de modelagem multidisciplinar, como devem ser os estudos do valor da informação hidrometeorológica.

A aplicação da abordagem Dinâmica de Sistemas aos estudos prescritivos e descritivos do valor da informação hidrometeorológica exige a construção de um ambiente de simulação, para o qual se propõe a seguinte estruturação: (1) um módulo de simulação do tempo, clima ou recursos hídricos, focado nas variáveis hidrometeorológicas de interesse; (2) um módulo gerador de informações hidrometeorológicas com estrutura de erros observada, estimada ou pretendida; (3) um módulo gerador de informações de referência, com estrutura de erros conhecida; (4) um módulo de estimativa de impactos do tempo, clima ou recursos hídricos, que gere conseqüências potenciais para o contexto de análise; (5) um módulo de simulação do processo de tomada de decisão, que baseado na informação hidrometeorológica, condicione as conseqüências potenciais e gere resultados relevantes para o tomador de decisão; (6) um módulo de indicadores de valor da informação, que calcule o valor esperado de indicadores significativos associados ao conjunto de resultados obtidos; (7) um módulo de indicadores de valor de referência, que calcule o valor esperado dos mesmos indicadores do módulo anterior para a informação de referência; e (8) um módulo de estimativa do valor da informação, que calcule o valor associado à informação hidrometeorológica em relação à informação de referência. Módulos adicionais de verificação da qualidade das informações

hidrometeorológicas e de verificação do desempenho do sistema podem ser requeridos para análise da relação entre valor da informação e medidas de qualidade das informações ou outros indicadores de desempenho do sistema investigado. A Figura 6.2 apresenta uma proposta de estruturação do ambiente de simulação e análise do valor da informação hidrometeorológica.

Os principais requerimentos para o desenvolvimento desse ambiente de simulação associados a cada módulo são os seguintes: (1) utilização de séries históricas ou geração de séries sintéticas das variáveis hidrometeorológicas de interesse para a simulação do tempo, clima ou dos recursos hídricos representativos do domínio de aplicação, no qual se pode utilizar, conforme o caso, métodos tais como simulação de Monte Carlo, cadeia de Markov, modelos de regressão lineares ou não, entre outros (BENJAMIN e CORNELL, 1970, BRAS e RODRÍGUEZ-ITURBE, 1993); (2) programação do modelo gerador de informações hidrometeorológicas, baseada no conhecimento da lógica, função objetivo, condições de contorno e parâmetros de controle ou a geração de informações baseada em indicadores históricos de desempenho considerados relevantes, como a sua estrutura observada de erros e atrasos; (3) incorporação de modelo alternativo de geração de informações (por exemplo, o que está ou estava sendo utilizado no momento do estudo) a partir dos métodos discutidos no item anterior ou seleção e implementação de heurísticas alternativas de geração de informações, tais como aquelas baseadas na climatologia, persistência, informação perfeita, etc., que utilizam métodos tais como ARIMA e Filtro de Kalman, entre outros (BRAS e RODRÍGUEZ-ITURBE, 1993, ANDERSON e MOORE, 2005); (4) utilização de metodologia específica de avaliação de impactos das variáveis ou eventos hidrometeorológicos em relação ao problema e contexto de análise determinados, a qual pertence ao domínio temático das disciplinas correlatas ao problema; (5) desenvolvimento de modelos prescritivos ou descritivos para o PTD, conforme o caso, com o uso, por exemplo, de heurísticas simplificadas baseadas na informação recebida, ou modelos complexos do processo decisório, que incorporem mecanismos de otimização para os modelos prescritivos ou perturbações subjetivas para os modelos descritivos; (6) construção de indicadores de valor derivados da função objetivo implícita ou explícita do PTD ou utilização de medidas, financeiras ou não, do próprio resultado do processo decisório; (7) cálculo dos indicadores selecionados para a informação de referência; e (8) estimativa do valor da informação, descritivo ou normativo, absoluto ou relativo, a partir das abordagens teóricas discutidas anteriormente, em relação aos indicadores ou medidas selecionadas.

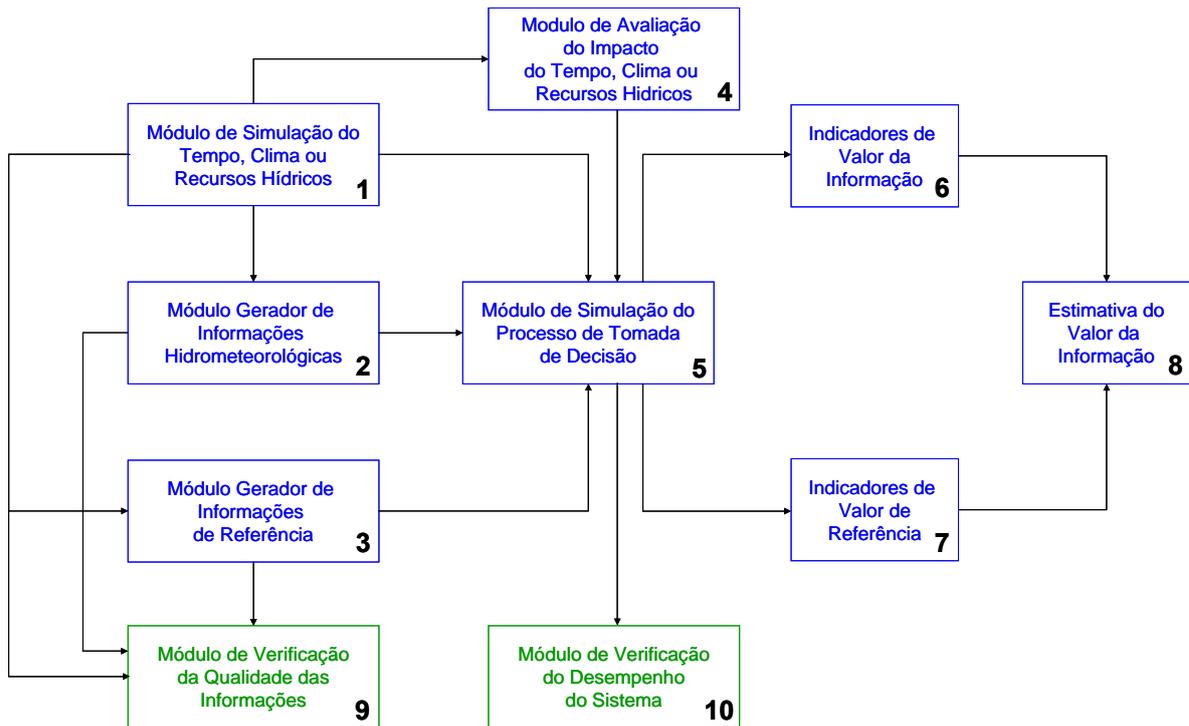


Figura 6.2: Proposta de estruturação do ambiente de simulação para estimativa e análise de sensibilidade do valor da informação hidrometeorológica

A abordagem proposta baseada em Dinâmica de Sistemas foi utilizada na modelagem de um conjunto de tipos de problemas de valor da informação, comumente encontrado em situações que envolvem as informações hidrometeorológicas. Esses modelos, apresentados no Anexo A, apesar de simplificados e alimentados com dados hipotéticos, permitem a avaliação do processo de construção de valor em múltiplas situações, a análise de sensibilidade do valor aos parâmetros principais do problema e a investigação das oportunidades de melhoria do processo de geração das informações sintonizadas com a construção do seu valor. Nesse sentido, foram apresentados no Anexo A os modelos baseados na razão custo / perda, básico, com incorporação de perturbações subjetivas, de variáveis *fuzzy*, condicionados pela curva de características operacionais e contemplando o uso de previsões probabilísticas. Também são apresentados os modelos ampliados de custos e perdas por categoria e para variáveis quantitativas. Para os problemas investigados, foram derivadas expressões analíticas que buscam explicitar as relações entre o valor da informação e os parâmetros determinantes dos modelos considerados.

Para ilustrar o potencial de uso da abordagem metodológica proposta em problemas reais, foi desenvolvido um estudo específico do valor da informação de alerta de inundação na cidade de União da Vitória. Esse estudo, apresentado no capítulo 7, envolveu não só a construção e simulação de um ambiente para estimativa e análise de sensibilidade do valor da previsão hidrológica, mas também incorporou

propostas de operação do sistema e de gestão do valor da informação, com foco prioritário na minimização dos impactos das inundações para a população potencialmente atingível.

6.4 Proposta de uma tipologia de problemas de valor da informação hidrometeorológica

Conforme discutido anteriormente, é necessário não perder a perspectiva de que um problema de valor da informação necessita explorar o PTD e adicionar aspectos da incorporação da informação que contemplem, por um lado, o que é desejável no processo de acesso, assimilação e uso da informação e, por outro lado, o que se necessita agregar em termos de recurso e / ou esforço para viabilizar essa incorporação. Dessa forma, é necessário estabelecer um balanço entre o desejável e o necessário, entre as vantagens e desvantagens, entre o benefício e o custo ou, financeiramente, entre o que tenho a receber e o que tenho a pagar. De maneira geral, múltiplos indicadores podem ser utilizados na mensuração dos benefícios e custos envolvidos. O problema de valor da informação pode, em um primeiro nível de estruturação, somente explicitar as relações entre benefícios e custos, expressando-os em unidades particulares de mensuração, ou, em um segundo nível, equacionar o resultado ou utilidade do balanço entre benefícios e custos, gerando uma medida de agregação de valor. A passagem do primeiro para o segundo nível exige formalização analítica do processo decisório, levantamento de pressupostos e hipóteses sobre desejos, necessidades e outras condições de contorno, o que reduz a generalidade do estudo. Ambos são úteis em um processo de gestão da informação e dificuldades iniciais do segundo nível não devem desestimular a realização dos estudos do primeiro nível.

Considerando o problema de valor da informação hidrometeorológica, a partir da análise da literatura sobre o tema, exemplos de casos tratados e reflexão sobre demandas concretas de estudo de valor, buscou-se propor uma tipologia inicial que incorpore progressivamente nossos tipos e subtipos, conforme avance a pesquisa na área. De uma forma geral, considerou-se que esses problemas, dentro do contexto de análise organizacional ou individual, podem ser categorizados em relação à: (1) representação que exigem do estado da atmosfera ou dos recursos hídricos; (2) natureza e agregação dos indicadores de valor e (3) representação do processo decisório.

Em relação à representação do estado da atmosfera ou dos recursos hídricos, os seguintes tipos de problemas foram identificados: (1) binário, que utiliza uma escala

nominal, onde a variável hidrometeorológica pode assumir somente dois valores correspondentes à ocorrência ou não de um evento específico de interesse, por exemplo, cheia, geada, chuva além de determinado limite, etc.; (2) categorizado, que utiliza uma escala ordinal, onde a variável pode assumir um número restrito de valores correspondentes a categorias pré-estabelecidas, que definem o evento de interesse, por exemplo, chuva nula, fraca, forte e severa; (3) quantitativo, que utiliza uma escala de quociente (ou de razões), onde a variável hidrometeorológica de interesse pode assumir valores discretos ou contínuos, conforme sua natureza ou critério de mensuração; e (4) probabilístico (versus determinístico), onde as incertezas do monitoramento e / ou da previsão são explicitamente tratadas e as variáveis hidrometeorológicas de interesse são expressas através de sua probabilidade de ocorrência ou de sua função densidade de probabilidade.

Em relação à natureza e agregação dos indicadores de valor, os tipos de problemas identificados foram os seguintes: (1) individual, quando os indicadores de valor refletem desejos ou interesses específicos do indivíduo sob análise, os quais podem ser de natureza múltipla, envolvendo componentes psicológicos, utilitários, financeiros, relativos à qualidade de vida e segurança pessoal e familiar; (2) organizacional, quando os indicadores refletem conseqüências ou resultados internos à organização, analisados sob a ótica de seus interesses, objetivos e finalidades, os quais podem ser de natureza operacional, financeira, de relacionamento com o mercado, de inovação ou de aprendizagem; (3) social, quando os indicadores refletem impactos externos à organização, os quais podem ser de natureza econômica, política ou cultural; e (4) ambiental, quando os indicadores refletem impactos sobre o meio ambiente, mensuráveis nas escalas local, regional, nacional ou global, associados à operação da organização. PINTÉR *et al.* (2000) realizam uma discussão ampla sobre o desenvolvimento de indicadores, apontando-o como um processo crítico, com conseqüência na significância e efeito na avaliação. Eles indicam a necessidade de construção de indicadores compreensíveis e relevantes, com diferentes graus de agregação da informação conforme o nível de análise, bem como sobre a dicotomia existente entre simplicidade de análise e risco de mascarar complexidades e detalhes relevantes.

Em relação à representação do processo decisório, dentro de uma abordagem prescritiva ou normativa, os seguintes tipos de problemas foram identificados: (1) canônica e suas extensões ou tipo custo / perda ($C/L=cost-loss\ ratio$), normalmente associada a uma variável hidrometeorológica binária, corresponde em sua forma básica ao problema decisório de gastar ou não o custo C para poupar a perda L em caso de evento; (2) custos e perdas por categoria, generalização da forma canônica,

normalmente associada a uma variável categorizada, corresponde ao problema decisório de adotar alguma ação de proteção de custo C_i , para reduzir a perda L_j em caso de evento j , tal que essa ação possui determinado fator de eficácia ou redução de perda $r_{i,j}$, onde $0 \leq r_{i,j} \leq 1$; (3) modelo utilitário simplificado (versus geral), o qual envolve expressões de avaliação e interpretação convenientes, abrange a utilização de funções que incorpore a variável hidrometeorológica como argumento e possui características de neutralidade ao risco e riqueza inicial não estocástica, tendo o PTD o objetivo de maximizar a sua função utilidade; (4) dinâmicos (versus estáticos), no sentido discutido por KATZ e MURPHY (1997b), em que ações prévias e suas conseqüências econômicas influenciam ações e conseqüências futuras, criando uma dependência temporal entre os estágios do problema; (5) horizonte infinito (versus finito), no qual o interesse do tomador de decisão é maximizar o resultado esperado considerando no todo um longo período de tempo; (6) descontado financeiramente (versus não descontado), no qual o resultado esperado é condicionado pelo tempo decorrido entre o momento presente e o de sua efetivação, refletindo incertezas futuras e oportunidades de investimentos e consumo; (7) com incorporação de variáveis *fuzzy*, que corresponde à introdução de informação nova, alternativas de ação, estados da natureza ou parâmetros de custo ou perda como eventos ou variáveis *fuzzy*. Dentro da abordagem descritiva, foram identificados os seguintes tipos de problemas: (1) uso direto ou do valor de face, que corresponde ao problema no qual a informação é utilizada diretamente, de forma determinística conforme divulgada, sem incorporação das incertezas no processo decisório; (2) modelo de perturbações subjetivas, o qual utiliza como base os modelos prescritivos do PTD e incorpora na decisão perturbações subjetivas tais como o nível de confiança nas previsões, a propensão a evitar custos, a propensão a evitar perdas, etc.; (3) modelo de aversão ao risco, que utiliza funções utilidade de Von Neumann-Morgenstern definidas sobre a riqueza, capazes de traduzir a preferência do tomador de decisão em relação a somas alternativas de dinheiro; e (4) modelos mímicos, que buscam retratar fielmente o processo decisório atual, levantado no ambiente onde as decisões são tomadas.

Os casos concretos de estudo do valor da informação hidrometeorológica incorporam complexidades normalmente não redutíveis diretamente os tipos apresentados, mas o conhecimento dos mesmos facilita o entendimento do problema em análise e, conforme a abordagem metodológica proposta, permite o estabelecimento de uma base inicial a partir da qual se constrói modelos mais adequados de avaliação do valor da informação no contexto de análise.

7 ESTUDO DO VALOR DAS INFORMAÇÕES DE ALERTA DE INUNDAÇÃO: O CASO DA PROTEÇÃO DE BENS MÓVEIS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE UNIÃO DA VITÓRIA

7.1 Objetivos do estudo

O estudo visa estimar o valor da informação de alerta hidrológico na redução de perdas econômicas em situações de inundação na cidade de União da Vitória, bem como investigar os condicionantes de construção do valor em termos da otimização do uso e da inovação do processo de geração da informação hidrometeorológica. Não obstante os múltiplos benefícios que podem ser associados a um sistema de alerta de inundações, o foco deste estudo será a proteção de bens móveis em edificações residenciais. Os objetivos específicos do estudo abrangem: (1) adaptar e aplicar uma metodologia para estimar o valor normativo da informação de alerta de inundações por meio de modelos prescritivos de decisão; (2) investigar os impactos da incorporação das incertezas das previsões na emissão do alerta e na tomada de decisão de proteção, bem como seus efeitos conjugados na estimativa do valor da informação; (3) comparar o desempenho e valor da informação de modelos hidrológicos de previsão baseados em duas abordagens estocásticas: auto-regressiva, do tipo ARIMA e baseada em filtro de Kalman; (4) realizar análise de sensibilidade do valor da informação em relação à informatividade da previsão de precipitação que alimenta os modelos baseados em filtro de Kalman e (5) analisar os condicionantes do valor e as oportunidades de melhoria nos processos de geração das previsões, emissão dos alertas e uso das informações hidrometeorológicas pertinentes.

7.2 Justificativa do estudo

As enchentes são fenômenos severos de natureza hidrometeorológica, responsáveis por elevados prejuízos sociais, em especial quando de sua ocorrência em aglomerados humanos, sob a forma de inundações urbanas. Segundo PIELKE JR.

e CARBONE (2002), que citam estudos de Kunkel *et al.* realizados sobre os EUA, para a década de 90, as enchentes foram responsáveis por 98 mortes por ano e uma perda de US\$ 5,3 bilhões anuais. Em comparação com as demais décadas do século XX, os dados mostram estabilidade no número de mortes, mas um aumento de quase três vezes nas perdas materiais. Estudos similares mais gerais, como o de CHANGNON *et al.* (2000) mostram a evolução crescente ao longo do último século das perdas econômicas associadas aos eventos severos de tempo, sendo esse crescimento fortemente associado ao aumento da vulnerabilidade devido a fatores sociais como o crescimento da população, movimentações demográficas e expansão da infra-estrutura. Como resultado de um evento técnico sobre impactos sociais e econômicos do tempo, realizado em Boulder, em 1997, pelo *United States Weather Research Program*, USWRP (1997) resumiu os impactos dos eventos extremos para os EUA, conforme mostrado na Tabela 7.1, que explicita as perdas anuais de vidas e perdas econômicas por tipo de evento. As perdas anuais históricas devido às enchentes alcançaram 96 vidas e US\$ 2,4 bilhões, com registro de eventos recentes responsáveis por 156 mortes e perdas da ordem de US\$ 20 bilhões. Segundo USWRP (1997), os dados históricos de impacto subestimam os atuais níveis de vulnerabilidade ao tempo.

Tabela 7.1: Resumo dos impactos dos eventos severos nos EUA em perdas de vidas humanas e perdas econômicas anuais

Resumo dos Impactos dos Eventos Extremos de Tempo nos Estados Unidos								
Evento	Perdas de Vida Anuais		Perdas Econômicas Anuais		Eventos Extremos Recentes			
	Número Médio	Período de Análise	Valores Médios (US\$)	Período de Análise	Ano	Perda Econômica (US\$)	Ano	Número de Mortes
Enchentes	96	86-95	2,4 bilhões	84-93	93	20 bilhões	76	156
Furações	20	86-95	6,2 bilhões	89-95	92	30 bilhões	69	256
Tempestades de Inverno	47	88-95	> 1 bilhão	estimada	93	6 bilhões	93	> 200
Tornados	44	85-95	2,9 bilhões	91-94	93	3,8 bilhões	85	94
Calor Extremo	384	79-92	?	-	80	> 15 bilhões	95	522
Frio Extremo	770	68-85	?	-	76-77	> 30 bilhões	-	-
Descargas Atmosféricas	175	40-81	> 1 bilhão	estimada	-	-	-	-
Granizo	-	-	2,3 bilhões	estimada	90	650 milhões	-	-
Total	> 1500		> 15,8 bilhões					

Extraída de USWRP, 1997, p. 1.

Segundo documento da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2006), durante as últimas décadas, a tendência dos prejuízos de enchentes tem sido de crescimento exponencial, conseqüência do aumento da freqüência de chuvas intensas, mudanças no uso do solo e aumento da concentração da população e bens nas áreas sujeitas à inundação. Segundo WMO (2006), os países menos desenvolvidos são mais vulneráveis às enchentes, que causam prejuízos significativos em relação a seus produtos internos brutos. Um sumário com base no Banco

Internacional de Desastres OFDA/CRED mantido pela Universidade Católica de Louvain, Bélgica, calculados com dados de 1900 a 2007, mostra uma média de mortes anuais devido a enchentes no mundo 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 enchentes de 99 pessoas e perdas de US\$ 78 milhões anuais (US\$ 52 milhões por evento). Esses dados categorizam as enchentes como o principal desastre natural do país, tanto no total de pessoas mortas ou afetadas, quanto em perdas econômicas, realçando o problema das inundações como significativo e merecedor de crescente preocupação por parte da sociedade brasileira.

Uma proposta de Plano Diretor de Recursos Hídricos para o estado do Paraná, realizado em parceria com a Agência de Cooperação Internacional do Japão (JICA, 1995a), identificou oito regiões no Paraná como áreas críticas sujeitas à inundação, a maioria delas na bacia do rio Iguaçu. Segundo JICA (1995a), a região de União da Vitória, correspondente aos municípios de União da Vitória, Porto União e Porto Vitória, abrange as cidades mais severamente afetadas por inundações no estado, sendo as mesmas causadas diretamente pela vazão do leito principal do rio Iguaçu, que compreende uma bacia de aproximadamente 25.000 km². Conforme identificadas por JICA (1995a), as inundações na região de União da Vitória são extensivas, severas, envolvem prejuízos significativos para a população e economia locais, são condicionadas pelas regras operativas da usina hidrelétrica de Foz do Areia, localizada à jusante das cidades afetadas, e devem requerer medidas estruturais e não estruturais para sua mitigação. Todo esse quadro configura o problema de inundação em União da Vitória como caso relevante para o estudo do valor da informação de alerta. Um mapa topográfico da região de estudo é mostrado na Figura 7.1.

7.3 Configuração do problema e delimitação do espaço de análise

7.3.1 Os impactos e medidas de controle das inundações urbanas

A mútua relação entre desenvolvimento urbano e a qualidade e quantidade dos recursos hídricos nas bacias de influência constitui atualmente um dos principais problemas de gestão ambiental em nosso país. Nesse contexto, realça a questão das inundações urbanas e a crescente vulnerabilidade da população à sua ocorrência. Segundo TUCCI (2005), as inundações urbanas são devido a dois processos, que podem ocorrer isoladamente ou combinados: (1) inundações ribeirinhas, associadas ao extravasamento das águas dos rios, quando o escoamento pluvial excede a

capacidade de seu leito principal e (2) inundações devido à urbanização, que ocorrem na drenagem urbana devido ao efeito de impermeabilização do solo, canalização ou obstruções ao escoamento. O primeiro tipo ocorre geralmente em bacias médias ou grandes e tem seu impacto associado à ocupação das áreas de risco pela população. O segundo envolve freqüentemente bacias pequenas, sendo fortemente influenciado pela variabilidade das precipitações.

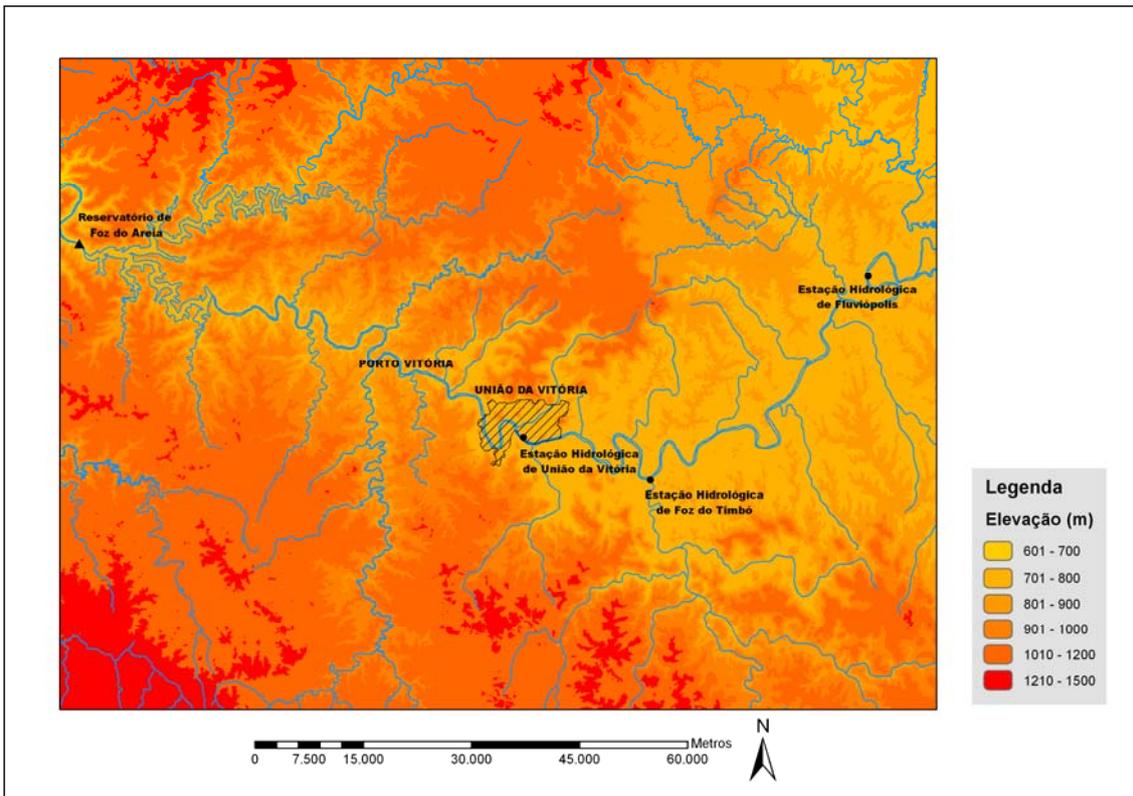


Figura 7.1: Região de estudo do valor da informação de alerta, envolvendo a cidade de União da Vitória, na bacia do rio Iguaçu, no Estado do Paraná

Fonte: Sistema de informações geográficas do Instituto Tecnológico SIMEPAR.

A ocorrência desse fenômeno impõe ao meio ambiente e à população atingida um conjunto de impactos físicos, humanos e econômicos, que tem sido discutido por TUCCI (2005), MERZ *et al.* (2004), QUEENSLAND (2002), THICKEN *et al.* (2005), WIND *et al.* (1999) e MACHADO *et al.* (2007). De maneira geral, os impactos sociais negativos são classificados em perdas diretas e indiretas e em tangíveis e intangíveis. A distinção entre direta e indireta está relacionada à proximidade física e temporal com o fenômeno; a distinção entre tangível e intangível está relacionada ao grau de dificuldade de mensuração econômica. Assim, são consideradas perdas diretas tangíveis, os danos físicos à construção, sua estrutura e conteúdo e, intangíveis, as

perdas de vidas humanas. São consideradas perdas indiretas tangíveis, os custos de limpeza e alojamento e os lucros cessantes por interrupção da atividade econômica e, intangíveis, os estados psicológicos de ansiedade, estresse e insegurança da população atingida. Inventários dos impactos sociais das enchentes são apresentados por QUEENSLAND (2002) e MACHADO *et al.* (2007). TUCCI (2005) ainda inclui como impactos negativos das inundações a contaminação da população por doenças de veiculação hídrica e a contaminação da água por material tóxico inundado. Também é possível identificar impactos positivos das inundações: os de natureza ambiental, tais como o re-suprimento das águas subterrâneas, a renovação do ecossistema e a manutenção da biodiversidade nas planícies de inundação (MERZ *et al.*, 2004); bem como os de natureza social, ligados à aprendizagem, preparação e percepção de risco (BURN, 1999), à capacitação e mobilização da população para redução da vulnerabilidade e ao desenvolvimento de uma cultura de convivência com as inundações (BRICEÑO, 2007).

As medidas para o controle das inundações podem ser do tipo estrutural ou não estrutural. Segundo TUCCI (2005, p. 63), “medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes, enquanto que as medidas não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes”. As medidas estruturais constituem-se em obras de engenharia implementadas para reduzir o risco de enchentes e podem ser extensivas ou intensivas. Exemplos de medidas estruturais envolvem o controle da cobertura vegetal, o controle da erosão do solo e a construção de diques, *polders* e reservatórios. Uma relação de medidas estruturais, suas aplicações, vantagens e desvantagens é apresentada por TUCCI (2005, p. 66). Comumente, as medidas não estruturais podem minimizar significativamente os prejuízos das inundações, com um custo menor que as estruturais. Essas medidas abrangem o zoneamento das áreas de inundação, reassentamento e realocação de residentes em risco, construções à prova de inundação, seguro de enchente, regra de operação de reservatórios e sistema de previsão e alerta de inundação (TUCCI, 2005, JICA, 1995a). Conforme o caso, uma combinação de medidas estruturais e não estruturais pode ser indicada, para permitir à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio. Exemplos de combinação de medidas e métodos racionais de planejamento e controle de enchentes em diversos países são apresentados em JICA (1995a). Os maiores impactos sobre a população ocorrem quando existe falta de: (1) conhecimento acerca da frequência e níveis das inundações, e (2) planejamento do assentamento e desenvolvimento urbano que leva em consideração o risco de inundação (TUCCI, 2005). A seleção das medidas de

controle de inundação adequada para determinado caso deve ser fruto de um processo de planejamento que concilie proteção social, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica. Esses requerimentos exigem a avaliação dos impactos das enchentes, cujos valores marginais dos prejuízos a serem evitados constituem os benefícios potenciais das medidas a serem adotadas.

7.3.2 Avaliação dos impactos das inundações urbanas

Um conjunto de abordagens vem sendo desenvolvido para avaliar os impactos potenciais e reais das inundações (MACHADO *et al.*, 2007, NASCIMENTO *et al.*, 2006, QUEENSLAND, 2002, TUCCI, 2005, VILJOEN *et al.*, 2001). De maneira geral, o esforço principal de pesquisa tem tido foco antropocêntrico, buscando avaliar os impactos negativos das inundações sobre a população e sua infra-estrutura construída. Esse esforço vem privilegiando a avaliação das perdas diretas e a construção de funções gerais de perdas dependentes de fatores característicos das enchentes e / ou das estruturas atingidas. Essas avaliações são utilizadas para o planejamento e controle das inundações, dentro de um modelo decisório de custo versus benefício. VILJOEN *et al.* (2001) defende a expansão dos esforços atuais, com uma maior inclusão das dimensões social e ambiental, mudança do modelo decisório para o de sustentabilidade ambiental e criação de indicadores não econômicos para a avaliação das perdas intangíveis. Baseado nos trabalhos de Hubert e Ledoux, NASCIMENTO *et al.* (2006) e MACHADO *et al.* (2007) identificam três abordagens para a avaliação dos impactos das inundações: (1) os métodos conceituais, desenvolvidos para avaliar o valor de mercado de bens ou riscos ambientais, que utilizam as técnicas de avaliação contingente e hedônica e são capazes de estimar as perdas tangíveis e intangíveis das inundações; (2) a análise de vulnerabilidade, comumente baseada no uso de indicadores, que visa estabelecer relações entre a aleatoriedade dos eventos hidrológicos de determinadas magnitudes, os indivíduos, bens e propriedades expostos, as perdas potenciais resultantes e os recursos disponíveis para enfrentar os riscos; e (3) a avaliação direta, realizada *ex-post* ou *ex-ante* a ocorrência da inundação, que visa identificar detalhadamente os impactos reais ou potenciais associados ao fenômeno em uma determinada área. As informações resultantes da avaliação direta têm sido utilizadas para o desenvolvimento de funções (ou curvas) de perdas generalizadas para aplicação em situações similares.

Em um contexto mais pragmático, TUCCI (2005) e QUEENSLAND (2002) apresentam métodos para derivar o valor das perdas econômicas diretas de um evento de inundação. TUCCI (2005) cita três métodos identificados por Simons *et al.*:

(1) método da curva nível versus perdas, que permite uma análise combinada com a curva de descarga e a curva de probabilidades de vazões máximas, de onde se pode extrair a curva de probabilidades de perdas; (2) método da curva de prejuízo histórico, que se baseia na determinação dos prejuízos associados às inundações ocorridas no passado e a relação dos mesmos com os níveis registrados; e (3) equação do prejuízo agregado, que se baseia no crescimento linear das perdas em relação ao nível médio da inundação, considerando ainda o valor de mercado, o tamanho e a ocupação da área afetada. QUEENSLAND (2002) classifica os métodos segundo uma ordem decrescente de acurácia: (1) avaliação direta dos bens e propriedades sob risco através de pesquisas individuais; (2) aplicação de curvas de nível versus perdas para avaliar as perdas potenciais; e (3) adoção de um montante de perda média por edificação atingida.

A aplicação de múltiplas funções de perdas conforme o uso das edificações, construídas em relação ao nível das enchentes, tem sido dominante nos estudos de impacto das inundações urbanas. Segundo Smith, citado em THIEKEN *et al.* (2005), as funções de nível versus perdas são vistas como blocos de construção essenciais, sobre as quais as avaliações de perdas de enchentes são baseadas e elas são internacionalmente aceitas como a abordagem padrão para avaliar os prejuízos das inundações urbanas. THIEKEN *et al.* (2005) e MERZ *et al.* (2004) citam o Manual Azul de Penning-Rowse e Chatterton, que contém mais de 150 curvas de nível versus perdas para edificações residenciais e comerciais, como o mais abrangente e referencial estudo na área. As pesquisas mais recentes têm buscado determinar novos fatores condicionantes para a construção dessas funções, bem como estimar as incertezas da avaliação de perdas com o seu uso. THIEKEN *et al.* (2005) apresentam um modelo para análise dos fatores que influenciam os impactos das inundações sobre as edificações urbanas, classificando-os entre cargas e resistências. Assim, durante uma inundação, uma carga hidrológica impacta as edificações, condicionada principalmente pelo nível das águas, concentração de sedimentos, velocidade e duração das enchentes, bem como pela sua contaminação. Por outro lado, tanto as resistências permanentes, como o tipo de construção, material empregado e medidas de proteção adotadas, quanto as temporárias, como os alertas de inundação e o estado de preparação para o evento, são ativadas para conter a carga hidrológica e minimizar as perdas. Segundo as pesquisas de THIEKEN *et al.* (2005), que entrevistaram 1.697 residentes da Alemanha afetados por inundações, as variáveis de impacto das cheias, em especial nível e duração, constituem os fatores principais determinantes das perdas tanto nas edificações como no seu conteúdo. Esse grupo de fatores é seguido pelas variáveis que quantificam o tamanho e o valor das edificações

afetadas. MERZ *et al.* (2004), analisaram cerca de 4.000 registros de prejuízos por inundação na Alemanha e mostram que os dados de perdas possuem distribuição lognormal, com grande variabilidade, mesmo quando estratificados de acordo com o uso da edificação e classes do nível da água. Esse fato impõe à avaliação de perdas por meio dessas funções a exigência de inclusão na análise de um número mínimo de edificações, para determinado intervalo de confiança desejado. Eles ainda comentam sobre a oportunidade de uso de funções relativas de nível versus perdas, como meio de torná-las independentes do valor das edificações e de seu conteúdo, e de uso de informações estatísticas para quantificar as incertezas presentes nessas avaliações.

Um aspecto final na avaliação de impactos das inundações é a distinção entre perdas potenciais e reais, conforme discussão de QUEENSLAND (2002). Algumas das perdas identificadas anteriormente podem ser minimizadas por meio da adoção de medidas de proteção, tais como impermeabilização temporária, evacuação e realocação de bens móveis para áreas livres de inundações. Essas medidas podem reduzir substancialmente as perdas, em especial de vidas humanas e sobre o conteúdo das edificações, se ações forem empreendidas no grau adequado e em tempo hábil. Os principais fatores condicionantes da efetividade da ação de proteção são o tempo e acurácia do alerta e a pronta resposta dos moradores, o último deles intimamente relacionado a fatores comportamentais, tais como a percepção do risco, estado de preparação e experiência com eventos passados (WIND *et al.*, 1999, BURN, 1999). Um sistema de previsão e alerta constitui instrumento essencial na tomada de decisão sobre ações de proteção, visando minimizar as perdas reais sofridas pela população atingida pelas inundações.

7.3.3 Sistema de previsão e alerta de inundações

Um modelo referencial na caracterização de sistema de previsão e alerta de inundações é o concebido por KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a), cujos aspectos teóricos são discutidos por KRZYSZTOFOWICZ (1983a e 1983b) e casos de aplicação são apresentados por KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983b). Esse modelo integra dois subsistemas, o de informação ou previsão, e o de decisão ou resposta, em um único sistema articulado de previsão-resposta de inundações, conforme apresentado na Figura 7.2. No subsistema de informação, podem-se identificar os processos de monitoramento ou coleta de dados hidrometeorológicos, de previsão hidrológica e de disseminação das previsões. No subsistema de decisão, os processos componentes são o de tomada de decisão e de implementação das ações de proteção. Na versão formulada por KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a), o sistema previsão-resposta

captura os dados hidrometeorológicos de campo e produz perdas, que devem ser minimizadas. O mérito principal desse modelo foi integrar o subsistema de decisão ao de previsão, mudando a concepção de desempenho do sistema, de qualidade das previsões para valor das informações. O sistema passa a ser avaliado pelo resultado que produz em termos de redução de perdas, no qual a acurácia da previsão é somente uma parte. Múltiplos aspectos relativos à qualidade das previsões tornam-se relevantes, além dos próprios processos decisórios, nos quais a racionalidade e subjetividade incorporadas são determinantes do resultado final.

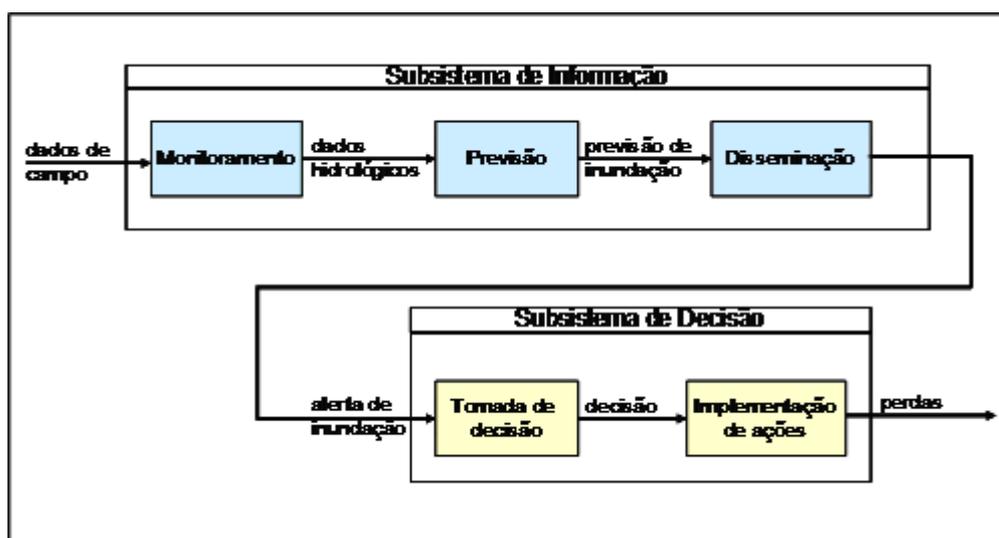


Figura 7.2: Sistema de previsão-resposta de inundações, com os subsistemas de informação e de decisão

Extraída de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS, 1983a, p. 1424.

A análise crítica do modelo previsão-resposta de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a) revela oportunidades de aprimoramento. Em primeiro lugar, percebe-se uma ausência de recebimento de informações e previsões hidrometeorológicas de fontes externas, cujo processamento pode incrementar a qualidade da previsão hidrológica. Nesse sentido, conforme o caso, realça a importância das previsões quantitativas de precipitação, e de suas incertezas, que podem ser determinantes do tempo de emissão e acurácia do alerta de inundações. Em segundo lugar, é possível reconhecer dois PTDs geralmente subsequentes: a decisão de emitir o alerta a partir da previsão, a cargo dos agentes públicos e da defesa civil; e a decisão de implementar ações de proteção, a cargo dos moradores potencialmente afetados. Esses dois processos decisórios são interdependentes e podem ser otimizados em conjunto, de forma a gerar o máximo benefício (KRZYSZTOFOWICZ, 1993). Em terceiro lugar, percebe-se uma relação linear entre os processos e subsistemas, o que revela a ausência de

realimentação do subsistema de decisão para o subsistema de informação. Esse último deveria ajustar-se, dentro de alguma dinâmica, aos requerimentos do primeiro, de forma a produzir previsões de maior valor em relação aos processos decisórios que as utilizam. Essa realimentação deve condicionar os esforços de modernização do subsistema de informação e orientar a melhoria dos processos de monitoramento, previsão e disseminação. Em quarto lugar, o modelo carece de integração com outros processos que devem compor um sistema de gerenciamento de desastres naturais (RAFAELI NETO, 2000). Nesse contexto, o modelo proposto por KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a) é parte integrante de uma das fases constituintes do gerenciamento de desastres naturais, denominado de resposta, que juntamente com a preparação, a recuperação e a mitigação, formam o ciclo de ações permanentes voltado à construção de resiliência e à conseqüente redução do risco a desastres de determinada população (RAFAELI NETO, 2000, BRICEÑO, 2007). As informações e previsões hidrológicas em múltiplas escalas podem favorecer o desenvolvimento das ações não só na eminência e no momento da ocorrência do desastre, mas no pós-ocorrência e no planejamento futuro de médio e longo prazo. Também a modernização do sistema de alerta e a capacitação para o uso de suas informações podem compor ações a serem desenvolvidas nas fases de preparação e mitigação. Em quinto lugar, o modelo proposto precisa ser constituinte de um processo de gestão integrada dos recursos hídricos de determinada bacia, que contribui como medida não estrutural de controle de inundações. Nesse sentido, o funcionamento do sistema de previsão-resposta deve ser integrado à operação de outras estruturas hidráulicas existentes ou planejadas, bem como ser combinado com a execução das demais medidas não estruturais pretendidas (TUCCI, 2005). A Figura 7.3 mostra as modificações e integrações propostas para a concepção de um sistema de previsão e alerta de inundações, utilizado como base referencial neste estudo de valor da informação.

A partir do modelo proposto de sistema de previsão e alerta, e considerando as avaliações acima, identifica-se o objetivo principal que deve ser associado ao sistema: promover a redução das perdas da população potencialmente atingida por inundações por meio da produção de alertas hidrológicos que sejam efetivos na comunicação do tempo e severidade do evento e motivem a tomada de decisão otimizada sobre ações de proteção. Nesse sentido, o sistema deve expandir seus relacionamentos, incorporar novas informações e reforçar processos de gestão integrada de desastres e recursos hídricos, orientar seu processo de melhoria e buscar a otimização do conjunto dos processos decisórios vinculados, levando sempre em consideração os fatores condicionantes, físicos e comportamentais, da efetividade do alerta em determinada comunidade. Dentro desse escopo, algumas idéias vêm sendo defendidas como a

customização dos alertas de acordo com as experiências de inundações vivenciadas pela comunidade (BURN, 1999), emissão do alerta a partir de regras que incorporem as incertezas expressas por meio de previsões probabilísticas (KRZYSZTOFOWICZ, 1993 e 1998) e incorporação do domínio espacial do problema por meio do projeto de sistemas de apoio à decisão espacial (RAFAELI NETO, 2000).

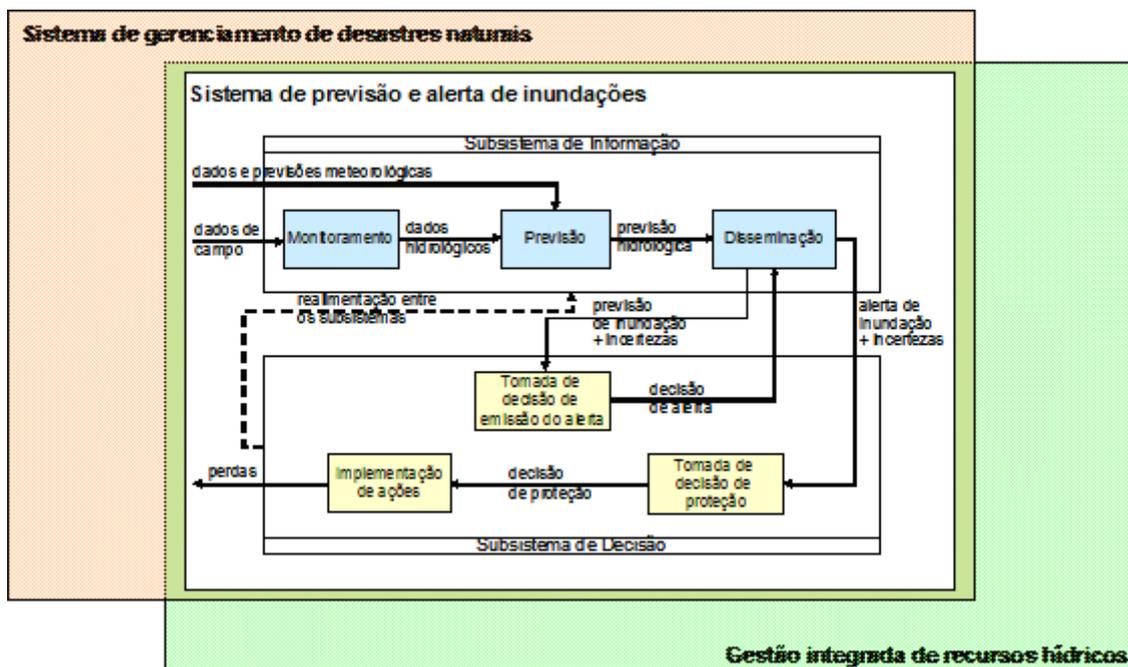


Figura 7.3: Sistema integrado de previsão e alerta de inundações utilizado como base referencial no estudo de valor da informação hidrometeorológica

Adaptado do modelo de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS, 1983a, p. 1424.

Com base na concepção apresentada de sistema integrado de previsão e alerta de inundações, considerou-se neste estudo do valor da informação que o contexto de análise abrange, como ambiente organizacional, a coordenação de defesa civil, responsável pela decisão de emissão do alerta e, como tomadores de decisão individuais, a população potencialmente atingível, responsável pela decisão de proteção de seus bens e propriedades. O objetivo primário que norteia a pesquisa de valor é o da mitigação dos impactos negativos das inundações, com destaque para a redução das perdas materiais impostas à população pelo fenômeno. Nesse sentido, valor da informação será mensurado neste estudo pela sua contribuição na redução das perdas econômicas devido ao recebimento do alerta e conseqüente ação antecipada de proteção de bens móveis em edificações residenciais na cidade de União da Vitória.

7.3.4 O caso das inundações urbanas de União da Vitória

As inundações em União da Vitória têm sido marcadas por alta variabilidade em suas severidades, o que tem afetado o desenvolvimento urbano municipal. Um histórico dos períodos de ocorrência de enchentes na região e a ocupação da planície de inundação, apresentado por TUCCI (2005), mostra um período razoavelmente longo (1935 a 1982), onde só ocorreram enchentes pequenas e médias, e a concomitante ocupação da área de risco de inundação pela população. No início dos anos 80 foi construído o reservatório de Foz do Areia, a cerca de 100 km à jusante de União da Vitória, com a finalidade de produção de energia. Esse reservatório tem capacidade instalada de 1676 MW, sendo o primeiro e o maior da cascata de reservatórios do rio Iguaçu, responsável principal pela regularização da produção de energia na bacia. Após o período de 47 anos de calmaria, a região sofreu quatro grandes inundações (1982, 1983, 1992 e 1993), que impactaram profundamente a economia local e seu ímpeto de desenvolvimento, bem como o estado psicológico e a percepção de risco da população. A área inundada em União da Vitória durante esses eventos correspondeu, em geral, a uma região valorizada, próxima ao centro e com boa infra-estrutura urbana. Estimativas das perdas financeiras devido às inundações mais recentes e significativas ocorridas nas cidades de União da Vitória e Porto União foram levantadas pela JICA (1995a) e são apresentadas na Tabela 7.2. Os valores totais associados a cada inundação apresentados na Tabela 7.2 são casos de valores de controle, de acordo com a terminologia da metodologia proposta.

A falta de memória de grandes inundações anteriores levou a população a acreditar que a causa principal das enchentes foi a construção do reservatório de Foz do Areia, o que determinou o surgimento de um conflito entre a população local e a Companhia Paranaense de Energia, COPEL, responsável pela operação do reservatório. Após uma década de discussão e realização de diversos estudos técnicos (CEHPAR, 1996, TUCCI e VILLANUEVA, 1997), foi definida uma regra operativa para o reservatório de Foz do Areia, que tornou seus impactos sobre as inundações naturais na região, se não desprezíveis, muito pouco significativos. Essas regras foram atualizadas e formalizadas no inventário de restrições operativas hidráulicas dos aproveitamentos hidrelétricos do Operador Nacional do Sistema Elétrico, ONS, garantindo-se o seu cumprimento pela COPEL.

Tabela 7.2: Perdas financeiras causadas pelas inundações de 1983, 1992 e 1993 em União da Vitória (PR) e Porto União (SC)

Perdas Financeiras causadas por Inundações em União da Vitória e Porto União, nos anos de 1983, 1992 e 1993				
Itens considerados	Unidade	Perdas Estimadas		
Ano de Inundação		1983	1992	1993
Numero de edificações inundadas	unidades	7537	5266	2502
Apoio de emergência				
Alocação e realocação de desabrigados	mil Reais	171	111	57
Comida	mil Reais	4.133	3.113	261
Apoio médico e medicamentos	mil Reais	3	3	2
Reparos em estradas e pontes	mil Reais	9.178	478	306
Perdas no sistema de abastecimento	mil Reais	409	585	301
Perdas no sistema de distribuição de energia	mil Reais	2.681	1.137	88
Reparos em edificações	mil Reais	42.762	29.877	14.195
Perdas residenciais	mil Reais	19.513	13.360	-
Perdas comerciais	mil Reais	30.184	10.548	52
Perdas industriais	mil Reais	34.681	14.260	7.057
Perdas na agricultura	mil Reais	3.712	8.727	1.476
Outros	mil Reais	298	1.234	185
Total	mil Reais	147.726	83.435	23.982

Obs: Os valores foram convertidos em reais considerando a variação do dólar de julho / 1993 a julho / 1994 e do INPC no período de julho / 1994 a julho / 2007.

Fonte: Defesa civil das respectivas cidades e CORPRERI, citado em JICA (1995a).

Segundo proposta da JICA (1995a), o problema de inundações em União da Vitória foi considerado grave e deve ser mitigado pela adoção combinada de medidas estruturais e não estruturais. Como medida estrutural, foi proposta a construção de um sistema de diques, com comportas e estações de bombas, considerada viável em estudo preliminar, que apontou custo aproximado da obra de US\$ 86 milhões e relação benefício/custo de 1,91 (JICA, 1995b). Entre as medidas não estruturais, foi identificada a necessidade de: (1) zoneamento das áreas de inundação e realocação da população para fora da zona de passagem da enchente, considerada de alto risco; (2) medidas de impermeabilização e elevação das estruturas para minimização de perdas; (3) estabelecimento de regras operativas adequadas para o reservatório de Foz do Areia; e (4) modernização do sistema de previsão e alerta de inundações. Na última década, os governos municipal e estadual e a sociedade civil organizada, por meio da Comissão Regional Permanente de Prevenção contra Enchentes do Rio Iguaçu – CORPRERI, em trabalho articulado com a população local, têm rediscutido a necessidade da medida estrutural, reavaliado sua convivência com o rio e avançado em ações previstas nas medidas não estruturais. Exemplos dessas ações abrangem o zoneamento e sua incorporação na proposta de plano diretor da cidade, implantação de áreas de preservação e parques em zonas de risco, definição de regras operativas do reservatório de Foz do Areia que não agravam a severidade das inundações, e implantação de um sistema de monitoramento e previsão hidrometeorológicos no Rio Iguaçu, operado e mantido em parceria pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR e COPEL.

Em relação a esse sistema de informações hidrometeorológicas, vale destacar a infra-estrutura de monitoramento implantada, que compreende estações telemétricas automáticas, hidrológicas e meteorológicas, radar meteorológico Doppler e estações de recepção de imagens de satélite, bem como as abordagens de previsão hidrológica em uso, que compreendem tanto modelos estocásticos quanto conceituais, do tipo chuva-vazão. As oportunidades de melhoria contemplam a incorporação da previsão de precipitação no subsistema de previsão hidrológica e, principalmente, o estabelecimento de estratégias de emissão do alerta e uso das previsões na implementação de ações de proteção contra inundações. Essas oportunidades motivaram o desenvolvimento deste estudo de valor, que buscou estabelecer os condicionantes para a construção do valor da informação de alerta e analisar sua sensibilidade à qualidade das previsões de vazão, nível e precipitação, com foco no caso das inundações em União da Vitória.

7.4 Pressupostos iniciais

Alguns pressupostos iniciais foram considerados neste estudo de valor da informação. Os motivadores principais para o seu estabelecimento foram a necessidade de delimitar o escopo do estudo, a ausência de conhecimento sobre teorias ou modelos explicativos e a oportunidade de simplificação da análise, sem perda de relevância nos resultados finais.

Um primeiro pressuposto relaciona-se aos períodos selecionados para a realização do estudo de valor e para a calibração dos modelos de previsão hidrológica. O período de estudo abrangeu de 1930 a 1999, compreendendo 70 anos; o período de calibração abrangeu de 2000 a 2006, compreendendo 7 anos. As séries históricas de nível e vazão utilizadas no período de estudo, obtidas junto à Agência Nacional de Águas, ANA, correspondentes à estação hidrológica de União da Vitória (código 65310000, posto fluviométrico da ponte ferroviária, seção UV), foram consideradas como homogêneas, estacionárias e representativas do comportamento hidrológico do local. As séries de nível, vazão e precipitação mais recentes, utilizadas no período de calibração, foram obtidas junto ao Instituto Tecnológico SIMEPAR, provenientes do sistema de monitoramento hidrometeorológico do Iguaçu. Apesar dessas últimas séries não contemplarem inundações extensivas em União da Vitória, elas foram consideradas suficientes para ajustar os modelos de previsão hidrológica, que são estocásticos e diferenciais, não exigindo expressiva amostragem de vazões extremas.

O segundo pressuposto foi a consideração de que a operação do reservatório de Foz do Areia não interferiu nos níveis registrados de inundação em União da Vitória,

situação que deve se manter no futuro. Conforme comentado acima, foram estabelecidas e formalizadas restrições operativas que tornam desprezíveis a influência do reservatório nos níveis de inundação na cidade. Mesmo que as séries de vazão correspondentes ao período pós-construção do reservatório registrem alguma influência de regras operativas anteriores, essas não foram significativas em grandes enchentes, conforme estudo de TUCCI e VILLANUEVA (1997).

Um terceiro pressuposto foi a utilização de modelos normativos para a representação dos processos decisórios de emissão do alerta e de implementação de ações de proteção. Os condicionantes comportamentais que afetam os PTDs foram considerados de forma simplificada, reunidos em uma propensão a evitar custos, que se manifesta por meio de um adiamento da tomada de decisão até a obtenção de novas informações. A motivação para essa abordagem foi fundamentada na carência de modelos descritivos, completos e confiáveis, capazes de expressar o resultado do PTD em função de variáveis quantificáveis com suficiente acurácia, dentro do contexto geral da decisão sob riscos de desastres naturais. Muitas pesquisas acerca do comportamento humano sob riscos vêm sendo realizadas, envolvendo trabalho teórico, pesquisas de campo e experimentos em laboratórios, mas a vasta maioria é qualitativa, sendo raros os dados e modelos quantitativos. Uma exceção é o modelo de FERRELL e KRZYSZTOFOWICZ (1983), que busca reproduzir o comportamento real do indivíduo sob risco de inundação por meio da representação matemática de quatro elementos cognitivos de resposta interconectados: (1) incerteza *a priori* acerca da inundação e das perdas; (2) inferência seqüencial baseada nos alertas sucessivos durante a enchente; (3) estratégia de resposta; e (4) aprendizagem depois do evento de inundação. Apesar de sua adequação ao caso em estudo, seus autores reconhecem a representação, mais como uma tentativa, do que como um modelo descritivo da resposta humana para alertas de inundações. Além disso, seu uso exige a quantificação de múltiplos parâmetros de difícil estimativa, tais como constantes de tempo de esquecimento e aprendizagem das enchentes e das perdas, disposição em acreditar nos alertas, limites acerca das possibilidades de perda para a ação de proteção e regras de aprendizagem com eventos passados.

7.5 Etapas componentes do estudo

O projeto de estudo do valor da informação foi organizado de acordo com o esquema estruturado de simulação e análise do valor da informação hidrometeorológica, cujo diagrama de bloco é apresentado na Figura 6.2. Assim, inicialmente, são descritos os componentes hidrológicos de simulação do

comportamento histórico e de geração das previsões. Em seguida, é discutida a avaliação dos impactos das inundações e são apresentados os modelos de tomada de decisão de emissão de alerta e de implementação de ações de proteção. Na última etapa, são apresentadas as metodologias de análise do desempenho do sistema e do valor da informação de alerta de inundações.

7.5.1 Simulação do comportamento hidrológico em União da Vitória

Aspectos operacionais de um sistema de alerta de inundações, como as frequências de coleta e transmissão dos dados monitorados e de atualização das previsões possuem um grande impacto nos benefícios vinculados ao sistema, em especial, na antecipação de situações críticas. Nesse sentido, considerando a disponibilidade de dados monitorados no presente e o comportamento hidrológico do rio Iguaçu em União da Vitória, que pode apresentar variações de nível de aproximadamente -20 a 50 cm no intervalo de 6 horas, definiu-se que a frequência mínima de operação do sistema deve ser de 6 horas. Esse fato gerou a necessidade de desagregar a série histórica disponível em base diária (1930-1999), para a criação de uma nova série, com dados a cada 6 horas, para uma avaliação realística de funcionamento de um sistema de alerta de inundações. Isto foi realizado por meio do desenvolvimento de quatro modelos de regressão linear múltipla, um para cada final do intervalo de 6 horas do dia, utilizando-se da série de dados horários do período de calibração (2000-2006). Numa etapa inicial de identificação, foram selecionados iterativamente os subconjuntos de melhores preditores, considerando-se a análise das matrizes de correlação, a partir de uma lista que abrangeu os dados diários do dia de referência, dos anteriores e posteriores, bem como os dados a cada 6 horas do dia de referência e dos anteriores. Na etapa de estimação dos parâmetros, foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados, implementado em um aplicativo estatístico, que gerou modelos de elevado coeficiente de determinação (maior que 0,999). Na etapa de verificação dos modelos, foram realizadas análises de variância, com aplicação do teste F , para avaliação do ajuste geral dos modelos, e análises do desvio padrão associado a cada coeficiente, com aplicação do teste t de *Student*, para avaliação da significância dos coeficientes nos modelos. Em ambos os testes, foram exigidos níveis de significância de 5 % (valor de $p \leq 0,05$). Também nessa etapa se verificou o comportamento dos resíduos, quanto aos seguintes aspectos: (1) ausência de correlação, através da análise das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial; (2) normalidade, por meio da análise da distribuição de frequências e checagem dos coeficientes de assimetria e curtose; e (3) estacionariedade da média e variância, por

meio da curva temporal dos resíduos e da dispersão dos resíduos em relação à série original. Os modelos gerados foram os seguintes:

$$q_6^0 = 0,312 + 0,574q_d^0 - 0,059q_d^1 - 0,183q_d^{-1} + 0,013q_d^{-2} + 0,605q_{24}^{-1} + 0,049q_{12}^{-1} + \varepsilon(0; 3,35) \quad (7.1a)$$

$$q_{12}^0 = 0,379 + 1,07q_d^0 - 0,033q_d^1 - 0,198q_d^{-1} + 0,078q_6^0 - 0,101q_{24}^{-1} - 0,053q_{18}^{-1} + 0,237q_{12}^{-1} + \varepsilon(0; 2,92) \quad (7.1b)$$

$$q_{18}^0 = 2,04q_d^0 + 0,045q_d^1 - 0,007q_d^2 - 0,922q_6^0 - 0,188q_{12}^0 + 0,029q_{24}^{-1} + \varepsilon(0; 2,43) \quad (7.1c)$$

$$q_{24}^0 = 0,343q_d^1 - 0,053q_d^2 - 0,053q_6^0 - 0,213q_{12}^0 + 0,975q_{18}^0 + \varepsilon(0; 4,74) \quad (7.1d)$$

onde:

q_d^i - vazão diária correspondente ao dia de referência ($i=0$), dias anteriores ($i=-1$ ou -2) e posteriores ($i=1$ ou 2);

q_h^i - vazão correspondente à hora h do dia de referência ($i=0$) ou de dias anteriores ($i=-1$ ou -2); e

$\varepsilon(\bar{x}; \sigma)$ - resíduo representado por uma variável aleatória de distribuição normal, de média \bar{x} e desvio padrão σ .

O encadeamento das vazões correspondentes às horas 6, 12, 18 e 24, para todos os dias do histórico formam uma nova série, onde diferentes seqüências aleatórias na geração dos resíduos, que possuem médias nulas e pequenos desvios padrão, têm pouca significância nas características estatísticas da série. Como era de se esperar, a comparação da nova série com a original diária revelou grande similaridade em relação às medidas de tendência central, de dispersão, assimetria e curtose, bem como em relação aos seus percentis. A nova série de vazões de 6 em 6 horas, considerada neste estudo como representativa do comportamento hidrológico do rio Iguaçu em União da Vitória, é mostrada na Figura 7.4.

7.5.2 Geração das previsões hidrológicas de vazão e nível

Para simular o processo de previsão hidrológica foram selecionados dois modelos capazes de produzir estimativas sobre o comportamento futuro da vazão e do nível. O primeiro foi o modelo auto-regressivo, do tipo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), o segundo foi um modelo baseado em filtro de Kalman, ambos considerados como estocásticos-empíricos na classificação proposta por CLARKE (1973). Os motivadores gerais para a seleção desses modelos foram os seguintes: (1) uso disseminado na gestão de recursos hídricos; (2) disponibilidade de dados compatível com as demandas dos modelos; (3) capacidade dos modelos de

tratar com certos casos de não estacionariedade; (4) facilidade de desenvolvimento e implementação; e (5) robustez operacional quanto a perturbações nos dados de entrada. Ambos os modelos produzem previsões de vazão e a previsão de nível é obtida por meio da relação nível versus vazão representativa da seção do rio no local de interesse. Os requerimentos de dados, a metodologia empregada e aspectos relevantes de implementação incluídos são discutidos para cada modelo. A verificação da qualidade das previsões geradas pelos modelos foi realizada com o propósito de avaliar sua relação com o valor do alerta derivado dessas informações.

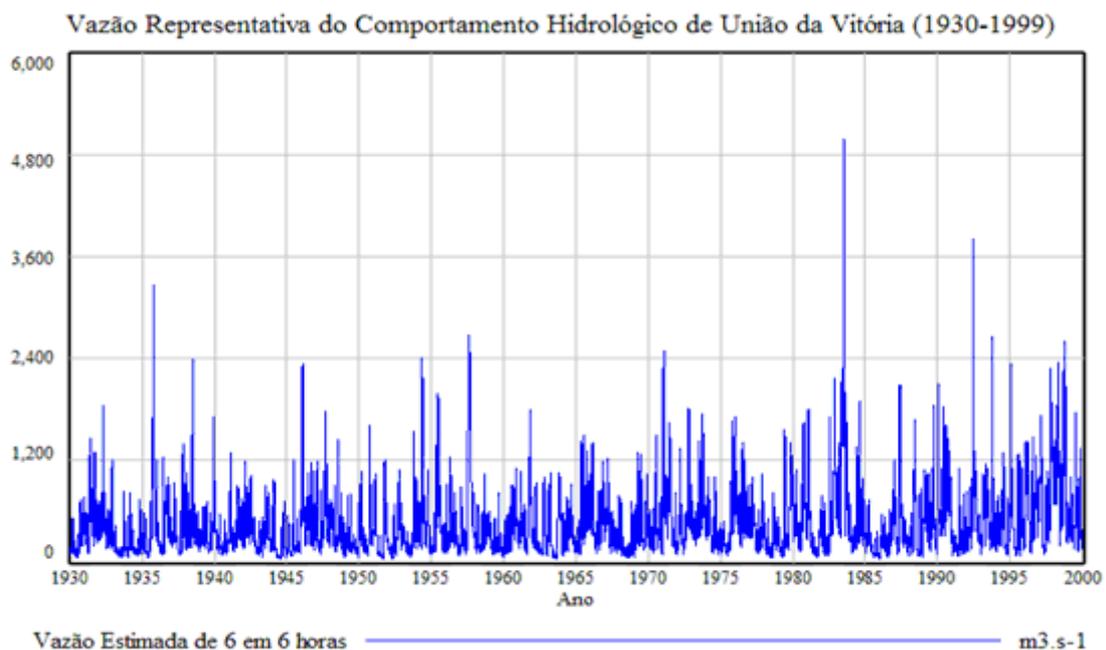


Figura 7.4: Vazão representativa do comportamento hidrológico do rio Iguaçu em União da Vitória, para os anos de 1930 a 1999

Fonte: Série estimada a partir de dados da Agência Nacional de Águas e do Instituto Tecnológico Simepar.

7.5.2.1 Verificação da qualidade das previsões

Um processo de verificação de previsões hidrometeorológicas pode assumir grande dimensionalidade, estar focado na realização de avaliações absolutas ou relativas, e ser orientado tanto para seleção de medidas quanto para a análise das características estatísticas da distribuição conjunta de probabilidades entre previsões e observações. (KATZ e MURPHY, 1997a; WILKS, 1995). Uma questão a ser considerada na verificação das previsões é o conjunto de aspectos de qualidade a ser analisado. Nesse sentido, de acordo com os conceitos discutidos por KATZ e MURPHY (1997a), é possível avaliar medidas relativas à acurácia, associação, acurácia relativa à climatologia (*skill*) e existência de erro sistemático (*bias*). Conforme

a definição de evento e tipo de previsão, outros aspectos de qualidade também podem ser investigados, como confiabilidade, resolução, discriminação e refinamento.

No âmbito deste estudo, foram analisadas medidas relativas à acurácia, à associação linear e ao erro sistemático. Para análise da acurácia, conforme definições de JOLLIFFE e STEPHENSON (2003), utilizaram-se medidas clássicas baseadas nos momentos de primeira ordem, o erro médio absoluto, *EMA*, e, de segunda ordem, o erro médio quadrático, *EMQ*. Em vistas de favorecer a análise da acurácia, revelando a significância da orientação dos erros, a medida do erro médio quadrático foi dividida entre erro médio quadrático positivo e negativo, assim definidos:

$$EMQ(f, x) = EMQ^+(f, x) + EMQ^-(f, x) \quad (7.2a)$$

$$EMQ^+(f, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\zeta(f_i - x_i)]^2 \quad (7.2b)$$

$$EMQ^-(f, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\zeta(x_i - f_i)]^2 \quad (7.2c)$$

$$\begin{aligned} \zeta(a - b) &= a - b \quad \text{se } a > b \\ &= 0 \quad \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (7.2d)$$

onde:

f_i e x_i - valor previsto para o tempo i e valor observado nesse tempo;

EMQ^+ - erro médio quadrático positivo; e

EMQ^- - erro médio quadrático negativo.

Para análise da associação, foi utilizado o coeficiente de correlação do produto dos momentos, ρ , também conhecido como coeficiente de Pearson, conforme apresentado por JOLLIFFE e STEPHENSON (2003). Essa medida é adimensional, positivamente orientada e invariante a mudanças na média ou na escala da previsão ou observação. Para análise de existência de erro sistemático, foi utilizada a medida do erro médio, *EM*, calculado pela diferença entre as médias prevista e observada. A análise conjunta dessas medidas permite avaliar o grau de correspondência entre previsões e observações em diversas circunstâncias, e a investigação de sua relação com o valor da informação pode revelar aspectos gerais de qualidade relevantes para o processo de construção de valor.

7.5.2.2 Modelo auto-regressivo tipo ARIMA

Uma vantagem de uso do modelo ARIMA neste estudo é seu projeto requerer dados exclusivamente de vazão do próprio local, o que permite sua simulação direta e única sobre os dados da série histórica estimada, representativa do comportamento hidrológico de União da Vitória. Assim, o modelo foi concebido para utilizar somente dados de vazão de 6 horas do próprio local de interesse e dados recentes (2000-

2006), provenientes do subsistema de monitoramento hidrometeorológico do rio Iguaçu, foram utilizados em sua calibração.

Os modelos auto-regressivos integrados com médias móveis, denotados ARIMA, de dimensão (p, d, q) , onde p é o número de termos auto-regressivos, d é a ordem de diferenciação da série de dados necessária para se obter um processo estacionário e q é o número de termos de média móvel, possuem a seguinte formulação geral:

$$W_t = \nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t \quad (7.3a)$$

$$W_t = \alpha_1 W_{t-1} + \dots + \alpha_p W_{t-p} + \varepsilon_t + \beta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \beta_q \varepsilon_{t-q} \quad (7.3b)$$

onde:

- X_t - variável original da série temporal;
- W_t - variável resultante da d -ésima diferença aplicada sobre a variável original;
- B - operador de retardo, utilizado para referência a dados anteriores ($B^j X_t = X_{t-j}$);
- $\varepsilon_t, \varepsilon_{t-1}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ - resíduos observados do modelo nos tempos de referência $t, t-1, \dots, t-q$;
- $\alpha_1, \dots, \alpha_p$ - coeficientes auto-regressivos do modelo ARIMA; e
- β_1, \dots, β_q - coeficientes de média móvel do modelo ARIMA.

No desenvolvimento desse modelo, seguiu-se a metodologia de identificação, estimação e verificação de modelos proposta por Box e Jenkins, conforme processo iterativo apresentado por BRAS e RODRÍGUEZ-ITURBE (1993). Nesse sentido, na etapa de identificação, procedeu-se à análise das funções de autocorrelação (FAC) e autocorrelação parcial (FACP), para identificar o número e o tipo de parâmetros necessários (auto-regressivos, média móvel e diferenciação). Na etapa de estimação dos parâmetros do modelo, utilizou-se o método de McLeod e Sales, denominado Método Aproximado da Máxima Verossimilhança, implementado em um aplicativo estatístico, no qual, iterativamente, testou-se a viabilidade do número e tipos de parâmetros considerados. Na etapa de verificação do modelo, investigou-se a adequação do número de parâmetros, por meio do método de verificação de Hipel, apresentado por BRAS e RODRÍGUEZ-ITURBE (1993). Também se investigou o comportamento dos resíduos, quanto à ausência de correlação, normalidade e estacionariedade da média e variância, de forma similar ao comentado no item 7.5.1.

O emprego dessa metodologia permitiu o desenvolvimento de um modelo de previsão ARIMA de dimensão $(p, d, q)=(2,1,2)$. O modelo desenvolvido, que apresentou resíduos com desvio padrão de 7,74 m³/s, foi o seguinte:

$$\Delta q_{t+6} = q_{t+6} - q_t \quad (7.4a)$$

$$\Delta q_{t+6} = 1,232\Delta q_t - 0,351\Delta q_{t-6} - 0,3416\varepsilon_t + 0,090\varepsilon_{t-6} + \varepsilon_{t+6} \quad (7.4b)$$

onde:

- q_t - valor da vazão no tempo de referência t medido em horas;
 Δq_t - diferença entre vazões no tempo de referência t e no tempo anterior $t-6$; e
 ε_t - resíduo dado pelo desvio entre o valor estimado e o valor observado no tempo de referência t .

O modelo foi implementado para produzir, de forma recursiva, previsões de 6 em 6 horas até o horizonte de 96 horas. Sua aplicação sobre a série histórica estimada revelou aspectos concernentes à sua capacidade preditiva, que foram verificados e cujos resultados são apresentados no item 7.6.1.

7.5.2.3 Modelo baseado em filtro de Kalman

As motivações para o desenvolvimento de um modelo baseado em filtro de Kalman para compor o sistema de alerta de inundações de União da Vitória abrangeram: a disponibilidade atual de dados de vazão e precipitação para diversos locais na bacia; a implantação prevista de um processo de previsões de precipitação por categorias na região; e a capacidade preditiva, o conhecimento e potencial de uso desse tipo de modelo na área de gestão de recursos hídricos. Os requerimentos de dados de entrada previstos no modelo incluíram informações não disponíveis em base histórica, para todos os locais e frequências desejadas, o que exigiu o desenvolvimento de método específico para simulação do modelo sobre a base histórica estimada.

De acordo com ANDERSON e MOORE (2005), um modelo básico de sinais associado a um sistema linear, finito e discreto no tempo, pode ser descrito pelas seguintes equações de estado:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{G}_k \mathbf{w}_k \quad (7.5a)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{y}_k + \mathbf{v}_k = \mathbf{H}_k' \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (7.5b)$$

onde $\mathbf{x}_0, \mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k$ representam variáveis vetoriais conjuntamente gaussianas e mutuamente independentes, \mathbf{x}_0 é o estado inicial do sistema, considerado aleatório e de distribuição normal $N(\bar{\mathbf{x}}_0, \mathbf{P}_0)$, e as seqüências $\{\mathbf{v}_k\}$ e $\{\mathbf{w}_k\}$ constituem-se em processos de ruídos brancos, com médias nulas e covariâncias respectivamente iguais a $\mathbf{R}_k \delta_{kl}$ e $\mathbf{Q}_k \delta_{kl}$ ($\delta_{kl} = 1$ para $k = l$ e $\delta_{kl} = 0$ para $k \neq l$). Nessas circunstâncias, um modelo de filtro de Kalman admite a seguinte formulação geral recursiva:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = (\mathbf{F}_k - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k') \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k \quad (7.6a)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{F}_k \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k' (\mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (7.6b)$$

$$\Sigma_{k+1/k} = \mathbf{F}_k [\Sigma_{k/k-1} - \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k' (\mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k + \mathbf{R}_k)^{-1} \mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1}] \mathbf{F}_k' + \mathbf{G}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{G}_k' \quad (7.6c)$$

onde:

- \mathbf{x}_k - vetor de variáveis de estado para o tempo k , cuja seqüência temporal constitui um processo markoviano;
- \mathbf{H}_k' - matriz representativa do processo de mensuração das variáveis de estado \mathbf{x}_k , cujo resultado \mathbf{z}_k é perturbado por um processo de ruído \mathbf{v}_k ;
- \mathbf{F}_k - matriz representativa do processo de transição de estado de \mathbf{x}_k para \mathbf{x}_{k+1} , cujo resultado é afetado pelo processo de entrada do sistema;
- \mathbf{G}_k - matriz representativa do processo de entrada do sistema, que condiciona o ruído de entrada \mathbf{w}_k ;
- $\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k}$ - estimativa recursiva para o valor da variável de estado no tempo $k+1$, cuja condição inicial deve ser $\hat{\mathbf{x}}_{0/-1} = \bar{\mathbf{x}}$;
- $\Sigma_{k+1/k}$ - matriz de covariância das variáveis de estado no tempo $k+1$, cuja condição inicial deve ser $\Sigma_{0/-1} = \mathbf{P}_0$; e
- \mathbf{K}_k - matriz de ganho no tempo k .

Na configuração do filtro de Kalman como modelo de previsão, conforme utilizado neste estudo, o preditante no tempo k , y_k , foi considerado como uma combinação linear de preditores u_k^i e os estados do modelo x_k^i representaram os coeficientes dessa combinação linear. Assim:

$$y_k = \sum_{i=1}^n \alpha_k^i u_k^i \quad (7.7a)$$

$$x_k^i = \alpha_k^i \quad \forall i=1, \dots, n \quad (7.7b)$$

Dentro desse contexto, o modelo básico de sinais e o filtro de Kalman correspondente podem ser simplificados, assumindo as seguintes configurações:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{F}_k = \mathbf{G}_k = \mathbf{I} \quad (7.8a)$$

$$\mathbf{H}_k' = [u_k^1, u_k^2, \dots, u_k^n] \quad (7.8b)$$

$$\mathbf{z}_k = [y_k], \quad \mathbf{v}_k = [v_k] = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k' \mathbf{x}_k \quad (7.8c)$$

e

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k'] \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{z}_k \quad (7.9a)$$

$$\mathbf{K}_k = \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k' [\mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (7.9b)$$

$$\Sigma_{k+1/k} = \Sigma_{k/k-1} - \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k' [\mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1} \mathbf{H}_k + \mathbf{R}_k]^{-1} \mathbf{H}_k' \Sigma_{k/k-1} + \mathbf{Q}_k \quad (7.9c)$$

onde $\mathbf{R}_k = E[v_k^2]$ e $\mathbf{Q}_k = E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k']$. As equações recursivas (7.9a) e (7.9c) devem ser inicializadas considerando-se $\hat{\mathbf{x}}_{0/-1}$ como a estimativa *a priori* dos coeficientes e $\Sigma_{0/-1}$ como a matriz de covariância *a priori* dos coeficientes.

O desenvolvimento do modelo seguiu orientação de ANDERSON e MOORE (2005) e BRAS e RODRÍGUEZ-ITURBE (1993). De acordo com a formulação apresentada, foi projetada e implementada uma solução baseada em filtro de Kalman, discreto no tempo, para um total de 20 estados, correspondentes aos coeficientes de um sistema linear de previsão. O preditante foi definido como a diferença entre a vazão futura no tempo desejado e a vazão atual. Na estimação dos estados, foram utilizadas as seguintes categorias de preditores: (1) diferenças de 6 horas, atuais e passadas, entre vazões observadas na sub-bacia de interesse, União da Vitória; (2) diferenças de 6 horas, atuais e passadas, entre vazões observadas nas duas sub-bacias vizinhas a montante, Fluvioópolis e Timbó; (3) precipitações acumuladas em 6 horas, estimadas para as três sub-bacias da região e (4) previsões quantitativas de precipitação, para a região formada pelas três sub-bacias, com horizonte total de 24 horas, segmentadas em quatro períodos de 6 horas. Após análise de sensibilidade do modelo hidrológico e da capacidade preditiva da precipitação na região, por sistemas subjetivos e objetivos, decidiu-se utilizar previsões de precipitação categorizadas em cinco classes: nula, baixa (até 2,5 mm acumulados em 6 h), média (de 2,5 a 10 mm), alta (de 10 a 20 mm) e severa (acima de 20 mm), e usar como preditor a média da precipitação correspondente a cada classe (0; 0,542; 5,579; 14,27 e 32,24 mm acumulados em 6 h).

Um aspecto inovador incluído na implementação do modelo foi conceber o funcionamento paralelo de múltiplos filtros de Kalman independentes, conforme o horizonte de previsão desejado (de 6 em 6 até 96 horas) e a situação de existência ou não de precipitação prevista ou observada na bacia. Assim as situações de subidas e descidas da hidrógrafa, quando associadas à ocorrência de precipitação, são tratadas de forma diferenciada. Dessa forma, essa implementação múltipla do modelo preserva coeficientes especializados em cada horizonte de previsão e situação de precipitação, mantendo as atualizações de estado independentes uma da outra.

A indisponibilidade das previsões de precipitação no momento do estudo motivou a análise de sensibilidade do valor do alerta hidrológico, condicionado pela

informatividade dessas previsões, a exemplo de pesquisas afins realizadas por LEITE *et al.* (2006), LEITE e ROTTUNNO FILHO (2006) e LEITE *et al.* (2007). Para a realização dessa análise de sensibilidade, fez-se necessário a construção de distintas estruturas de erros das previsões por categoria para a região, na forma de matrizes de verossimilhança, que formam a base para a geração de previsões sintéticas de precipitação, que devem alimentar os modelos hidrológicos. Para representar essas estruturas de erros, decidiu-se pela construção de uma seqüência de matrizes condicionais da previsão, dado a categoria da precipitação, ordenada pela sua informatividade estatística. Esse conceito, discutido por LAWRENCE (1999), qualifica a estrutura de erros, garantindo uma relação direta dessa estrutura com a sua utilidade econômica derivada. As matrizes genéricas da previsão, condicionais ao estado, cujos elementos são do tipo $P(f_i | x_j)$, podem ser geradas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} P(f_i | x_j) &= \theta + (1 - \theta)P(x_j) \quad \text{para } i = j \\ &= (1 - \theta)P(x_j) \quad \text{para } i \neq j \end{aligned} \quad (7.10)$$

onde:

- f_i - previsão da variável de estado na categoria i ;
- x_j - ocorrência da variável de estado na categoria j ;
- θ - informatividade ($0 \leq \theta \leq 1$, com os valores 0 e 1 correspondendo respectivamente à previsão climatológica e perfeita); e
- $P(x_j)$ - probabilidade climatológica de ocorrência da variável de estado na categoria j .

O esquema acima garante a geração de estruturas de erros ordenadas, de forma crescente, pelo valor da informação derivada, quando se varia a informatividade de 0 a 1. Outra característica do esquema proposto por LAWRENCE (1999) é a geração de previsões que apresentam calibração preditiva para todas as categorias, ou seja, a probabilidade de geração de uma previsão de determinada categoria é igual à probabilidade climatológica daquela categoria. O resultado dessa última característica é a geração de previsões sem erro sistemático (*bias*), mas de distintas variâncias. A geração das previsões hidrológicas a partir do modelo de filtro de Kalman foi então realizada com as informações disponíveis do período de calibração, considerando-se uma estimativa inicial simplificada dos parâmetros (coeficiente relativo à diferença observada de vazão para o local de interesse igual a um, demais iguais a zero) e previsões de precipitação condicionadas pela escolha da informatividade. Essas últimas previsões foram geradas pelo método de Monte Carlo, a partir do

conhecimento do valor observado de precipitação x_j e, conseqüentemente, da distribuição de probabilidades $P(f_i | x_j)$. Para simplificação do problema, considerou-se uma matriz de verossimilhança única para os quatro períodos de 6 horas da previsão de 24 horas. O modelo foi executado com 11 valores de informatividade ($\theta=0;0,1;0,2;\dots,1$), identificados por $\theta_0, \theta_0,1, \theta_0,2,\dots, \theta_1$, bem como com a previsão de precipitação sempre nula (p_0) e a previsão perfeita até 24 horas (p_1). Uma análise da sensibilidade das previsões de vazão em relação ao número de seqüências aleatórias utilizadas no processo de geração das previsões de precipitação, para uma mesma informatividade, revelou baixa dispersão e rápida convergência da média em relação às medidas de qualidade analisadas (erro médio, erro médio absoluto, erro médio quadrático total, positivo e negativo e coeficiente de correlação). Considerando-se todas as medidas, o coeficiente de variação de 100 seqüências de simulação foi inferior a 0,02 e a média de 10 seqüências alternativas diferiu menos que 0,4 % da média das 100 seqüências, o que motivou a escolha do limite de 10 seqüências como suficiente para o estudo do comportamento da vazão com relação à informatividade.

Um último aspecto considerado foi a definição de um método capaz de gerar previsões de vazão com a mesma estrutura de erros desse modelo baseado em filtro de Kalman, para a série histórica estimada, onde não existem dados suficientes para executar o modelo. O método selecionado, após diversas experiências, foi o de construção de matrizes condicionais de verossimilhança das diferenças de vazão, capazes de expressar a incerteza observada das previsões em relação aos dados monitorados. Diversos métodos têm sido utilizados para derivar essas estruturas de erro, tais como: a construção de funções de verossimilhança do tipo linear-normal (KRZYSZTOFOWICZ, 1992); ajuste de modelos teóricos de distribuição de probabilidades, diretamente ou por meio de transformações (KELLY e KRZYSZTOFOWICZ, 1994); uso de funções ou modelos de distribuição de probabilidades condicionais à variáveis caracterizadoras do estado do sistema hidrológico (KRZYSZTOFOWICZ, 1999 e 2002); e uso de modelos markovianos discretos para simular o comportamento do sistema predictor (KRZYSZTOFOWICZ, 1983b). A opção metodológica utilizada neste estudo foi a de construção direta de matrizes de verossimilhança, a partir da estimação numérica da distribuição de probabilidade condicional no período de calibração, por meio do levantamento do número de ocorrências de classes de diferenças de vazões previstas e observadas. Assim, pode-se observar um conjunto de características dessa opção metodológica: (1) a variável de estado é a diferença de vazão, o que é adequada a modelos

diferenciais, como o de filtro de Kalman utilizado neste estudo; (2) as distribuições de probabilidades, componentes das matrizes de verossimilhança, são construídas e mantidas como um conjunto de pontos no espaço diferença de vazão versus probabilidade acumulada, o que não introduz erros do ajuste de funções ou modelos teóricos simplificadores; e (3) as distribuições são condicionais às diferenças observadas de vazão, bem como às diferenças previstas anteriores, formando um tipo de processo markoviano que traduz as dependências temporais existentes na série de previsões e de sua relação com a série de observações. Dessa forma, as matrizes de verossimilhança construídas possuem elementos do seguinte tipo:

$$\Delta f^{6i} = f^{6i} - f^{6i-6} \quad \text{para } i=1 \text{ a } 16 \quad (7.11a)$$

$$f^0 = q^0 \quad (7.11b)$$

$$\Delta q^{6i} = q^{6i} - q^{6i-6} \quad (7.11c)$$

$$P(\Delta f^{6i} | \Delta q^{6i}, \phi_1, \phi_2) = P(\Delta f^{6i} | \Delta q^{6i}, \Delta q^0 + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta f^{6j}, \sum_{j=1}^i \Delta f_{-6}^{6j}) \quad (7.11d)$$

onde:

f^{6i} e q^{6i} - previsão de 6 em 6 horas, até o horizonte total de 96 horas ($i=1$ a 16) e a vazão observada correspondente;

Δf^{6i} e Δf_{-6}^{6i} - diferenças entre previsões de 6 horas, realizadas em um tempo qualquer e no tempo anterior de 6 horas;

Δq^{6i} - diferença observada entre vazões de 6 horas, correspondente às previsões Δf^{6i} ;

ϕ_1 - fator condicional da probabilidade da diferença entre previsões de 6 horas, relativo ao histórico das previsões já realizadas no tempo de referência; e

ϕ_2 - fator condicional da probabilidade da diferença entre previsões de 6 horas, relativo ao histórico das previsões realizadas no tempo anterior ao de referência;

As distribuições de probabilidade $P(\Delta f^{6i} | \Delta q^{6i}, \phi_1, \phi_2)$ são calculadas para cada horizonte de previsão $6i$ ($i=1$ a 16), e cada simulação de informatividade, previsão nula e perfeita. De forma a manter o problema tratável computacionalmente e obter uma amostra significativa em cada combinação de fatores condicionais, Δq^{6i} , ϕ_1 e ϕ_2 , foram considerados os seguintes números de classes: 20 para as diferenças de previsões e vazões e três para os parâmetros ϕ_1 e ϕ_2 . Interesses nas situações de diferenças

significativas e na melhor representação das distribuições de probabilidade motivaram a escolha de limites de classes que privilegiaram os percentis extremos.

A opção pelo levantamento das probabilidades das diferenças contornou um problema crítico na estimativa de erros em eventos severos, que é o reduzido tamanho da amostra dos pares previsão–vazão, que afeta a qualidade e o valor das previsões probabilísticas derivadas (THOMPSON e ZUCCHINI, 1990). A análise de múltiplas seqüências de previsões geradas a partir das matrizes de verossimilhança construídas mostrou capacidade do processo de representar os principais erros observados: defasagem temporal da previsão na subida da hidrógrafa e super-dimensionamento da crista de vazão, ambos crescentes com o horizonte de previsão. Também a comparação de medidas de qualidade, no período de calibração, entre as previsões geradas pelo modelo de filtro de Kalman e pelas matrizes de verossimilhança mostrou fortes similaridades, tanto nas variações do horizonte de previsão quanto na informatividade. Os cálculos foram realizados tomando-se as médias das medidas de 10 simulações realizadas para cada caso e a análise indicou erros similares, mesmo quando segmentados entre positivos e negativos. Algumas comparações entre as acurácias das previsões, medidas pelo erro médio quadrático, são mostradas na Figura 7.5 e Figura 7.6. Também nesse caso, a análise do número de seqüências aleatórias necessário para representar o processo de previsão revelou que 10 seqüências eram suficientes, apesar da maior dispersão dos resultados (para todas as medidas de qualidade, o coeficiente de variação de 100 seqüências foi menor que 0,12 e a média de 10 seqüências alternativas diferiu menos que 3,2 % da média das 100 seqüências).

7.5.3 Avaliação dos impactos das inundações em União da Vitória

Conforme metodologia apresentada no capítulo 6, uma avaliação prévia dos impactos de variáveis ou eventos de tempo, clima ou recursos hídricos é parte integrante do estudo do valor da informação hidrometeorológica, cujo benefício é geralmente associado à mitigação de parte desses impactos. Assim, nessas avaliações, conforme o escopo do estudo, fazem-se necessário reconhecer e contabilizar tanto os impactos potenciais totais, quanto aqueles evitáveis, que possam ser associados ao uso da informação em processos decisórios sensíveis.

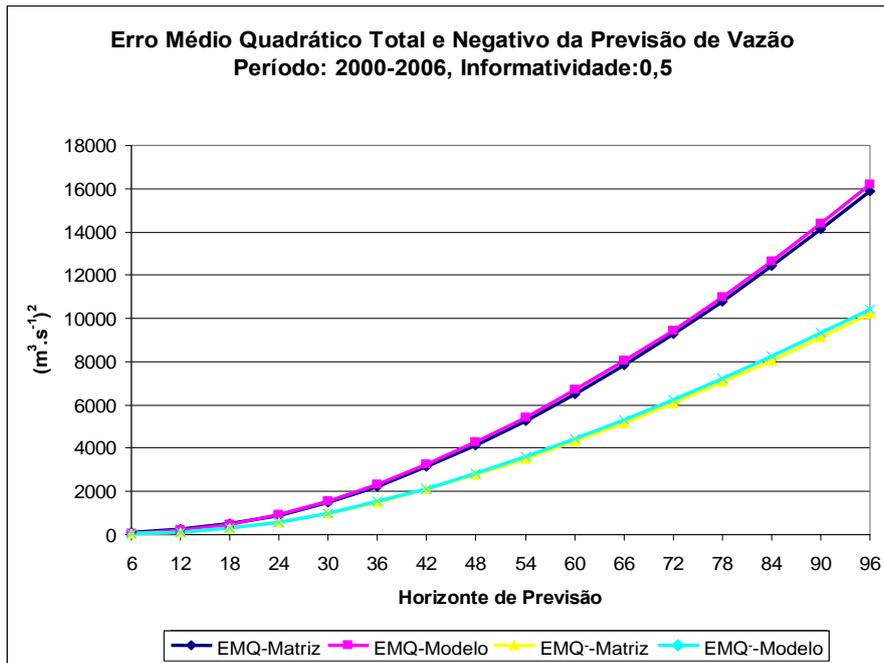


Figura 7.5: Comparativo da acurácia média, medida pelo erro médio quadrático total e negativo, entre previsões de mesma informatividade (0,5) realizadas via matriz de verossimilhança e via modelo baseado em filtro de Kalman

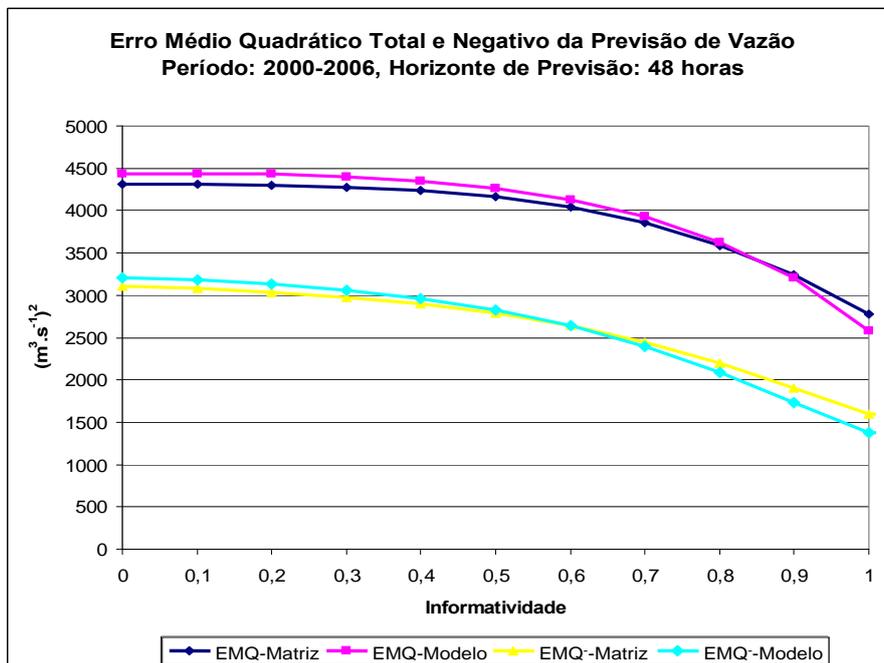


Figura 7.6: Comparativo da acurácia média, medida pelo erro médio quadrático total e negativo, entre previsões de mesmo horizonte (48 horas) realizadas via matriz de verossimilhança e via modelo baseado em filtro de Kalman

7.5.3.1 Método das perdas médias por edificação atingida

Conforme discutido por QUEENSLAND (2002), o método de maior simplicidade na avaliação dos impactos de inundações, mas amplamente utilizado em estudos de viabilidade econômica de medidas estruturais é aquele que busca identificar uma perda total média por edificação atingida como um somatório de parcelas associadas a componentes identificáveis de prejuízo direto. Também é utilizado um fator multiplicativo final que transforma as perdas diretas em totais. JICA (1995a) estimou esses valores componentes da perda total média para o caso de União da Vitória. Eles são apresentados na Tabela 7.3 e permitem calcular a perda total de inundações a partir da estimativa do número de edificações atingidas, por evento específico ou por conjunto de eventos e suas probabilidades de ocorrência em determinado período de tempo. Os valores apresentados foram convertidos em reais pela cotação do dólar na data da pesquisa e corrigidos pela variação do INPC no período de agosto de 1994 a julho de 2007. JICA (1995a) utilizou o valor de 1,5 como fator de conversão de perdas diretas em totais. Esse método apresentado, apesar de sua aplicabilidade ao caso em estudo, não relaciona diretamente as perdas ao nível observado das enchentes, nem permite a incorporação da dinâmica de tomada de decisão de proteção face ao recebimento dos alertas, o que levou a busca de método alternativo mais detalhado.

Tabela 7.3: Perdas financeiras unitárias estimadas devido a inundações em União da Vitória, em função do número de edificações inundadas

Perdas Financeiras Unitárias Estimadas devido a Inundações em União da Vitória	
Itens considerados	Valores unitários (reais / edificação inundada)
Características da inundação	
Profundidade relativa da inundação dentro das edificações	Muito alta
Número máximo de dias de inundação	60
Atividade econômica e valor das propriedades dentro da área de inundação	Alta
Valores unitários de perda	
Apoio de emergência	900
Reparos de estradas e pontes	900
Perdas no sistema de abastecimento	154
Perdas no sistema de distribuição de energia	206
Reparos em edificações	6.429
Perdas residenciais (móveis e outros bens)	3.086
Perdas comerciais	2.829
Perdas industriais	3.086
Perdas na agricultura	900
Outras perdas diretas	180
Perdas indiretas (50 % das perdas diretas)	9.335
Total	28.004

Adaptada de JICA, 1995a, p. 37.

7.5.3.2 Método das funções unitárias nível versus perdas

De acordo com o escopo deste projeto, o estudo dos impactos das inundações em União da Vitória focou as perdas em edificações residenciais, face à dificuldade encontrada no reconhecimento dos múltiplos usos, conteúdos e processos decisórios de proteção dominantes nos casos de edificações comerciais, industriais e de governo. A opção metodológica para o levantamento dessas perdas foi a utilização de funções de nível versus perdas, pelo seu uso generalizado e sua aceitação internacional, conforme comentado no item 7.3.2. De acordo com as críticas e sugestões de aprimoramento discutidas, resolveu-se utilizar as funções identificadas por NASCIMENTO *et al.* (2006) e MACHADO *et al.* (2007), que apresentam as seguintes vantagens: (1) sua construção foi realizada a partir de pesquisas diretas sobre perdas em inundações em situação similar ao caso em estudo, dentro da realidade brasileira; (2) o método utiliza funções relativas, que condicionam as perdas ao tamanho das edificações e às classes econômicas dos moradores, o que aprimora a avaliação (THIEKEN *et al.*, 2005); e (3) o levantamento é de agosto de 2002, relativamente recente, o que permite a atualização econômica sem grandes distorções. As funções de nível versus perdas de NASCIMENTO *et al.* (2006) e MACHADO *et al.* (2007) consideram tanto os danos às construções, quanto ao seu conteúdo. Elas foram desenvolvidas com base em dados levantados em Itajubá (MG), cidade de porte médio (84.135 habitantes pelo censo IBGE de 2000), com grande vulnerabilidade às inundações. Sua aplicação em União da Vitória (PR) é estimulada, pois a cidade, apesar de seu porte menor (47.522 habitantes em 2000), possui domicílios de perfil econômico similar, conforme os dados sobre a distribuição das famílias de acordo com o rendimento nominal mensal per capita, levantados pelo censo IBGE de 2000. As funções foram identificadas de acordo com a classe econômica dos moradores e agrupadas em dois grandes grupos: classes A e B; e classes C, D e E. O conceito de classe econômica utilizado foi o estabelecido no Critério de Classificação Econômica Brasil (CCEB), método adotado pela Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa, ABEP, e amplamente utilizado no país. Esse critério abandona a pretensão de classificar a população em termos de classes sociais e enfatiza sua função de estimar o poder de compra das pessoas e famílias urbanas (ABEP, 2006). O CCEB classifica as famílias a partir de uma pontuação relativa à posse de bens duráveis, utilização de serviços domésticos e instrução do responsável pelo domicílio. De acordo com a ABEP (2006), existe uma relação entre classe econômica e renda familiar, podendo ser classificado no grupo de classes A e B as famílias com renda média igual ou superior a R\$ 1.669,00, valor calculado com base

no Levantamento Sócio-Econômico de 2000 do IBOPE, o que corresponde a aproximadamente 9,27 salários mínimos. Conforme sugestão de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983c), as funções nível versus perdas desenvolvidas por NASCIMENTO *et al.* (2006) e MACHADO *et al.* (2007) foram reescritas como funções categóricas unitárias, referidas a um valor máximo de perdas, que foi estabelecido como as perdas esperadas para a profundidade de 2,74 m, conforme exemplos de curvas apresentados. Assim, as funções utilizadas neste estudo foram as seguintes:

$$Lp = g \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Lp_i(z) \quad (7.12a)$$

$$Lp_i(z) = \delta(z) Lm A_i \quad (7.12b)$$

onde:

- Lp - perdas residenciais potenciais totais, em reais, associados a m eventos de inundação e n edificações potencialmente atingíveis;
- $Lp_i(z)$ - perdas diretas de inundação em uma edificação residencial i , associada a uma profundidade de submersão z , em metros;
- g - fator de conversão de perdas diretas em perdas totais;
- $\delta(z)$ - função unitária de perda, conforme o grupo de classes do domicílio, especificando a fração do valor máximo de perdas que ocorre quando a profundidade de submersão na edificação é z ;
- Lm - valor potencial máximo de perdas devido às inundações por área construída da edificação, em reais/m², conforme o grupo de classes do domicílio; e
- A_i - área construída da edificação residencial i , em m².

A função unitária de perda $\delta(z)$ assume os seguintes valores conforme o grupo de classes:

Para as classes A e B:

$$\begin{aligned} \delta(z) &= 0,6976 + 0,3000 \ln(z) && \text{para } z \in [0,1; 2,74] \\ &= 1 && \text{para } z \in (2,74; \infty) \\ &= 0 && \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (7.13a)$$

$Lm = 264,72$

Para as classes C, D e E:

$$\begin{aligned} \delta(z) &= 0,7590 + 0,2391 \ln(z) && \text{para } z \in [0,05; 2,74] \\ &= 1 && \text{para } z \in (2,74; \infty) \\ &= 0 && \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (7.13b)$$

$Lm = 127,50$

Os valores potenciais máximos de perdas foram atualizados pela variação do INPC do período da pesquisa até julho de 2007. O valor adotado do fator de conversão de perdas diretas em totais foi de 1,15, conforme recomendação de

QUEENSLAND (2002) para casos residenciais. O comportamento das funções de perda unitária para os grupos de classe A e B e C, D e E é mostrado na Figura 7.13. Conforme se verifica, a aplicação dessa metodologia na avaliação das perdas potenciais exige, além do conhecimento do comportamento hidrológico do rio Iguazu em termos de níveis e vazões, levantamentos acerca do número de edificações residenciais alagáveis, de sua classificação conforme o grupo de classes econômicas, de uma estimativa de suas áreas construídas e da localização das edificações em relação às planícies de inundação. Esses requerimentos revelam a necessidade de implementação de um Sistema de Informações Geográficas, SIG, capaz de processar todas essas informações sobre a ocupação da área urbana em União da Vitória.

7.5.3.3 Sistema de informações geográficas para análise de inundações

A necessidade de reconhecer e processar dados espaciais sobre o uso e ocupação da área urbana com a finalidade de subsidiar o levantamento de perdas devido às inundações motivou a implementação de um sistema de informações geográficas para análise de inundações em União da Vitória. Esse sistema, baseado no aplicativo ArcGIS, reuniu informações de três fontes principais: (1) a base de dados geográficos municipais da prefeitura de União da Vitória; (2) o levantamento aerofotogramétrico planialtimétrico cedido pelo PARANACIDADE, entidade voltada ao desenvolvimento urbano e regional do Estado do Paraná; e (3) a base de informações agregadas por setor censitário correspondente ao censo demográfico 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE. Os dados principais utilizados na análise de inundações, relativos ao ano 2000, disponíveis na escala de 1:2000, abrangeram a hidrografia, com identificação dos cursos de água de diversas ordens e suas bacias; a altimetria, representada por curvas de nível de 1 em 1 metro; as edificações, representadas pela projeção dos telhados, classificados segundo o seu uso; o sistema viário urbano, com identificação de ruas e quadras; a população residente e o número de domicílios por quadra urbana; e o número de domicílios por faixa de rendimento nominal mensal do responsável, para cada setor censitário. Uma visão geral da distribuição das quadras e setores censitários processados e de sua localização altimétrica é dada pela Figura 7.7.

Com base nos dados citados e considerando-se algumas conclusões de estudos hidrológicos desenvolvidos na região foi possível estimar os seguintes parâmetros fundamentais na avaliação das perdas pelo método selecionado: (1) a delimitação espacial de distintas planícies de inundação; (2) o número e distribuição por grupo de

classes das edificações residenciais em cada planície; e (3) a área construída média das edificações por grupo de classes e planície de inundação. Os procedimentos utilizados na estimação de cada um desses parâmetros envolveram pressupostos e definições que foram condicionados pelo escopo e objetivos deste estudo, bem como pela disponibilidade de dados na região.

A delimitação das planícies de inundação foi realizada a partir das cotas associadas a distintas probabilidades climatológicas de excedência, conforme estudo de avaliação de risco de enchentes em União da Vitória realizado por TUCCI e VILLANUEVA (1997). Esse estudo contemplou o ajuste de uma distribuição de probabilidade do tipo Log Pearson III à série histórica de vazões máximas anuais, com a inclusão de marca histórica, conforme metodologia recomendada pelo *Geological Survey*. Os valores resultantes desse estudo de probabilidades, tempos de retorno ou recorrência, vazões e níveis relativos ao posto fluviométrico da ponte ferroviária (seção UV) são apresentados na Tabela 7.4. A cota inicial de inundação foi considerada de 744,50 m, correspondente ao nível da régua de 4,89 m na seção UV.

Tabela 7.4: Valores da curva de probabilidade de níveis e vazões para União da Vitória, referentes ao posto fluviométrico da ponte ferroviária (seção UV)

Valores da Curva de Probabilidade de Níveis e Vazões para União da Vitória				
Tempo de Retorno (anos)	Probabilidade de Excedência	Vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Cota (m)	Nível da Régua (m)
2	0,5000	1.418	744,70	5,09
5	0,2000	2.070	745,90	6,29
10	0,1000	2.569	746,75	7,14
20	0,0500	3.101	747,50	7,89
25	0,0400	3.282	747,78	8,17
40	0,0250	3.679	748,30	8,69
50	0,0200	3.876	748,62	9,01
100	0,0100	4.526	749,50	9,89
200	0,0050	5.240	750,30	10,69

Extraída de TUCCI e VILLANUEVA, 1997, p. 30.

Outro aspecto considerado na delimitação das planícies de inundação foi a inclinação da linha d'água das enchentes ao longo do rio, o que torna níveis de inundação a montante maiores que a jusante. Nesse sentido foram utilizados os resultados de simulações de um modelo hidrodinâmico ajustado por TUCCI e VILLANUEVA (1997), que apresentam os níveis ao longo da cidade, para diversas seções do rio e tempos de retorno das enchentes. Os valores para níveis de enchentes e seções do rio não simulados foram estimados por interpolação linear.

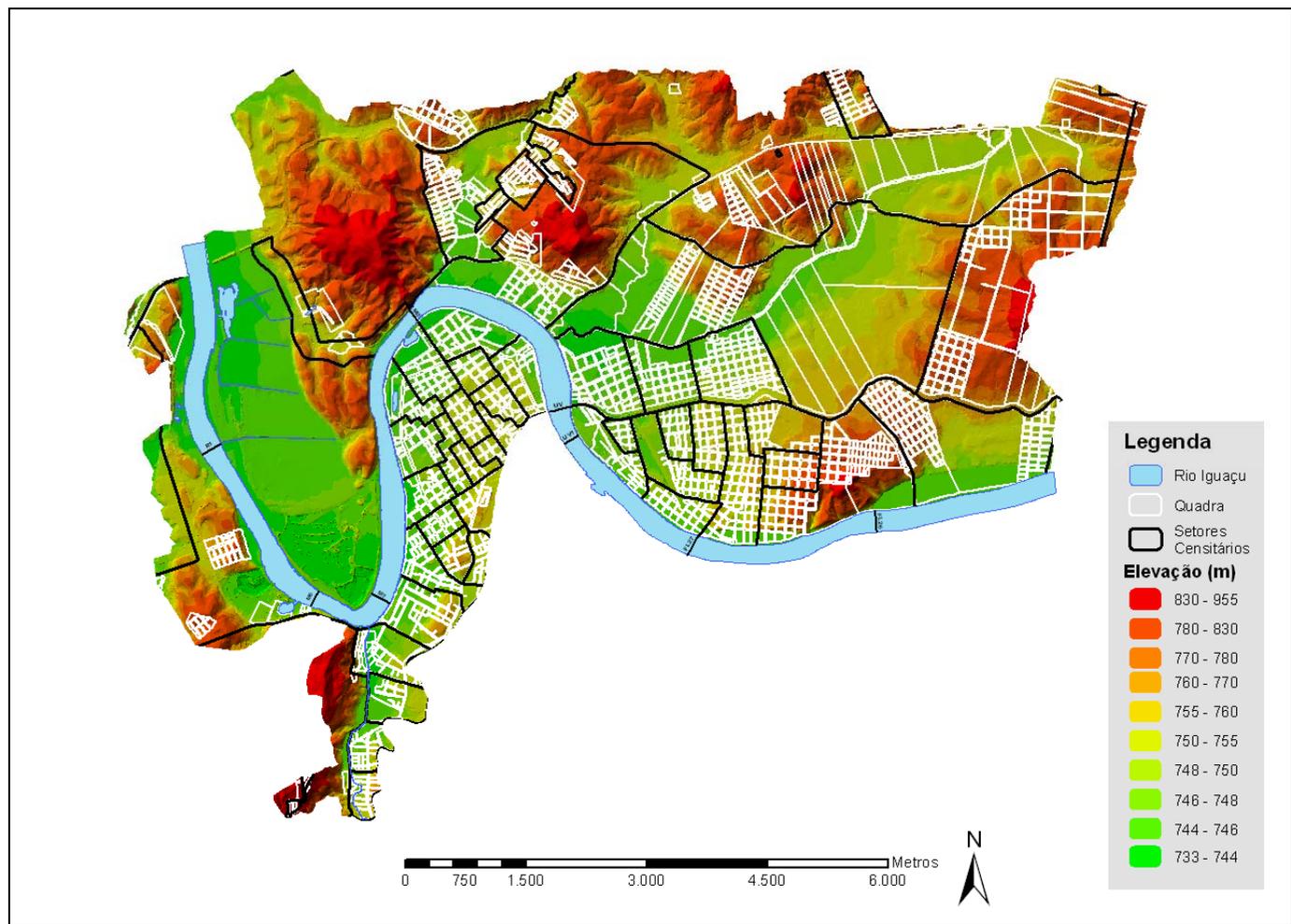


Figura 7.7: Distribuição espacial e localização altimétrica das quadras e setores censitários da área urbana de União da Vitória

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, constituído a partir de dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

A Figura 7.8 apresenta os níveis de enchente ao longo da cidade de União da Vitória considerados neste estudo. A última etapa na delimitação espacial das planícies foi o traçado de um mapa de inundação, que possibilitasse, com a precisão disponível nos dados, a contabilização das edificações em cada planície. Para a elaboração desse mapa, seguiu-se a metodologia para o traçado de linhas de mesmo tempo de retorno, conforme apresentado por TUCCI (2005) e TUCCI e VILLANUEVA (1997). Em sua implementação, foram utilizados recursos do ArcGIS como a geração de um modelo digital do terreno, interpolação de curvas de nível e combinação de poligonais para a geração do traçado final de cada planície de inundação. A Figura 7.9 apresenta o mapa elaborado com a identificação da área abrangida por cada planície de inundação, referida aos níveis e vazões da seção UV, conforme apresentados na Tabela 7.4.

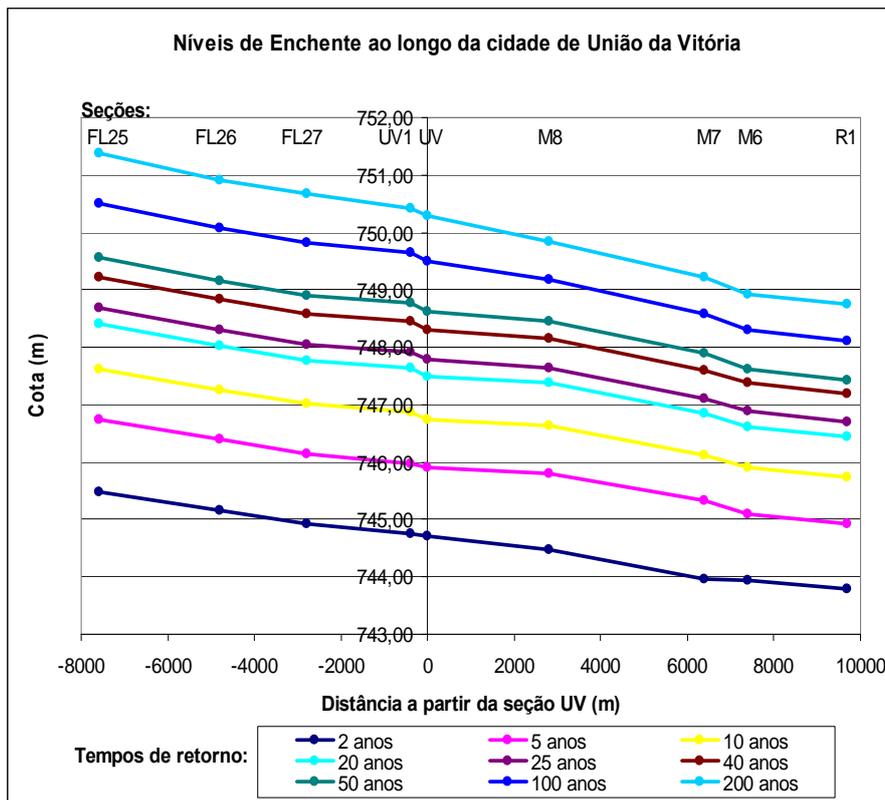


Figura 7.8: Níveis de enchente ao longo da cidade de União da Vitória, para diferentes tempos de retorno e seções do rio

Adaptado de TUCCI e VILLANUEVA, 1997, p. 57.

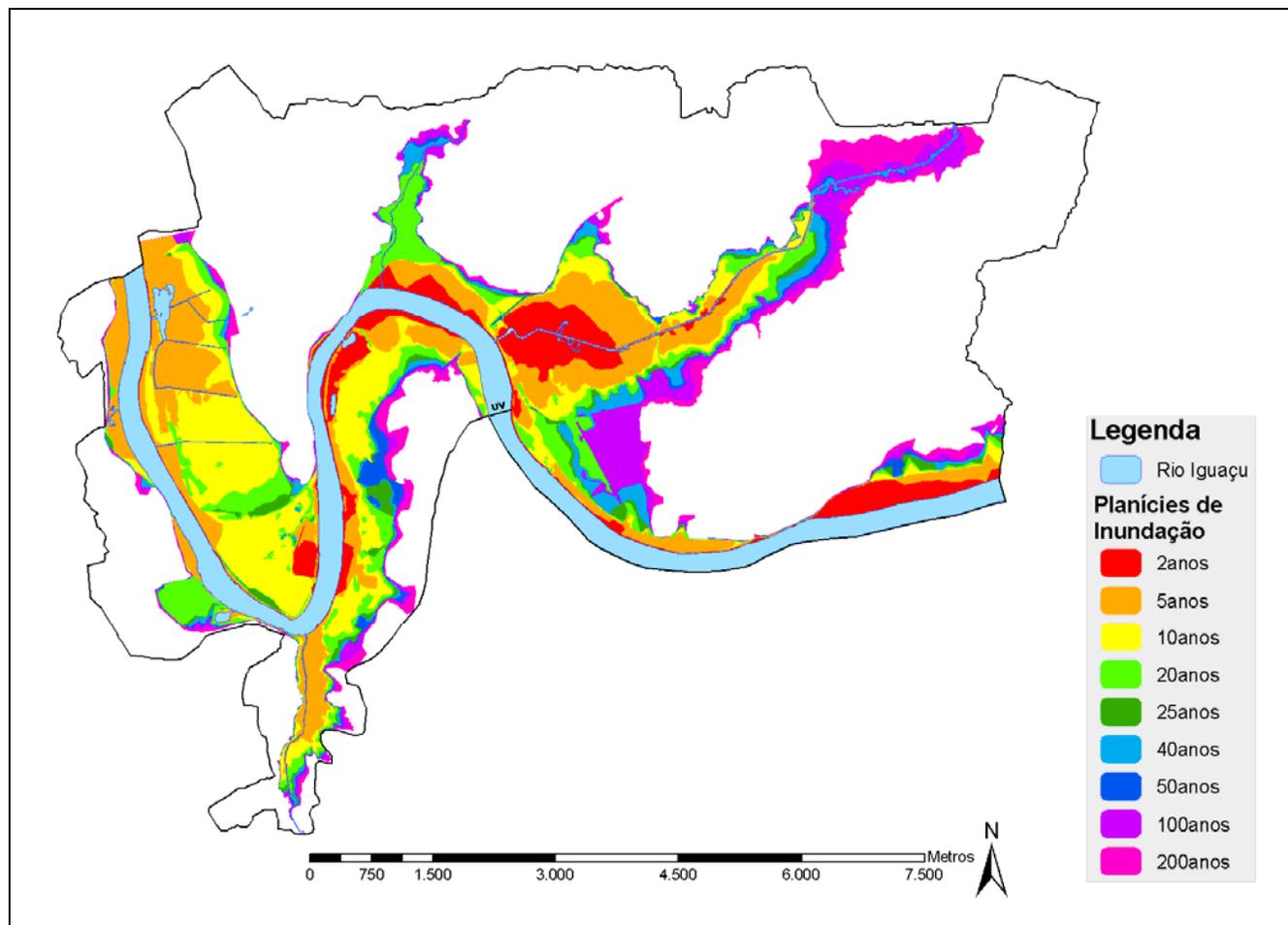


Figura 7.9: Mapa de delimitação das planícies de inundação em União da Vitória, conforme os tempos de retorno definidos a partir do comportamento das vazões referentes ao posto fluviométrico da ponte ferroviária (seção UV)

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, constituído a partir de dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

A classificação das edificações residenciais segundo o grupo de classes A e B ou C, D e E seguiu procedimentos de cálculo organizados em três etapas. Em uma primeira etapa foi estimado o percentual de domicílios de União da Vitória com renda média familiar maior ou igual a 9,27 salários mínimos, identificados como pertencentes às classes A e B. Com esse intuito foram utilizadas duas informações do censo 2000 do IBGE relativas ao município como um todo: número de famílias residentes em domicílios particulares, por classes de rendimento nominal mensal per capita, e número médio de moradores por domicílio particular, segundo as classes de rendimento médio mensal per capita. O resultado da composição dessas duas informações indicou que 15,3 % dos domicílios de União da Vitória devem ser classificados no grupo de classes A e B. Na segunda etapa, buscou-se determinar o valor de referência, em termos de rendimento nominal mensal dos responsáveis por domicílio, que divide os grupos de classes. Isto foi necessário devido à indisponibilidade de dados de rendimento nominal mensal per capita por setor censitário. A seleção do percentil de 0,847 na distribuição de frequência acumulada dos domicílios, segundo o rendimento nominal mensal dos responsáveis, indicou o valor de 6,31 salários mínimos como o divisor de grupos de classes. Na terceira etapa, foi calculado, para cada setor censitário, o percentual de domicílios cujo rendimento nominal mensal dos responsáveis era superior ao valor de 6,31 salários mínimos. Esse percentual foi aplicado sobre as edificações residenciais de cada setor censitário ordenadas pelo tamanho das projeções dos telhados, classificando as maiores como pertencentes ao grupo de classes A e B. O número de edificações residenciais, classificadas segundo o grupo de classes e planície de inundação, é mostrado na Tabela 7.5. A localização das edificações em relação às planícies de inundação para regiões específicas da cidade pode ser visualizada na Figura 7.10, Figura 7.11 e Figura 7.12. Para cada planície de inundação, adicionalmente à contabilização das edificações por grupo de classes, foi também calculado o número de domicílios por faixa de rendimento nominal mensal dos responsáveis, e estimada a renda média familiar mensal característica de cada faixa. Os resultados dessas estimativas são mostrados na Tabela 7.5.

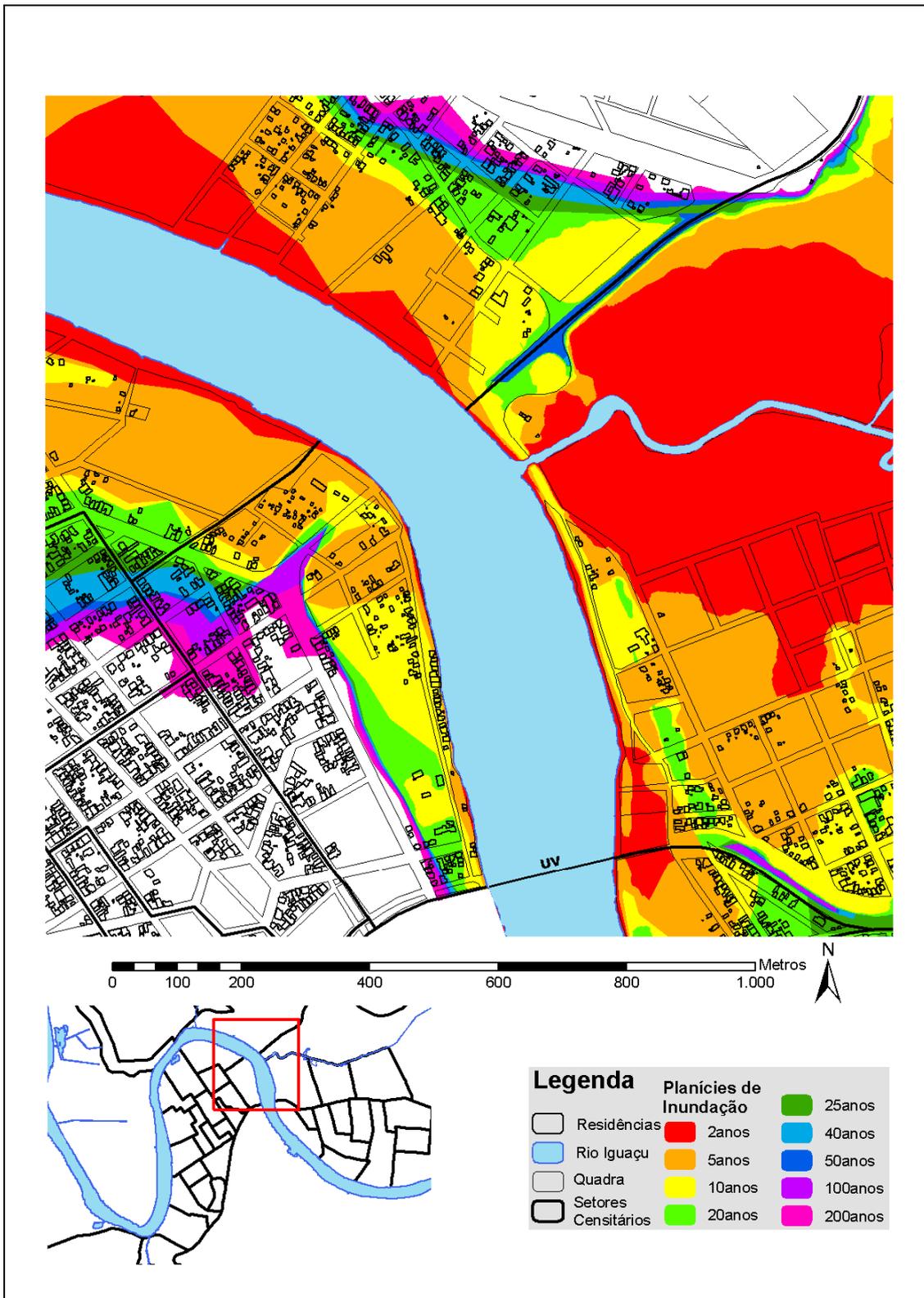


Figura 7.10: Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário n° 412820305000026, bairro Navegantes, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, constituído a partir de dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

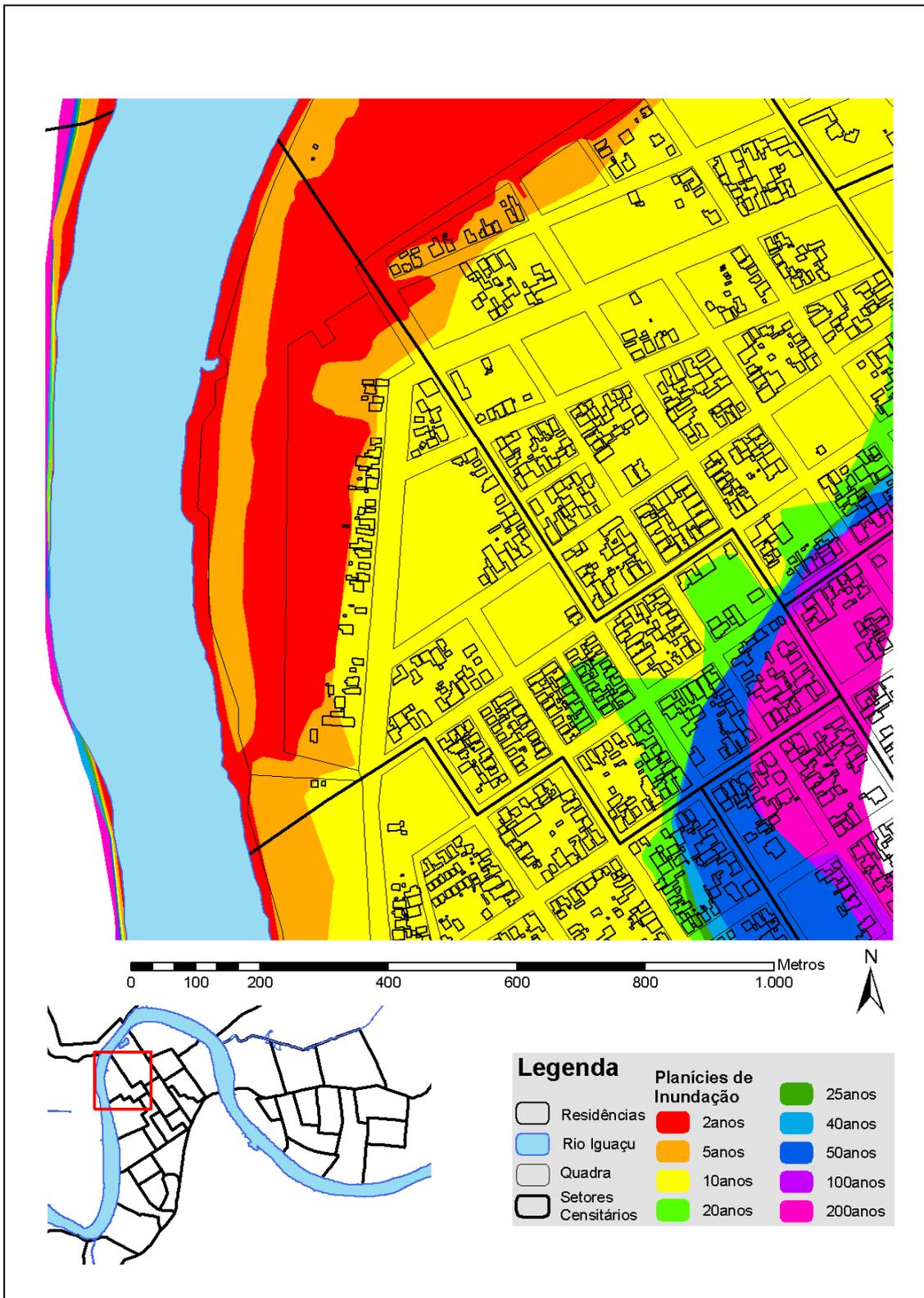


Figura 7.11: Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário nº 412820305000023, bairro São Bernardo, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, constituído a partir de dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

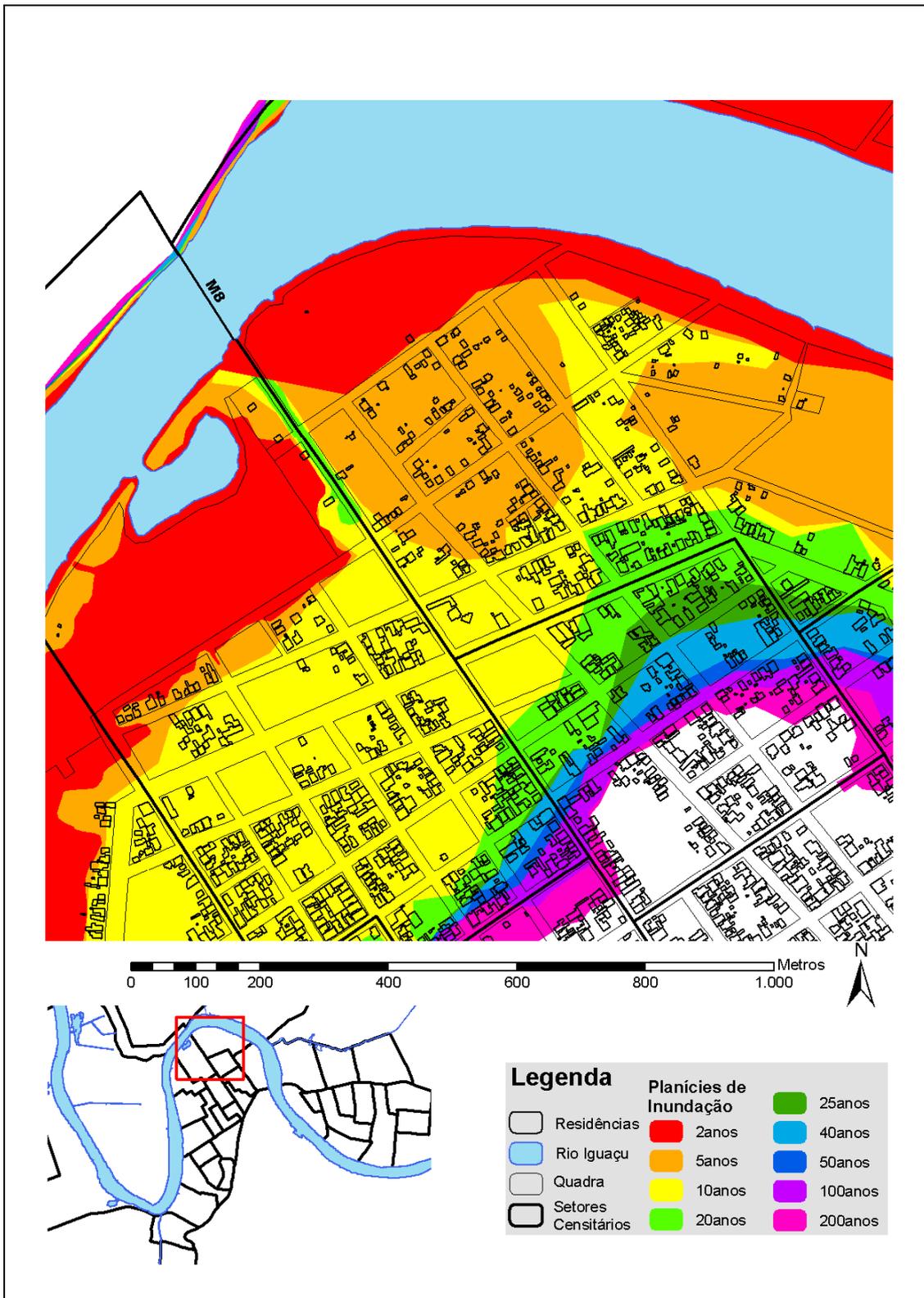


Figura 7.12: Localização das edificações residenciais sujeitas a inundação para o setor censitário nº 412820305000002, bairro Centro, União da Vitória, em relação às planícies de inundação consideradas

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, constituído a partir de dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

Tabela 7.5: Características de ocupação das planícies de inundação em União da Vitória, em termos do número de edificações e da área média construída, de acordo com o grupo de classes e a faixa de rendimento nominal mensal do responsável pelo domicílio

Características de Ocupação das Planícies de Inundação em União da Vitória, em termos de Número de Edificações e Área Média Construída												
Variável	Unidade de Medida	Classes e Faixas (SM=Salário Mínimo)	Renda Média Familiar (R\$ / mês)	Planície de Inundação, segundo o Tempo de Recorrência (anos)								
				2	5	10	20	25	40	50	100	200
Número de Edificações	unidade			34	693	1.445	999	424	561	420	1.107	537
Número de Edificações Residenciais	unidade			25	664	1.357	943	407	533	406	1.080	496
Número de Edificações Residenciais por Grupo de Classes	unidade	A e B		5	36	213	157	71	71	96	138	146
		C, D e E		20	628	1.144	786	336	462	310	942	350
Número de Edificações Residenciais por Faixa de Rendimento Nominal Mensal do Responsável pelo Domicílio	unidade	de 0 a 0,5 SM	209	3	87	52	45	15	25	14	61	12
		de 0,5 a 1 SM	688	7	182	214	144	57	73	47	182	63
		de 1 a 2 SM	1.222	6	197	297	241	101	147	114	231	100
		de 2 a 3 SM	1.763	2	95	249	184	76	87	41	228	82
		de 3 a 5 SM	2.601	2	59	275	138	74	112	76	203	64
		de 5 a 10 SM	5.394	3	32	196	144	57	69	76	134	108
		de 10 a 15 SM	8.995	1	5	40	24	14	10	20	23	33
		de 15 a 20 SM	14.980	1	4	13	13	5	4	11	11	22
		mais de 20 SM	26.328	0	3	21	10	8	6	7	7	12
Área Média Construída das Edificações Residenciais por Grupo de Classes	m ²	A e B		207	227	219	209	206	199	197	176	216
		C, D e E		69	70	91	83	85	83	91	72	84
Área Média Construída das Edificações Residenciais por Faixa de Rendimento Nominal Mensal do Responsável pelo Domicílio	m ²	de 0 a 0,5 SM	209	24	25	29	20	21	25	17	17	21
		de 0,5 a 1 SM	688	55	49	49	48	47	44	51	40	42
		de 1 a 2 SM	1.222	80	73	77	67	70	66	74	63	66
		de 2 a 3 SM	1.763	90	99	101	98	92	91	99	85	92
		de 3 a 5 SM	2.601	126	127	131	131	128	124	127	107	127
		de 5 a 10 SM	5.394	190	182	180	174	173	167	159	148	173
		de 10 a 15 SM	8.995	220	280	238	232	219	238	220	191	231
		de 15 a 20 SM	14.980	245	278	275	292	240	275	267	266	261
		mais de 20 SM	26.328	-	368	330	343	301	299	297	269	322

Observação: Os valores de renda média familiar são correspondentes a julho de 2007, estimados com base no salário mínimo de R\$ 380,00.

Fonte: Sistema de informações geográficas para análise de inundações, integrando dados da Prefeitura Municipal de União da Vitória, PARANACIDADE e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE.

A estimativa da área construída das edificações foi realizada a partir da área da projeção do telhado, com a aplicação de um desconto relativo ao tamanho do beiral, ou seja, o prolongamento do telhado além da prumada das paredes. Após visitas ao local, análise de fotos das edificações e entrevistas com especialistas em construções, concluiu-se por um desconto fixo de 20 %, o que permite acomodar beirais variáveis conforme o tamanho das residências. Assim, por exemplo, os beirais para edificações de 50, 100 e 200 m² foram estimados em aproximadamente 0,37, 0,5 e 0,75 m. Para as edificações de múltiplos andares, foi considerada somente a sua área térrea como afetado pelas inundações. Com a estimativa da área construída por edificação residencial, foi possível calcular a área média por grupo de classes e planície de inundação, bem como por faixa de rendimento nominal mensal dos responsáveis. Essas estimativas das áreas médias são mostradas na Tabela 7.5. Como os resultados individuais por edificação são agregados por planície de inundação para a avaliação final das perdas, espera-se uma compensação dos erros cometidos ao longo de todo o processo de estimativa dos parâmetros.

7.5.4 Simulação dos processos de tomada de decisão

As abordagens analisadas de avaliação de perdas devido às inundações, bem como outras discutidas na literatura, estão prioritariamente focadas em gerar estimativas somente da perda potencial devido às inundações, não incluindo em seus modelos os montantes evitáveis associados à tomada de decisão sobre medidas de proteção. A pesquisa por modelos decisórios em inundações revelou conhecimento qualitativo esparso sobre o tema e raras propostas quantitativas consolidadas. Uma exceção nesse sentido é o trabalho de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a e 1983c), que apresenta modelo baseado em decisões seqüenciais de graus de resposta do tomador de decisão quanto a medidas de proteção e funções unitárias categóricas para expressar as perdas, custos, redução de perdas e restrição temporal à implementação das ações de proteção. Esse modelo foi adotado para o estudo do valor da informação de alerta, sendo apresentado a seguir.

7.5.4.1 Decisão de proteção contra inundações

O modelo de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a e 1983c) prevê a possibilidade do tomador de decisão estabelecer e buscar implementar um grau de resposta em termos de ação de proteção, com vistas a minimizar suas perdas. Esse grau de resposta, identificado por α , é uma medida cardinal definida como a razão entre o montante de perdas evitado pela ação de proteção e o máximo de perdas que pode ser evitado por ações de proteção de curto prazo. Assim, $\alpha \in [0,1]$, onde $\alpha=0$ indica resposta nula, $0<\alpha<1$, indica resposta parcial e $\alpha=1$ indica resposta completa. O grau de resposta que o tomador de decisão pode implementar em um intervalo de tempo $[0,t]$, $0 \leq t < \infty$, é limitado na parte superior por uma função de restrição temporal τ , onde $\alpha \leq \tau(t)$.

A proposta de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a e 1983c) foi ajustada para integrar o modelo adotado de perdas potenciais residenciais, discutido anteriormente. Nessa versão modificada prevalecem as seguintes expressões:

$$C_i(\alpha) = Lm A_i \gamma(\alpha) \quad (7.14a)$$

$$Lr_i(\alpha, z) = [1 - \alpha\varphi(z)] Lp_i(z) = [1 - \alpha\varphi(z)] \delta(z) Lm A_i \quad (7.14b)$$

$$L_i(\alpha, z) = C_i(\alpha) + Lr_i(\alpha, z) \quad (7.14c)$$

$$L = g \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n L_i(\alpha, z) \quad (7.14d)$$

onde:

- $C_i(\alpha)$ - custos de contratação de um grau de resposta de proteção α para a edificação residencial i , em reais;
- L_m - valor potencial máximo de perdas devido às inundações por área construída da edificação, em reais/m², conforme o grupo de classes do domicílio, quando a resposta de proteção é nula, $\alpha=0$;
- A_i - área construída da edificação residencial i , em m²;
- $\gamma(\alpha)$ - função unitária de custos, especificando a fração do valor máximo de perdas que é igual ao custo de contratação do grau de resposta α ;
- $\varphi(z)$ - função unitária de redução de perdas, especificando a fração evitável do valor máximo de perdas quando a profundidade de submersão é z , em metros, e a resposta de proteção é completa, $\alpha=1$;
- $\delta(z)$ - função unitária de perda, conforme o grupo de classes do domicílio, especificando a fração do valor máximo de perdas que ocorre quando a profundidade de submersão na edificação é z ;
- $Lp_i(z)$ - perdas potenciais diretas de inundação, em uma edificação residencial i , associada a uma profundidade de submersão z ;
- $Lr_i(\alpha, z)$ - perdas residenciais resultantes da implementação do grau de resposta α em uma edificação i , quando a profundidade de submersão é z ;
- $L_i(\alpha, z)$ - perdas residenciais diretas totais, em reais, em uma edificação i , fruto da implementação do grau de resposta α , quando a profundidade de submersão é z ;
- L - perdas residenciais totais, em reais, associados a m eventos de inundação e n edificações potencialmente atingíveis; e
- g - fator de conversão de perdas diretas em perdas totais.

Dentro desse modelo apresentado, as funções unitárias de perda utilizadas foram as derivadas das funções nível versus perda de NASCIMENTO *et al.* (2006) e MACHADO *et al.* (2007). As funções unitárias de custos, redução de perdas e restrição temporal para edificações residenciais foram tomadas de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983c), os quais compilaram trabalhos anteriores de diversas fontes. As funções derivadas reproduzem, de forma satisfatória, as possibilidades e restrições de implementação de ações de proteção para o caso em

estudo. As formas analíticas dessas funções, ajustadas para o sistema usual de medidas no país, são as seguintes:

$$\gamma(\alpha) = 0,0169 \alpha^{2,1} \quad \text{para } \alpha \in [0,1] \quad (7.15a)$$

$$\varphi(z) = 0,282 + 0,223z - 0,096z^2 + 0,01z^3 \quad \text{para } z \in [0,5] \quad (7.15b)$$

$$= 0,25 \quad \text{para } z \in (5, \infty)$$

$$\tau(t) = 0,01048 t^{1,434} \quad \text{para } t \in [0,24] \quad (7.15c)$$

$$= 1 \quad \text{para } t \in (24, \infty)$$

onde:

$\gamma(\alpha)$, $\varphi(z)$ e $\tau(t)$ - funções unitárias de custos, redução de perdas e restrição temporal à implementação de resposta de proteção;

α - grau de resposta de proteção contratada;

z - profundidade de submersão da edificação, em metros; e

t - tempo disponível para implementação da ação de proteção, em horas.

As funções unitárias de custos, redução de perdas e restrição temporal, juntamente com a função unitária de perdas devido a inundações, podem ser visualizadas na Figura 7.13. Assim, por exemplo, para uma residência de 200 m² do grupo de classes A e B, as perdas potenciais podem chegar R\$ 47.943,00 para uma inundação que provoque profundidade de submersão de 2 metros. Com a implementação de uma resposta completa de proteção, tomada com antecedência de mais de 24 horas, contratada ao custo de R\$ 895,00, as perdas resultantes seriam de R\$ 27.639,00 e as perdas diretas totais de R\$ 27.534,00, o que representaria uma economia direta de R\$ 19.409,00 para o caso dessa residência e inundação.

O processo de tomada de decisão de proteção, realizada de forma específica pelo responsável por cada domicílio, consiste em: (1) receber as informações de alerta, abrangendo tempo e cota da crista da inundação e o tempo estimado de alagamento do imóvel; e (2) decidir o grau de resposta a ser contratado para proteção do conteúdo do seu imóvel, em especial, a remoção de bens móveis para lugar seguro, baseado na estimativa de suas perdas residenciais diretas totais $L_i(\alpha, z)$. Esse processo é repetido a cada emissão de alerta (de 6 em 6 horas no caso em estudo), sendo que a decisão sobre o grau de resposta não pode ser decrescente para uma mesma inundação e é interrompido quando do alagamento do imóvel. O grau de resposta decidido e contratado no instante k , d_k , terá custos e poderá ou não ser implementado, dependendo das restrições temporais impostas pelo tempo real disponível.

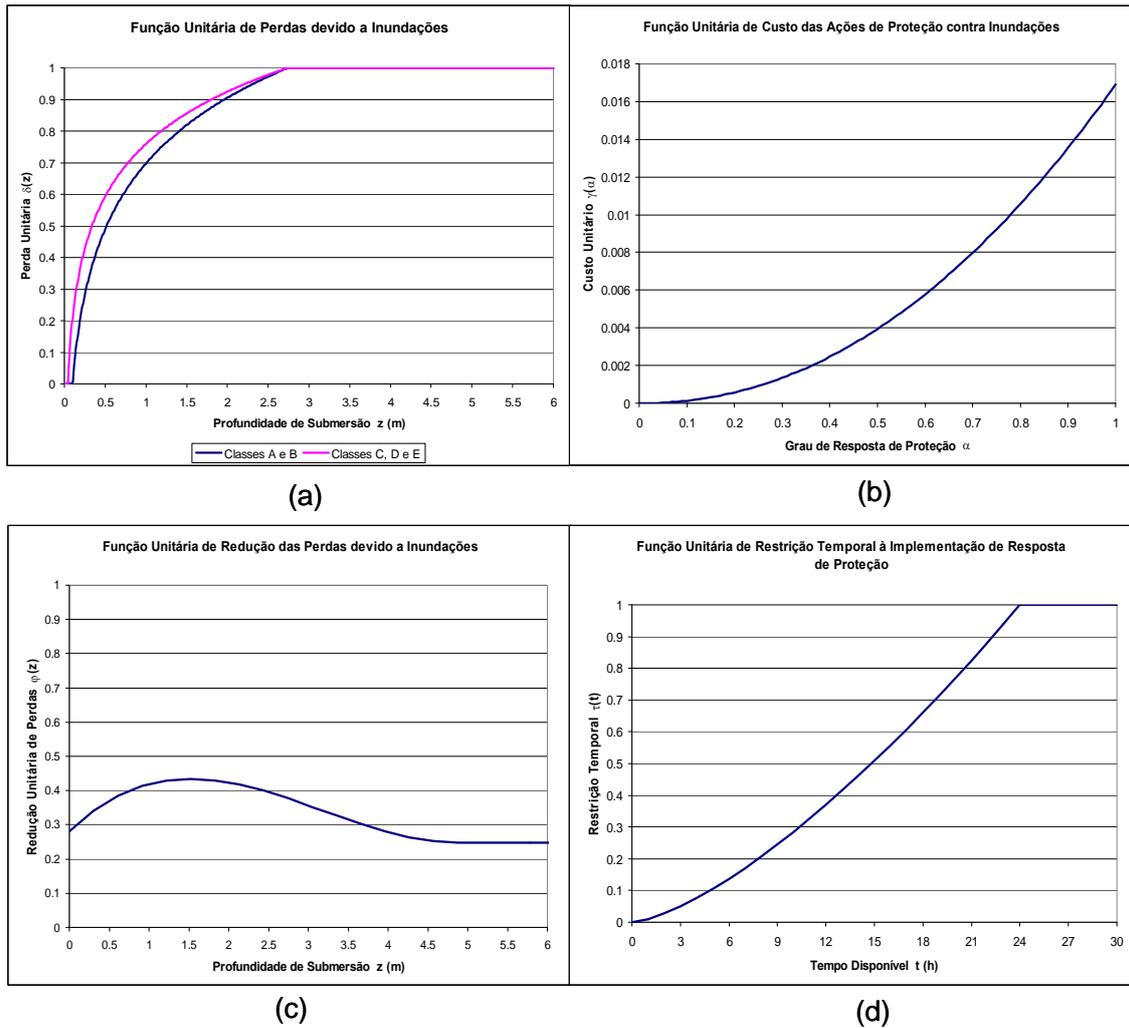


Figura 7.13: Funções unitárias de perdas devido a inundações (a), de custos das ações de proteção (b), de redução das perdas devido às inundações (c) e de restrição temporal à implementação de resposta de proteção (d)

Derivadas dos modelos de NASCIMENTO *et al.*, 2006 e KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS, 1983c.

A dinâmica das decisões seqüenciais, baseada em KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a), é regulada da seguinte forma:

$$\alpha_k = \min[d_k, \tau(\tau^{-1}(\alpha_{k-1}) + \Delta t_k)] \quad (7.16a)$$

$$\Delta t_k = \Delta t_k - tp - td \quad (7.16b)$$

onde:

- α_k - grau de resposta de proteção viável de ser implementado a partir do instante k ;
- d_k - grau de resposta de proteção decidido e contratado no instante k ;
- $\tau(t)$ - função unitária de restrição temporal à implementação da resposta de proteção;

- Δt_k - intervalo de tempo disponível no instante k para a implementação da medida de proteção, em horas;
- Δt_k - intervalo de tempo entre o tempo de referência do último dado monitorado utilizado na previsão, disponibilizada no instante k , e o tempo de alagamento do imóvel, em horas; e
- t_p e t_d - tempos de processamento e disseminação das informações de alerta, cuja soma está sendo considerada neste estudo igual a 6 horas.

Três estratégias de decisão foram investigadas neste estudo: (1) decisão ótima probabilística, que segue o modelo bayesiano e seleciona o grau de resposta que minimiza o valor esperado das perdas totais por edificação; (2) decisão ótima determinística, que seleciona o grau de resposta que minimiza o valor das perdas totais por edificação, considerando o valor de face das previsões (valor máximo do nível e tempo de inundação em 96 horas); e (3) decisão subjetiva com propensão a reduzir custos, que adia a decisão até o recebimento de certo número de alertas e, somente depois, busca empreender resposta de proteção completa ($\alpha=1$) para toda previsão determinística de inundação em sua planície. As estratégias utilizam as previsões de vazão de 6 em 6 horas até 96 horas para calcular a profundidade de submersão e o intervalo de tempo até o alagamento do imóvel e, posteriormente, estimar o valor esperado ou previsto das perdas residenciais totais por edificação, associado a cada grau de resposta de proteção. A primeira estratégia requer a construção de mecanismos de avaliação das incertezas da previsão do tempo e da vazão máxima de inundação, que são apresentados a seguir.

7.5.4.2 Decisão de emissão do alerta de inundação

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 da inundação, entre os quais salvar vidas e minimizar perdas econômicas. O foco deste estudo é a emissão de alertas para a minimização das perdas econômicas residenciais, mas as estratégias investigadas podem ser expandidas para contemplar a proteção da vida. O alerta funciona como um gatilho para motivar a população a decidir e empreender medidas de proteção contra as inundações. Ele pode ser estruturado em diversos níveis, mas será considerado como variável binária neste estudo, diferenciado por planície de inundação. Comumente é definido um indicador da situação hidrológica, por exemplo, um valor observado de nível, vazão ou precipitação crítica, a partir do qual a previsão começa a ser monitorada e, dado determinada condição de previsão, o alerta é emitido. 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 enchentes detectadas e perdas e tempo disponibilizado para a população empreender medidas de proteção.

Neste estudo foi investigado o uso de dois critérios de mensuração dos impactos das inundações, cuja emissão do alerta deveria buscar minimizar: (1) o valor médio das perdas residenciais anuais, associado ao conjunto das edificações de cada planície de inundação; e (2) um índice de impacto social das inundações, calculado para cada planície, em função do valor médio das perdas residenciais anuais e da classe de renda familiar mensal dos domicílios atingidos. Esse segundo critério tenta refletir uma medida da tragédia econômica imposta pelas inundações à população atingida, buscando quantificar o tempo esperado de recomposição das perdas anuais, com o uso de toda a renda disponível em cada domicílio. O índice de impacto social *IIS* é calculado da seguinte forma:

$$IIS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^s n_i IIS_i, \quad n = \sum_{i=1}^s n_i \quad (7.17a)$$

$$IIS_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^r n_{ij} \frac{30 La_{ij}}{RMF_j}, \quad n_i = \sum_{j=1}^r n_{ij} \quad (7.17b)$$

onde:

- IIS* e *IIS_i* - índice de impacto social das inundações, medido em dias de renda familiar/ano, para a cidade como um todo e para a planície de inundação *i*, (*i*=1,*s*) ;
- n*, *n_i* e *n_{ij}* - número de edificações residenciais potencialmente atingíveis na cidade, número de edificações residenciais localizadas na planície de inundação *i*, e número de edificações residenciais localizadas na planície *i* e enquadradas na classe de renda do responsável pela família *j*, (*j*=1,*r*);
- s* e *r* - número de planícies de inundação e número de classes de renda do responsável pela família (*s*=*r*=9 no presente estudo);
- La_{ij}* - valor médio das perdas residenciais anuais, associado a uma edificação localizada na planície *i* e enquadrada na classe de renda do responsável pela família *j*; e
- RMF_j* - renda média familiar mensal característica da classe de renda do responsável pela família *j*.

Assim, por exemplo, um domicílio cujo responsável está enquadrado na faixa de rendimento nominal mensal de 1 a 2 salários mínimos, com renda familiar mensal estimada de R\$ 1.222,00, que esteja sujeito a perdas médias anuais potenciais de R\$ 833,00 (edificação enquadrada no grupo de classes C,D ou E, com 70 m² de área construída, situada na planície de inundação de 10 anos), possui aproximadamente 20 dias de sua renda familiar por ano comprometidos com o problema das inundações, sendo a média dessas medidas para os domicílios de uma dada região representativa do seu índice de impacto social das inundações (*IIS* ou *ISS_i*).

Visando minimizar os critérios apresentados, a estratégia de emissão do alerta pode ser orientada por uma abordagem determinística ou probabilística. A estratégia investigada na abordagem determinística consiste em determinar um tempo de segurança no horizonte de previsão, e emitir o alerta para determinada planície sempre que a previsão indicar inundação da planície no horizonte de tempo menor ou igual ao tempo de segurança. Assim:

$$\text{Se } fh_t > h^* \text{ e } t \leq t^*, \text{ então emita o alerta de inundação} \quad (7.18)$$

onde:

- fh_t - nível previsto para o horizonte de tempo t ;
- h^* - nível de alagamento representativo da planície de inundação; e
- t^* - horizonte de tempo de previsão, estabelecido via modelo de decisão, determinante da emissão do alerta.

Para o caso em estudo, a previsão é realizada de 6 em 6 horas até o horizonte de 96 horas e existe uma perda de 6 horas devido ao processamento e disseminação. Os tempos de segurança que merecem investigação estão compreendidos entre 6 e 90 horas.

A abordagem probabilística na decisão de emissão do alerta de inundações vem sendo incentivada tanto por meio do tratamento explícito das incertezas presentes na previsão determinística (KRZYSZTOFOWICZ, 1993, KELLY e KRZYSZTOFOWICZ, 1994), quanto no uso direto de previsões hidrológicas probabilísticas (KRZYSZTOFOWICZ, 1998). O modelo formulado por KRZYSZTOFOWICZ (1998) propõe a seguinte estratégia de decisão ótima:

$$\text{Se } P(H_t > h^*) > p^* \text{ e } t < t^*, \text{ então emita o alerta de inundação} \quad (7.19)$$

onde:

- $P(H_t > h^*)$ - probabilidade de o nível exceder determinado limite h^* no horizonte de tempo t ; e

p^* e t^* - limites de probabilidade e de horizonte de tempo de previsão, estabelecidos via modelo de decisão, determinantes da emissão do alerta.

A probabilidade a ser utilizada na emissão do alerta $P(H_t > h^*)$ é a própria função de excedência do nível (complemento da função acumulada de probabilidade) da previsão probabilística, ou a probabilidade posterior de inundação de determinada planície, dado a previsão determinística de nível. Neste estudo propõe-se uma estratégia alternativa, na qual o tempo de alagamento também é tratado como variável aleatória condicionante da emissão do alerta. Assim, a estratégia utilizada passa a ser a seguinte:

$$\text{Se } P(H > h^*, T \leq t^*) > p^*, \text{ então emita o alerta de inundação} \quad (7.20)$$

onde:

$P(H > h^*, T \leq t^*)$ - probabilidade conjunta de o nível exceder determinado limite h^* e o tempo de alagamento ser menor ou igual a determinado limite t^* ; e
 p^* - limite de probabilidade estabelecido via modelo de decisão, determinante da emissão do alerta.

Na implementação da estratégia acima neste estudo, o valor de h^* é considerado igual ao nível médio de cada planície de inundação, onde são concentradas todas as edificações da planície, e o tempo de alerta t^* é considerado igual a 30 horas, correspondente ao tempo de empreender medida de proteção total (24 horas) mais os tempos de processamento e disseminação (6 horas). Para o cálculo da probabilidade conjunta $P(H > h^*, T \leq t^*)$ foi desenvolvida uma climatologia do erro da previsão da vazão máxima em 96 horas, baseada na construção de matrizes de verossimilhança para duas variáveis: diferença de vazão máxima prevista em 96 horas Δfm e tempo previsto de ocorrência da vazão máxima em 96 horas Γ_m . Assim, para a diferença da vazão máxima, tem-se:

$$\Delta fm = fm - q^0 \quad (7.21a)$$

$$\Delta qm = qm - q^0 \quad (7.21b)$$

$$\Delta qa = q^0 - q^{-24} \quad (7.21c)$$

$$P(\Delta fm | \Delta qm, \phi_1) = P(\Delta fm | \Delta qm, \Delta qa) \quad (7.21d)$$

onde:

Δfm - diferença entre a vazão máxima prevista para as próximas 96 horas e a vazão observada atual q^0 ;

Δqm - diferença entre a vazão máxima observada nas próximas 96 horas e a vazão observada atual q^0 ;

- Δqa - diferença entre a vazão observada atual q^o e a vazão observada no tempo anterior de -24 horas, q^{-24} ; e
- ϕ_1 - fator condicional da probabilidade da diferença entre a previsão de vazão máxima e a atual, relativo ao comportamento da vazão observada (última diferença de 24 horas).

Com a aplicação do teorema de Bayes, obtém-se a probabilidade posterior da diferença entre vazão máxima observada nas próximas 96 horas e vazão atual, $P(\Delta qm | \cdot)$, que assume a seguinte forma:

$$P(\Delta qm | \Delta fm, \Delta qa) = \frac{P(\Delta fm | \Delta qm, \Delta qa)P(\Delta qm | \Delta qa)}{P(\Delta fm | \Delta qa)} \quad (7.22)$$

De forma similar, para o tempo previsto de ocorrência da vazão máxima em 96 horas, tem-se que:

$$P(\Gamma m | Tm, \phi_2) = P(\Gamma m | Tm, \Delta qm) \quad (7.23)$$

onde:

- Γm e Tm - tempo previsto e observado da ocorrência da vazão máxima nas próximas 96 horas; e
- ϕ_2 - fator condicional da probabilidade do tempo previsto da ocorrência da vazão máxima, relativo ao comportamento futuro da vazão observada (diferença entre vazão máxima observada futura e vazão atual).

Com a aplicação do teorema de Bayes obtém-se a probabilidade posterior do tempo observado de ocorrência da vazão máxima nas próximas 96 horas $P(Tm | \cdot)$:

$$P(Tm | \Gamma m, \Delta qm) = \frac{P(\Gamma m | Tm, \Delta qm)P(Tm | \Delta qm)}{P(\Gamma m | \Delta qm)} \quad (7.24)$$

Com as probabilidades obtidas nas equações (7.22) e (7.24) é possível derivar a probabilidade conjunta de o nível exceder determinado limite h^* e o tempo de alagamento ser menor ou igual a determinado limite t^* , $P(H > h^*, T \leq t^*)$, que é utilizado na emissão do alerta:

$$P(H > h^*, T \leq t^*) = P(T \leq t^* | H > h^*)P(H > h^*) \quad (7.25a)$$

$$P(H > h^*) = P(\Delta qm > (cv(h^*) - q^0) | \Delta fm, \Delta qa) \quad (7.25b)$$

$$P(T \leq t^* | H > h^*) = P(Tm \leq \frac{\Delta qm}{cv(h^*) - q^0} t^* | \Gamma m, \Delta qm > (cv(h^*) - q^0)) \quad (7.25c)$$

onde $cv(\cdot)$ é a função de transformação da cota em vazão, utilizada na recuperação do valor da vazão correspondente à h^* .

Conforme se pode verificar na formulação acima, a probabilidade de excedência do nível foi transformada em uma probabilidade posterior da diferença entre vazão máxima nas próximas 96 horas e vazão atual, condicional à previsão dessa diferença

e da diferença observada anterior de 24 horas. Essa transformação é factível neste estudo porque a probabilidade do nível exceder h^* é considerada igual à probabilidade da vazão máxima exceder a $cv(h^*)$ ou de Δqm exceder $cv(h^*) - q^0$ nas próximas 96 horas, ou seja, $cv(.)$ é considerada função monotônica crescente de um para um. Também a probabilidade acumulada do tempo de alagamento T foi transformada na probabilidade posterior do tempo observado da vazão máxima nas próximas 96 horas Tm , condicional ao tempo previsto e à diferença da vazão máxima Δqm exceder $cv(h^*) - q^0$. Nesse último caso, essa transformação foi realizada fazendo-se o tempo de alagamento proporcional ao tempo da vazão máxima na forma $\frac{T}{Tm} = \frac{cv(h^*) - q^0}{\Delta qm}$, onde

$T \leq t^*$ implica em $Tm \leq \frac{\Delta qm}{cv(h^*) - q^0} t^*$, uma vez que a edificação não está alagada

($cv(h^*) > q^0$) e $\Delta qm > (cv(h^*) - q^0)$. De forma a obter uma amostra significativa em cada combinação dos fatores condicionais nas matrizes de verossimilhança foram considerados os seguintes números de classes: 20 para as diferenças de vazão, 16 para os tempos previstos e observados e três para os parâmetros ϕ_1 e ϕ_2 . Também nesse processo apresentado de estimação dos erros, a opção pelo levantamento das probabilidades das diferenças entre vazões máximas e atuais contornou o problema crítico do reduzido tamanho das amostras em situações de eventos severos. A formulação apresentada, apesar de representar uma simplificação do problema completo, no qual uma família de distribuições de probabilidades condicionais bivariadas da forma $P(\Delta fm, \Gamma m | \Delta qm, Tm)$ deveria ser estimada, é um avanço às formulações apresentadas (KRZYSZTOFOWICZ, 1983a, 1993 e 1998), nas quais os tempos de alagamento e de vazão máxima não são tratados como variáveis aleatórias no processo decisório de emissão do alerta.

Conforme os critérios e estratégias apresentados, o processo decisório de emissão do alerta fica conformado neste estudo em um problema de otimização, no qual se busca minimizar o critério de mensuração de impactos adotado, o valor médio das perdas residenciais anuais ou o índice de impacto social das inundações, em cada planície de inundação. Isto é realizado, na abordagem determinística, a partir da estimação de um valor para o tempo de segurança (de 6 a 90 horas) ou, na abordagem probabilística, de um valor limite para a probabilidade conjunta de o nível exceder a cota média da planície e o tempo de alagamento ser menor ou igual a 30 horas.

As matrizes de verossimilhanças desenvolvidas também são utilizadas para a tomada de decisão sobre graus de proteção, quando do uso da estratégia

probabilística. Nesse caso, o valor esperado das perdas associadas a cada grau de resposta é calculado com base nas probabilidades $P(H > h)$ e $P(T \leq t | H > h)$, estimadas na forma acima, onde h e t são feitas variáveis, que representam os limites das planícies de inundação e os horizontes de tempo da previsão (6, 12, ..., 96 horas). O grau de resposta que minimiza o valor esperado das perdas é selecionado como decisão para contratação e posterior tentativa de implementação.

7.5.5 Metodologia de análise de desempenho do sistema de alerta de inundações

As opções metodológicas para análise de desempenho do sistema de alerta de inundações incluem medidas estatísticas de qualidade e medidas utilitárias de valor. As primeiras abrangem as curvas de características operacionais (ROC), que relacionam a probabilidade de detecção e a probabilidade de falso alerta, bem como as curvas de balanço característico de desempenho, apresentadas por KRZYSZTOFOWICZ (1993), que relacionam o número médio anual de detecções de inundações e o número médio anual de falsos alertas. Essa última curva contempla informações mais compreensíveis para o tomador de decisão de emissão do alerta, sendo utilizada neste estudo. O aspecto fundamental embutido na utilização dessas curvas é a possibilidade de análise do desempenho do sistema de alerta como um todo e não de uma seleção particular de situação operacional, que normalmente envolverá aspectos de qualidade conflitantes. Apesar de suas vantagens evidentes, a análise isolada dessas curvas não é suficiente para determinar o desempenho de um sistema de alerta de inundações. Para aprimorar a análise, conforme sugestão de KRZYSZTOFOWICZ (1993), propõe-se também investigar a curva dos tempos médios entre a detecção e o início da inundação, em relação ao número esperado anual de falsos alertas.

Conforme discutida no item anterior, a seleção do ponto de operação do sistema de alerta será realizada com a inclusão de medida utilitária de valor, derivada dos critérios adotados: valor médio das perdas residenciais anuais e índice de impacto social das inundações. O processo de minimização desses critérios determinará pontos ótimos de operação do sistema de alerta e com a utilização das curvas de características de balanço de desempenho e dos tempos médios entre a detecção e o início da inundação, se conhecerá as conseqüências de uso do sistema sob as situações operacionais particulares selecionadas.

7.5.6 Metodologia de análise do valor da informação de alerta

A estimativa do valor da informação de alerta é condicionada pela seleção do escopo da análise e do critério de avaliação adotado. Assim, pode-se proceder à análise do valor da informação a nível individual, para uma edificação ou domicílio, ou a nível agregado, por planície de inundação ou para a cidade como um todo. Também é possível investigar o valor da informação em termos de economia promovida pelo seu uso nas perdas médias residenciais anuais, expressando-o em reais / ano, ou estimá-lo em termos de redução obtida no índice de impacto social das inundações, expressando-o em dias de renda familiar / ano.

Além das questões apresentadas de escopo e critério, é possível investigar em um estudo do valor da informação as seguintes medidas reveladoras do processo de construção do valor: valor da informação de alerta, absoluto e relativo, valor da informação perfeita e valor de inclusão da incerteza (MORGAN e HENRION, 1990). A carência de dados sobre o comportamento do tomador de decisão quanto às preferências e atitudes em relação aos riscos impõe o uso do modelo aditivo simplificado, no qual o valor da informação é calculado pela diferença de resultados entre situações de uso da informação de alerta e uso da informação de referência climatológica. Dentro do contexto deste estudo, as seguintes medidas de valor da informação podem ser definidas:

$$VI_{AB} = EC - EI_{AB} \quad (7.26a)$$

$$VP = EC - EP \quad (7.26b)$$

$$VRI_{AB} = \frac{EC - EI_{AB}}{EC - EP} = \frac{VI_{AB}}{VP} \quad (7.26c)$$

onde:

- VI_{AB} - valor da informação, obtido a partir da aplicação de uma estratégia A de emissão do alerta e uma estratégia B de decisão de proteção ($A=P$ ou D , para as estratégias probabilística ou determinística e; $B=P, D$ ou S , para as estratégias probabilística, determinística ou subjetiva);
- EI_{AB} - resultado esperado com o uso da informação, obtido a partir da aplicação das estratégias A e B ;
- EC e EP - resultados esperados com o uso da informação climatológica e da informação perfeita;
- VP - valor da informação perfeita; e
- VRI_{AB} - valor relativo da informação, obtido a partir da aplicação das estratégias A e B .

Também podem ser definidas medidas para o valor de inclusão da incerteza VII_{AB} e para o valor relativo de inclusão da incerteza, $VRII_{AB}$, ambos obtidos a partir da aplicação das estratégias *A* e *B*:

$$VII_{AB} = EI_{DD} - EI_{AB} = VI_{AB} - VI_{DD} \quad (7.27a)$$

$$VRII_{AB} = \frac{EI_{DD} - EI_{AB}}{EC - EP} = \frac{VII_{AB}}{VP} \quad (7.27b)$$

bem como para a defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita, obtida a partir da aplicação das estratégias *A* e *B*, D_{AB} :

$$D_{AB} = VP - VI_{AB} = EI_{AB} - EP \quad (7.28)$$

No âmbito deste estudo de valor, o resultado esperado do uso da informação climatológica EC é igual ao impacto potencial da inundação, medido conforme o critério selecionado. Isto acontece porque o conhecimento único da informação climatológica de vazão e nível conduz à decisão nula a respeito de emissão de alerta ou ações de proteção para os casos de eventos extremos e raros, como as inundações. A comparação dessas múltiplas medidas do valor da informação (VI_{AB} , VP , VII_{AB}), aplicadas conforme o escopo e critério selecionados, para os casos dos modelos de previsão hidrológica investigados, permite uma análise aprofundada sobre o potencial de benefícios que pode ser associado a um sistema de alerta de inundações estruturado dessa forma.

Uma última questão pesquisada que envolve a gestão do valor da informação foi a busca de um instrumento de análise da relação entre as oportunidades de melhoria do processo de previsão hidrológica e as suas conseqüências em termos de agregação potencial de valor. Este estudo de alerta de inundações incorpora dois fatores complicadores para a análise da relação entre erros da previsão e valor da informação: (1) o processo decisório é simultaneamente dependente de duas variáveis que podem ser derivadas da previsão, a vazão ou nível máximo previsto e o tempo esperado para a inundação do imóvel; e (2) o processo decisório é dinâmico, realizado em múltiplas etapas com dependência temporal entre elas. Essas características dificultam a análise a partir da estruturação dos erros na forma de matrizes de defasagem em relação à informação perfeita, conforme discutido no Anexo A, itens A.1 e A.6. Em vistas dessas particularidades do problema e do fato das oportunidades de intervenção no processo de previsão comumente privilegiarem o curto prazo, o interesse de análise foi focado na avaliação da sensibilidade do valor da informação a melhorias progressivas da previsão, em relação ao horizonte de tempo de referência. Assim, horizontes críticos de previsão poderiam ser reconhecidos, cuja melhoria estaria associada a significativas reduções de defasagem de valor em relação à informação perfeita. A opção metodológica desenvolvida para avaliar as potenciais

conseqüências dessas melhorias no valor da informação foi a construção, a partir das previsões de um modelo hidrológico, de novas seqüências de previsões, as quais foram denominadas previsões melhoradas a partir do curto prazo. Essas novas previsões foram definidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} f_t^*(npp) &= q_t && \text{para } t \leq 6npp \\ &= f_t && \text{para } t > 6npp \end{aligned} \quad (7.29)$$

onde:

- npp - número de previsões perfeitas nas seqüências de previsões melhoradas;
- $f_t^*(npp)$ - previsão melhorada a partir do curto prazo para o horizonte de tempo t , medido em horas ($t=6,12,\dots,96$) e com npp previsões perfeitas; e
- f_t e q_t - previsão do modelo hidrológico para o horizonte de tempo t e vazão observada nesse tempo.

Conforme se pode perceber da formulação acima, quando se aumenta o número de previsões perfeitas, as previsões melhoradas a partir do curto prazo tornam-se progressivamente perfeitas nos seus primeiros horizontes de previsão. A simulação dessas novas seqüências de previsões, condicionadas pelo número de previsões perfeitas, permite avaliar os impactos potenciais de melhorias desse tipo sobre a qualidade e valor da informação, determinando valores de referência para os benefícios que podem ser associados a esses esforços de modernização da previsão.

7.6 Resultados do estudo

Com base nos modelos de previsão hidrológica e de processos decisórios, bem como nos critérios e medidas de impacto das inundações e de valor da informação discutidos, foi possível implementar um ambiente de simulação, baseado em Dinâmica de Sistemas, para estimativa e análise da sensibilidade do valor da informação de alerta de inundações para o caso de União da Vitória. A estrutura do ambiente de simulação foi configurada de acordo com o esquema proposto de simulação e análise do valor da informação, componente da metodologia proposta, apresentado no item 6.3.2. A implementação foi realizada no ambiente de Dinâmica de Sistemas VENSIM, da Ventana Systems, sendo composta de nove módulos de tratamento de dados e simulação, de acordo com o diagrama de bloco apresentado na Figura 7.14. Esse diagrama permite reconhecer os módulos de simulação do comportamento hidrológico, de geração de informações de previsão e de referência, de verificação da qualidade, de tomada de decisão baseada nas previsões, condicionadas por fatores geográficos, sociais e comportamentais, de análise dos impactos das inundações, de verificação do desempenho do sistema e de estimativa do valor da informação de alerta.

Um aspecto relevante de implementação considerado foi o de atualização dinâmica da estrutura de erros da previsão hidrológica, utilizada nas estratégias probabilísticas de emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção. A renovação das matrizes de verossimilhança da diferença de vazão máxima prevista em 96 horas e do seu tempo de ocorrência é realizada a cada ciclo de previsão, conforme modelo discutido no item 7.5.4.2, sendo que a utilização das mesmas é permitida com pequena defasagem de tempo. Essa defasagem foi considerada de 96 horas nesta implementação. Esse esquema permite a manutenção de uma estrutura de erros permanentemente atualizada, que serve de base para a geração e disseminação das seguintes informações sobre as incertezas da previsão: a probabilidade conjunta de inundação e de seu tempo de alagamento, utilizada na estratégia probabilística de emissão do alerta; e as distribuições de probabilidade da inundação em cada planície e de seu tempo condicional de ocorrência, utilizadas na estratégia probabilística de decisão sobre ações de proteção.

Exemplo de resultado de simulação realizada no ambiente de Dinâmica de Sistemas implementado para estimativa e análise do valor da informação de alerta pode ser visualizado na Figura 7.15. Os dados de ocupação da planície de inundação, que condicionam os impactos, são correspondentes ao ano de 2000 e o período de simulação de 70 anos compreende os anos de 1930 a 1999.

7.6.1 Análise da qualidade das previsões hidrológicas

As variáveis hidrológicas fundamentais para a tomada de decisão de emissão do alerta e ações de proteção são a vazão máxima prevista e o nível correspondente, e os tempos previstos de ocorrência da vazão máxima e de alagamento do imóvel. A análise de qualidade realizada foi focada somente na previsão da vazão máxima em 96 horas e seu tempo de ocorrência, uma vez que as demais variáveis podem ser derivadas, com alguma aproximação, dessas duas primeiras. Conforme discutido no item 7.5.2.1, foram analisadas a acurácia, a associação linear e a existência de erro sistemático para as previsões de 6 em 6 horas realizadas pelos modelos Arima e de filtro de Kalman, durante o período de verificação (1930-1999). As previsões do modelo Arima são fruto da aplicação direta do modelo sobre a série histórica estimada, enquanto as previsões do modelo baseado em filtro de Kalman são derivadas de simulações realizadas a partir de matrizes de verossimilhança condicionadas, cujo método construtivo foi apresentado no item 7.5.2.3. Conforme discutido naquele item, foram geradas 10 seqüências de simulações para cada um dos 11 valores de informatividade selecionados ($\theta=0;0,1;0,2;\dots,1$), bem como para a previsão de precipitação sempre nula ($p0$) e para a previsão perfeita até 24 horas ($p1$) e considerada a média das medidas como representativa da qualidade das previsões.

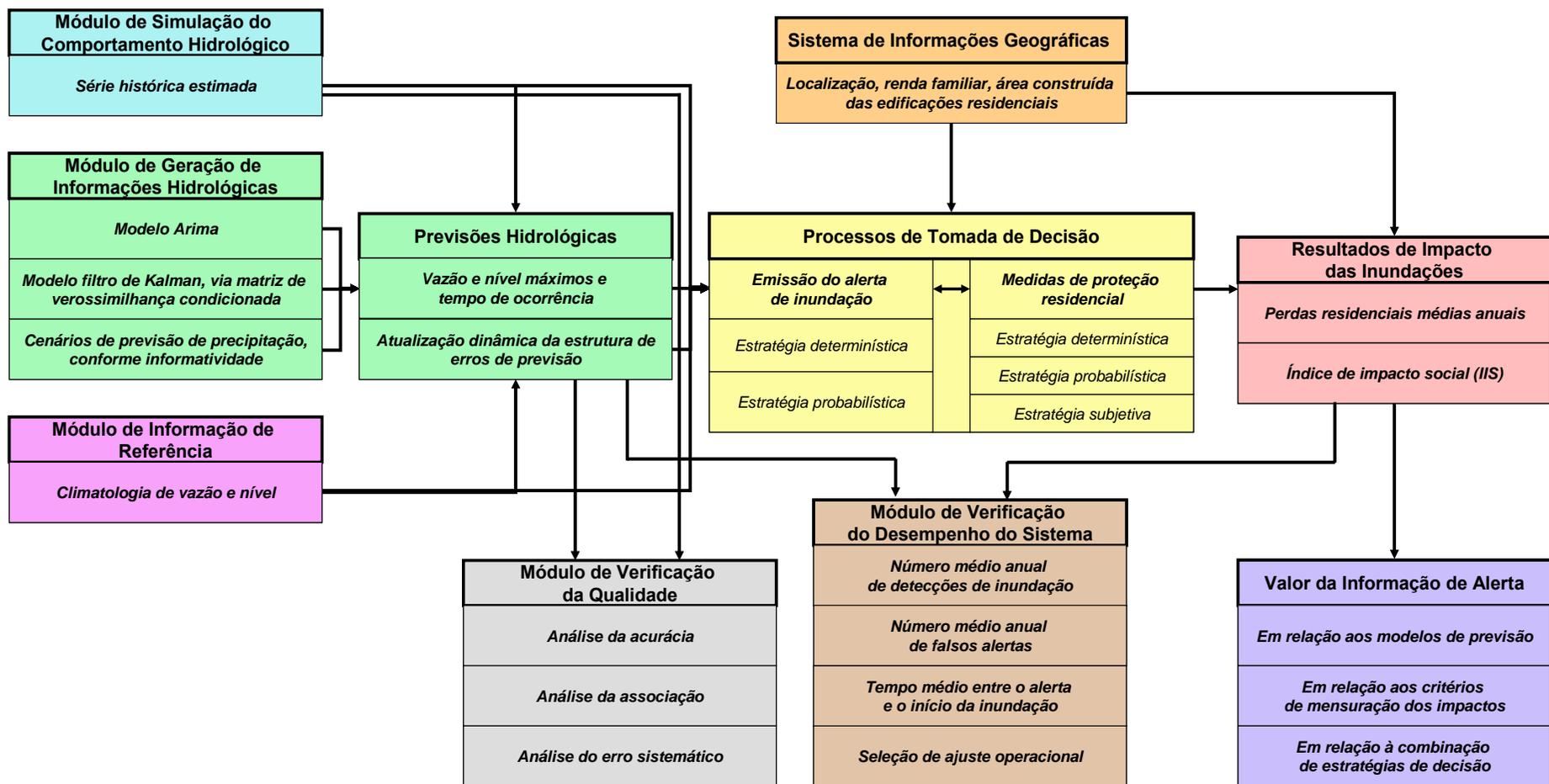


Figura 7.14: Diagrama de bloco utilizado na implementação do ambiente de análise e estimativa do valor da informação de alerta de inundação para o caso de União da Vitória

Impacto das Inundações e Valor da Informação de Alerta: Modelo Arima - Planície de 5 anos - Combinação de Estratégias Probabilísticas - Probabilidade Conjunta Limite de 0,20

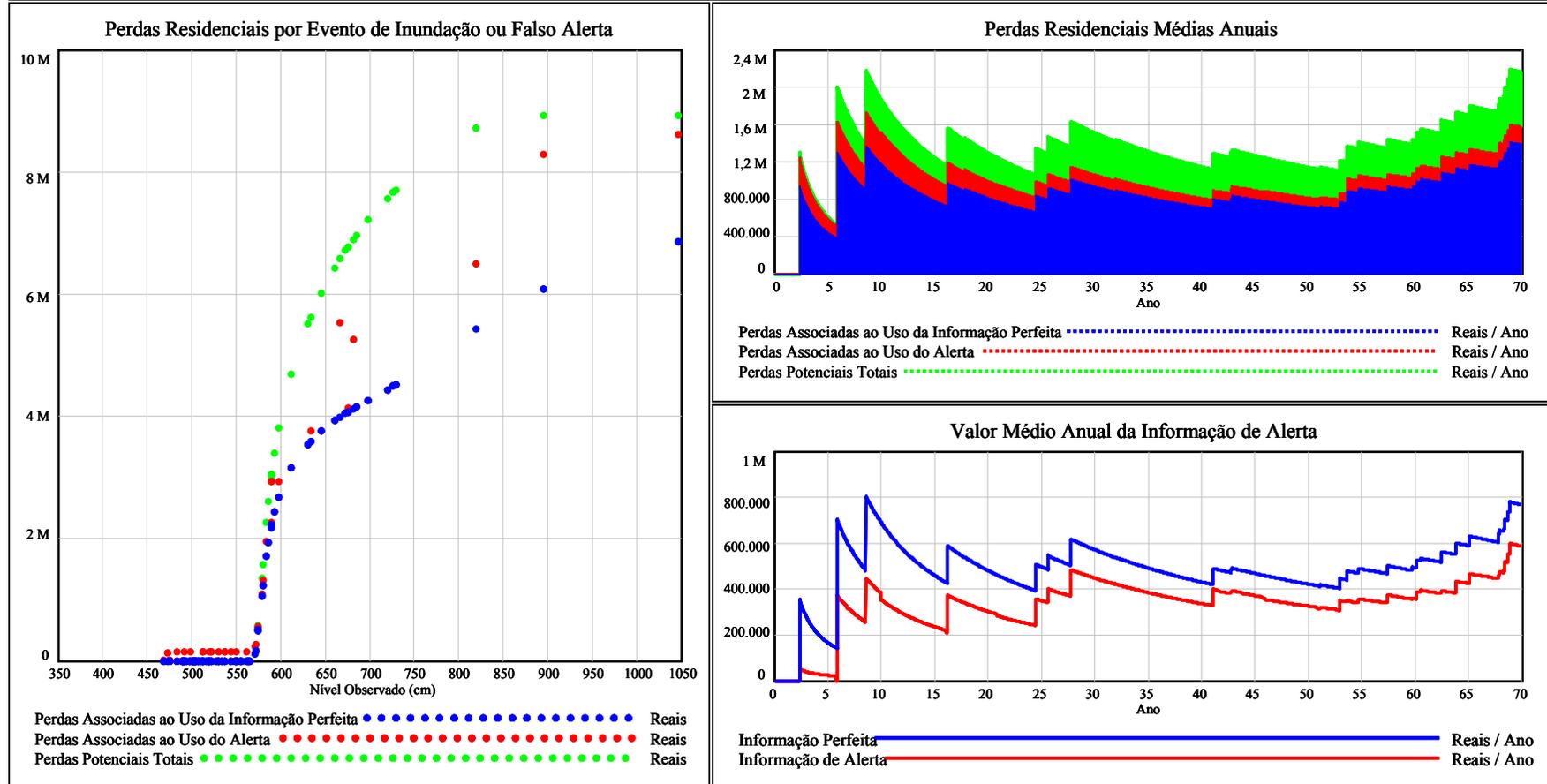


Figura 7.15: Resultado da simulação dos impactos das inundações e valor da informação, em termos das perdas residenciais médias anuais, para o caso da combinação de estratégias probabilísticas (probabilidade conjunta limite de 0,20), modelo de previsão Arima e planície de inundação de 5 anos em União da Vitória (ocupação da planície correspondente ao ano de 2000, simulação correspondente ao período de 1930 a1999)

Os resultados da análise de qualidade são mostrados na Tabela 7.6. Conforme se pode verificar, em relação às previsões de vazão máxima em 96 horas, o modelo baseado em filtro de Kalman, para todas as simulações, apresentou menor erro sistemático e maior acurácia e associação que o modelo Arima. Ambos os modelos apresentaram tendência geral em subestimar o valor da vazão máxima, sendo que parte significativa do erro médio quadrático advém de desvios negativos (aproximadamente 95 % da medida). A vazão média observada e seu desvio padrão no período de verificação foram de 468 e 426 m³/s, respectivamente. A razão entre o erro médio quadrático da previsão da vazão máxima e a variância da vazão observada foi inferior a 0,09 para todos os modelos e simulações. Para o modelo baseado em filtro de Kalman, a qualidade é crescente com a informatividade, o uso de previsão de precipitação agrega qualidade à previsão da vazão máxima (*p0* apresenta piores medidas de qualidade) e o esquema de previsão de precipitação por categoria mostrou-se satisfatório (a diferença de qualidade entre *01* e *p1* é pequena). Uma visão da acurácia das previsões de vazão máxima analisadas, em termos da medida do erro médio quadrático, e sua relação com a informatividade da previsão de precipitação é mostrada na Figura 7.16.

Tabela 7.6: Medidas de qualidade das previsões hidrológicas dos modelos Arima e filtro de Kalman, abrangendo as variáveis vazão máxima em 96 horas e seu tempo de ocorrência, para o período analisado de 1930 a 1999

Análise de Qualidade da Previsão																
Aspecto Analisado	Medida	Unidade	Modelos													
			Arima	Filtro de Kalman												
				p0	00	00,1	00,2	00,3	00,4	00,5	00,6	00,7	00,8	00,9	01	p1
Variável	Vazão Máxima em 96 horas															
Erro Sistemático	EM	m ³ /s	-37	-35	-31	-30	-29	-29	-28	-27	-25	-24	-23	-23	-23	
Acurácia	EMA	m ³ /s	53	47	47	47	47	47	47	46	46	46	45	44	42	41
	EMQ	(m ³ /s) ²	14.755	13.514	13.145	13.114	13.036	12.944	12.810	12.627	12.375	12.066	11.620	11.102	10.489	10.415
	EMQ-	(m ³ /s) ²	14.334	13.179	12.590	12.540	12.450	12.347	12.188	11.985	11.705	11.378	10.952	10.497	10.010	9.951
	EMQ+	(m ³ /s) ²	421	335	555	574	585	598	622	642	670	689	668	604	480	464
Associação Linear	Coefficiente de Correlação	-	0,9668	0,9695	0,9698	0,9698	0,9699	0,9700	0,9702	0,9705	0,9709	0,9716	0,9726	0,9739	0,9755	0,9757
Variável	Tempo de Ocorrência da Vazão Máxima em 96 horas															
Erro Sistemático	EM	h	4,9	-6,2	1,6	3,4	5,4	7,2	9,0	10,4	11,1	11,0	9,5	6,3	1,1	0,5
Acurácia	EMA	h	36	26	27	27	28	28	29	29	29	29	29	28	26	26
	EMQ	h ²	2.618	1.542	1.588	1.613	1.650	1.686	1.722	1.751	1.764	1.748	1.694	1.590	1.472	1.469

Em relação às previsões do tempo de ocorrência da vazão máxima em 96 horas, de forma geral, todos os modelos e simulações demonstraram baixa capacidade preditiva, com acurácia, medida pelo erro médio absoluto, variando entre 29 e 40 % do erro máximo admissível de 90 horas. A média e o desvio padrão do tempo observado de ocorrência da vazão máxima no período de verificação foram de 41 e 36,5 h, respectivamente. O erro médio quadrático foi superior à variância observada para todos os modelos e simulações. O modelo Arima apresentou menor acurácia que todas as simulações do modelo baseado em filtro de Kalman. Cabe ainda ressaltar a ocorrência de erro sistemático negativo para a simulação sem previsão de precipitação (*p0*) e maiores erros médios absolutos para valores intermediários de informatividade. Essa situação do comportamento do erro médio absoluto das previsões do tempo de ocorrência da vazão máxima pode ser observada na Figura 7.17.

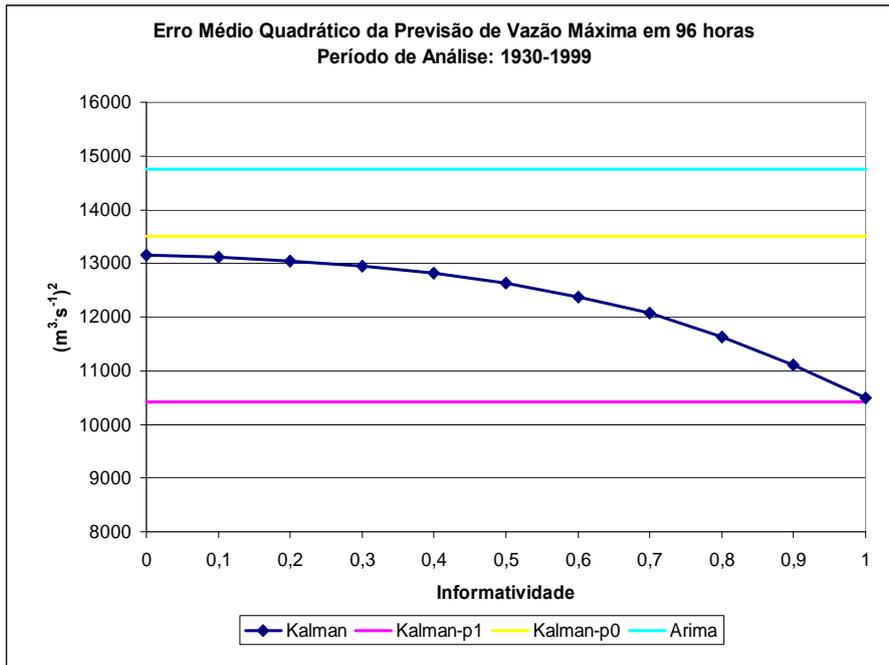


Figura 7.16: Comportamento do erro médio quadrático das previsões de vazão máxima em 96 horas dos modelos Arima e filtro de Kalman, para o período de 1930 a 1999

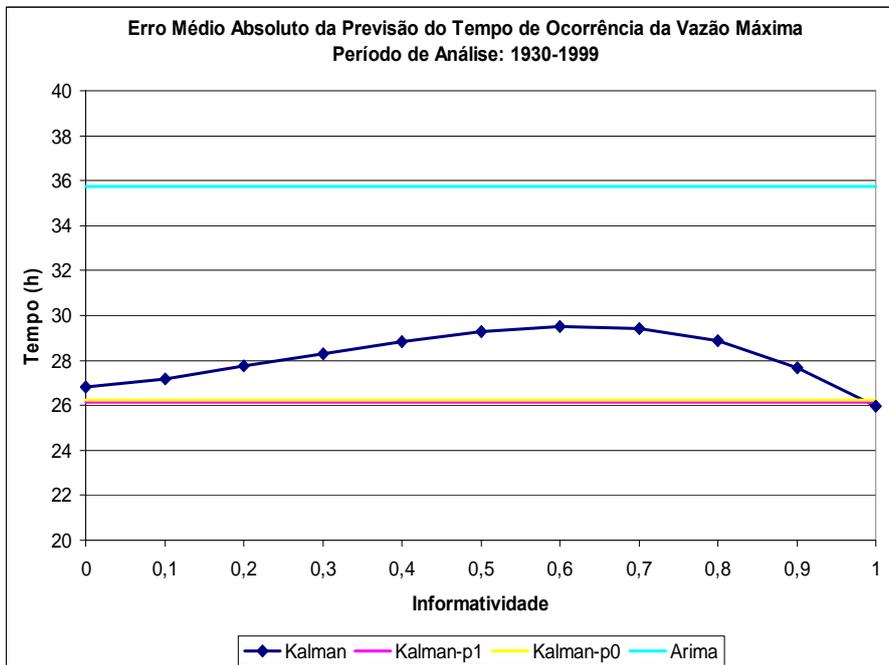


Figura 7.17: Comportamento do erro médio absoluto das previsões do tempo de ocorrência da vazão máxima em 96 horas dos modelos Arima e filtro de Kalman, para o período de 1930 a 1999

As relações dessas características de qualidade das previsões hidrológicas com o valor do alerta de inundações derivado foram investigadas e são discutidas no item 7.6.5.

7.6.2 Valores de referência sobre os impactos das inundações em União da Vitória

A implementação do ambiente de estimativa e análise do valor da informação de alerta de inundações para União da Vitória apresentado na Figura 7.14 permitiu o levantamento de alguns valores de referência fundamentais na análise de desempenho do sistema de alerta e na estimativa do valor da informação gerada. Esses valores abrangem, além do número anual observado de inundações, os impactos potenciais e perfeitos em termos de perdas médias residenciais anuais e índice de impacto social. Os valores de referência calculados, considerando cada planície de inundação separadamente e a totalidade da área inundável da cidade, são apresentados na Tabela 7.7. Cabe destacar que os valores de impactos potenciais, também denominados climatológicos, são resultados da estratégia nula, de nunca tomar medidas de proteção contra inundações, enquanto os valores de impactos perfeitos são resultados do uso hipotético da informação perfeita com 96 horas de antecedência. Para simplificação do cálculo dos impactos das inundações, as edificações localizadas ao longo de cada planície foram consideradas como concentradas no seu nível médio.

Tabela 7.7: Valores de referência sobre impactos das inundações em União da Vitória

Valores de Referência sobre Impactos das Inundações em União da Vitória					
Planície de Inundação (anos)	Número Observado Anual de Inundações (unidades/ano)	Perdas Residenciais Anuais Potenciais (mil Reais/ano)	Perdas Residenciais Anuais Perfeitas (mil Reais/ano)	Índice de Impacto Social Potencial (dias de renda familiar/ano)	Índice de Impacto Social Perfeito (dias de renda familiar/ano)
2	0,886	251	159	163,67	104,38
5	0,443	2.159	1.392	76,82	49,60
10	0,171	2.203	1.460	21,49	14,28
20	0,043	684	430	9,18	5,76
25	0,043	236	149	7,17	4,54
40	0,029	209	130	5,40	3,35
50	0,029	136	83	3,75	2,32
100	0,014	183	111	2,42	1,46
200	0,014	46	35	1,01	0,75
Total	—	6.107	3.949	17,48	11,32

Uma comparação entre métodos de estimativa das perdas potenciais totais revelou similaridade entre os valores calculados. A estimativa adotada, apresentada na Tabela 7.7, adveio do uso do método das funções unitárias de nível versus perda e das vazões e cotas correspondentes da série histórica estimada, conforme descrito no item 7.5.1. Esse processo estimou perdas residenciais totais de R\$ 6,107 milhões / ano. Uma segunda estimativa foi realizada com as mesmas funções de nível versus

perdas e geração de vazões por meio da simulação de Monte Carlo, com o uso da distribuição de probabilidades da vazão máxima anual levantada por TUCCI e VILLANUEVA (1997). Esse processo estimou um valor esperado das perdas residenciais de R\$ 6,281 milhões / ano. Os valores diferem em menos de 3 %, o que fortalece a representatividade da série histórica estimada e seu uso na avaliação de perdas. A diferença é devida ao ajuste de uma função teórica de probabilidade, na qual se considerou como variável a vazão anual máxima e se incluiu marca histórica não presente na série. Essas distinções conceituais são responsáveis pela geração de vazões maiores que as observadas na série histórica estimada e, portanto, de maiores perdas por inundação. Elas também explicam as diferenças entre o número anual observado de inundações e a probabilidade de ocorrência de inundação em cada planície (inverso do tempo de recorrência). O uso do método das perdas médias por edificação atingida com a geração sintética de vazões máximas anuais rendeu o valor de R\$ 5,973 milhões / ano para as perdas residenciais (diferença de menos de 3 % em relação à estimativa adotada) e o valor de R\$ 15,685 milhões / ano para as perdas totais em União da Vitória (uso do fator de conversão de perdas diretas em totais de 1,5). Todos os valores de perdas residenciais estimados, correspondentes a valores de controle na terminologia da metodologia proposta, são próximos, fato que reforça mutuamente os métodos e modelos investigados.

O valor total estimado para as perdas residenciais perfeitas foi de R\$ 3,949 milhões / ano, o que representa um limite inferior de impacto das inundações, abaixo do qual não se podem reduzir as perdas com o uso de informação de alerta, dentro do esquema proposto. A diferença de R\$ 2,158 milhões / ano, cerca de 35 % do total, representa o benefício hipotético máximo que pode ser alcançado com o uso das informações de alerta em União da Vitória. Parte desse benefício pode ser apropriada pela população da cidade com a tomada de decisão baseada nos alertas de inundação emitidos com base em previsões imperfeitas advindas dos modelos hidrológicos investigados.

O índice de impacto social potencial, discutido no item 7.5.4.2, correspondente à área total inundável de União da Vitória, foi estimado em 17,48 dias de renda familiar / ano, o que reflete o tamanho do esforço necessário por parte da população potencialmente atingível para recompor as perdas potenciais devido às inundações esperadas todos os anos. Esse valor é condizente com a classificação de nível máximo em prejuízos causados por inundações para a região de União da Vitória, conforme avaliação da JICA (1995a). Com o uso da informação perfeita de alerta, esse índice pode ser reduzido para 11,32 dias de renda familiar / ano. De forma similar

às perdas residenciais anuais, a diferença de 6,17 dias de renda familiar / ano representa o benefício máximo de uso das informações de alerta na cidade.

A distribuição das perdas residenciais anuais e do índice de impacto social entre as planícies de inundação é regulada pela configuração geográfica e social de ocupação da região pela população de União da Vitória, com destaque, para o número e área construída das edificações e classe econômica dos domicílios inundáveis em cada planície. Uma visão dessa distribuição é dada pela Figura 7.18.

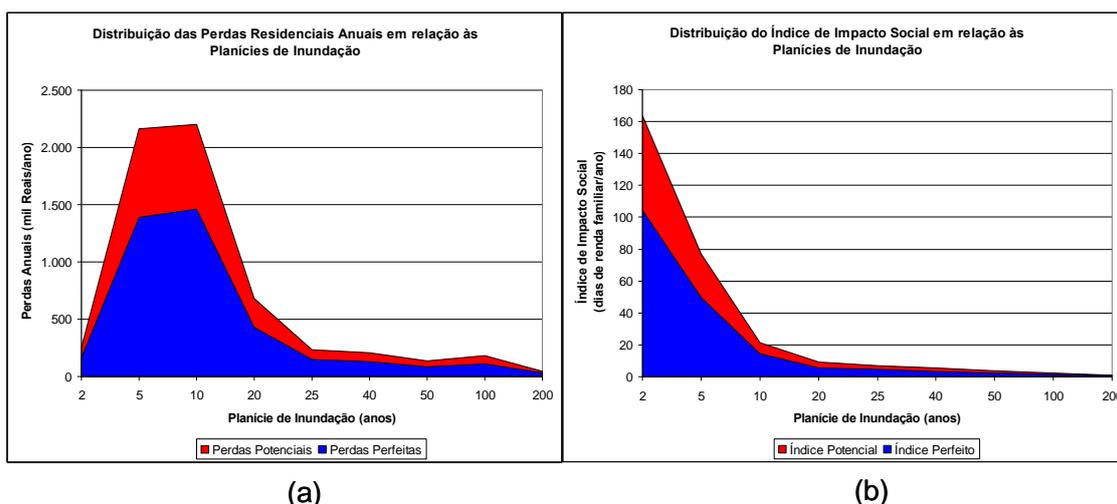


Figura 7.18: Distribuição das perdas residenciais anuais (a) e do índice de impacto social (b) em relação às planícies de inundação consideradas

Conforme se pode observar na Figura 7.18, as perdas residenciais, potenciais e perfeitas, estão concentradas nas planícies de 5 e 10 anos de tempo de recorrência, fato relacionado à combinação de frequência e severidade das inundações e número de edificações atingíveis nessas planícies. Os índices de impacto social, potencial e perfeito, diminuem com o tempo de recorrência da planície de inundação, refletindo, além da frequência e severidade das inundações, concentração relativa de baixa renda familiar nas primeiras planícies de inundação. A análise combinada desses valores de resultados referenciais com aqueles advindos do uso das informações disponíveis permite reconhecer os avanços já alcançados e as oportunidades existentes na gestão da informação de alerta de inundações para o caso em estudo.

7.6.3 Análise de desempenho do sistema de alerta de inundações

Para a análise de desempenho e ajuste operacional do sistema de alerta de inundações foi necessária a realização de um grande número de simulações no ambiente desenvolvido com vistas a expressar as suas múltiplas alternativas de operação. Essas simulações foram realizadas independentemente para cada planície

de inundação, variando-se um parâmetro de ajuste operacional, que é determinado pela estratégia de emissão do alerta, considerada neste estudo como determinística ou probabilística.

Assim, conforme discutido no item 7.5.4.2, para a estratégia determinística, é necessário estabelecer um tempo de segurança que, somado aos tempos de processamento e disseminação das previsões, define o horizonte de tempo de previsão abaixo do qual se emite o alerta sempre que a previsão de nível exceder a cota média da planície de inundação. Como, no caso em estudo, o tempo total de processamento e disseminação foi considerado de 6 horas e as previsões são emitidas de 6 em 6 horas até o horizonte de 96 horas, foram realizadas 15 simulações correspondentes aos tempos de segurança de 6, 12, 18 até 90 horas. Para a estratégia probabilística de emissão do alerta, que está baseada na probabilidade conjunta de o nível exceder a cota média da planície de inundação e o tempo de alagamento ser menor ou igual ao limite de 30 horas (24 horas necessárias para a implementação da proteção plena + 6 horas de perda de processamento e disseminação), após estudos de sensibilidade do desempenho do alerta, foi considerado a simulação de 20 casos de probabilidades limites para emissão do alerta (0,01, 0,02,..., 0,1, 0,14, 0,18,..., 0,5). Os indicadores de desempenho investigados para cada modelo, planície e estratégia foram o número médio anual de detecções de inundações, o número médio anual de falsos alertas, o número médio anual de inundações sem alerta, as probabilidades estimadas de detecção (*POD*) e de falso alerta (*FAR*) e o tempo médio entre o alerta e o início da inundação.

Os alertas emitidos a partir de cada estratégia condicionam os impactos das inundações na medida em que influenciam a tomada de decisão sobre ações de proteção residencial que, por sua vez, pode também ser orientada por uma estratégia determinística, probabilística ou subjetiva, conforme discutido no item 7.5.4.1. Nesta análise de desempenho e ajuste operacional do sistema de alerta, resolveu-se investigar os resultados de quatro combinações de estratégias de emissão de alerta e tomada de decisão subsequente sobre ações de proteção: determinística → determinística, determinística → probabilística, probabilística → determinística e probabilística → probabilística. Para cada combinação de estratégias e planície de inundação é possível determinar um ajuste operacional do sistema de alerta, que consiste em selecionar o parâmetro operacional que minimiza o impacto das inundações, de acordo com o critério de interesse (no caso em estudo, as perdas residenciais ou o índice de impacto social das inundações). Como o método adotado neste estudo de estimação das perdas residenciais já considera a diferenciação em termos de grupos de classes sociais e área construída, o ajuste operacional de cada planície de inundação resultou similar para ambos os critérios. Especificamente para o

caso do modelo hidrológico baseado em filtro de Kalman, em vistas do elevado número de simulações necessárias e seu custo computacional, resolveu-se analisar e realizar o ajuste operacional da emissão do alerta considerando a informatividade da previsão de precipitação em 0,5 e de manter as 10 seqüências aleatórias para representar o processo de previsão (análise com 100 seqüências realizada para a planície de 5 anos revelou que os indicadores de desempenho e resultados tiveram coeficiente de variação máximo de 0,11 e que a média de 10 seqüências alternativas variou menos que 3,5 % da média das 100 seqüências). Computando as 9 planícies de inundação, os 15 ou 20 parâmetros de ajuste operacional pesquisados, as 10 seqüências aleatórias do modelo de filtro de Kalman e as 4 combinações de estratégias investigadas, foram realizadas 540 simulações do modelo Arima e 7.200 do modelo de filtro de Kalman para análise do desempenho do sistema de alerta baseado nesses modelos de previsão hidrológica. Nesse contexto foram investigados, para cada modelo, planície e combinação de estratégias, os resultados em termos de perdas residenciais anuais totais e do índice de impacto social vinculados ao uso da informação de alerta.

Conforme discutido no item 7.5.5, foram levantadas as curvas do balanço de desempenho característico e do tempo médio entre o alerta e o início da inundação, o que permitiu uma análise geral das potencialidades e limitações do sistema de alerta baseado em cada modelo e estratégia de emissão do alerta. Exemplos dessas curvas para a planície de inundação de 10 anos de tempo de recorrência podem ser visualizados na Figura 7.19 e Figura 7.20.

As curvas apresentadas na Figura 7.19 e Figura 7.20 traduzem as expectativas de desempenho do sistema de alerta, relacionando para um determinado número médio anual suportado de falsos alertas, o número anual de detecções e o tempo entre o alerta e o início da inundação que podem ser esperados. Conforme se pode verificar para a planície de 10 anos, em relação às estratégias de emissão do alerta, o desempenho geral foi considerado superior para a estratégia probabilística em ambos os modelos analisados. Isto se repetiu para todas as planícies de inundação consideradas. Cabe destacar, porém, que o principal mérito da estratégia probabilística em termos dessas medidas de desempenho foi permitir maior flexibilidade na seleção do ajuste operacional, o que não ocorreu com a estratégia determinística, a qual apresentou menor alteração nos indicadores de desempenho, mesmo quando se variou o tempo de segurança de 6 a 90 horas. Em relação aos modelos hidrológicos, os alertas baseados nas previsões do modelo de filtro de Kalman, com informatividade da previsão de precipitação de 0,5, apresentaram desempenho superior que aqueles baseados nas previsões do modelo Arima, para ambas as estratégias de emissão do alerta.

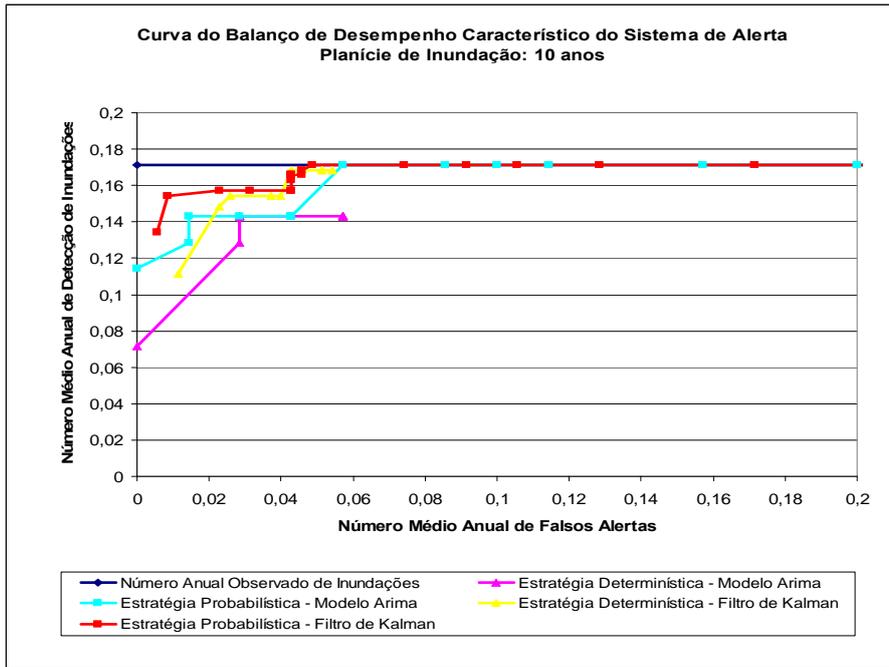


Figura 7.19: Curva do balanço de desempenho característico do sistema de alerta para a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a estratégia de emissão de alerta adotada (determinística ou probabilística) e o modelo de previsão utilizado (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5)

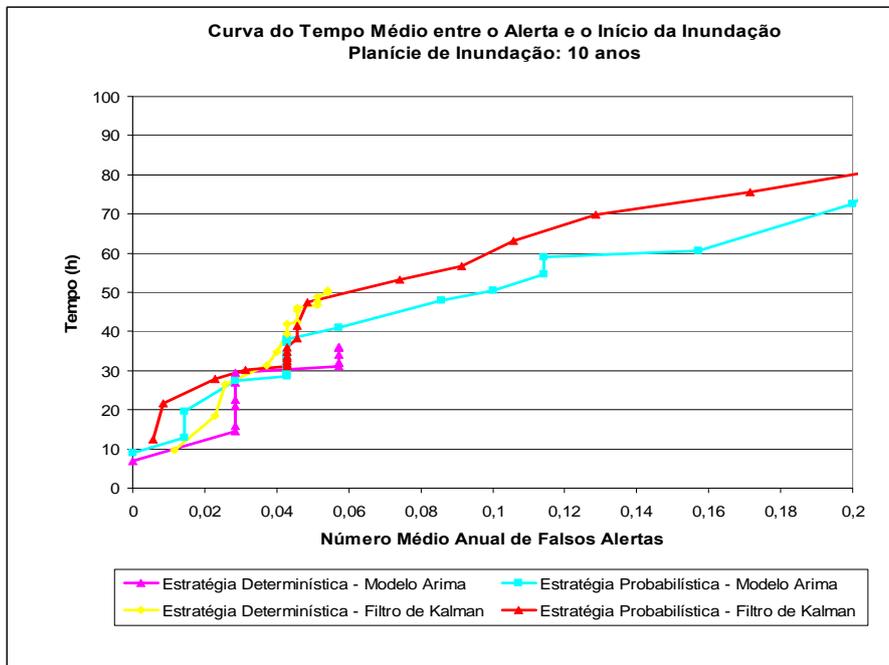


Figura 7.20: Curva do tempo médio entre o alerta e o início da inundação para a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a estratégia de emissão de alerta adotada (determinística ou probabilística) e o modelo de previsão utilizado (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5)

A pesquisa dos parâmetros de ajuste operacional que minimizam as variáveis de impacto ou resultado para cada planície de inundação, combinação adotada de estratégias e modelo hidrológico utilizado permitiu a identificação das condições recomendáveis de operação do sistema de alerta. De maneira geral, para todas as planícies, critérios e modelos analisados, as variáveis de resultados melhoraram com o aumento do tempo de segurança até um limite de saturação e também melhoraram com a redução da probabilidade limite de emissão do alerta, com casos de valor máximo intermediário para a estratégia probabilística de decisão sobre ações de proteção. Esses fatos levaram à seleção de parâmetros de ajuste operacional majoritariamente altos para os tempos de segurança e baixos para as probabilidades limites. Os valores dos parâmetros de ajuste operacional e suas conseqüências em termos de resultados e indicadores de desempenho são mostrados na Tabela 7.8 e Tabela 7.9. Para ilustrar as relações entre os resultados e indicadores de desempenho, a Figura 7.21 e Figura 7.22 mostram o comportamento das perdas residenciais em função do número médio de falsos alertas para a planície de 10 anos, considerando as combinações de estratégias aplicadas sobre a emissão do alerta baseado nas previsões dos modelos Arima e filtro de Kalman. Também são mostrados nas figuras os pontos de ajuste operacional recomendados para cada combinação de estratégias e modelo hidrológico.

A análise da Tabela 7.8 e Tabela 7.9 revela a proeminência dos resultados das estratégias probabilísticas sobre as determinísticas, para todas as combinações e modelos hidrológicos avaliados. Os valores de perdas residenciais totais foram reduzidos de seu valor potencial de R\$ 6,107 milhões / ano para valores entre R\$ 4,529 e 5,404 milhões / ano, com o uso do modelo Arima, ou para valores entre R\$ 4,465 e 4,924 milhões / ano, com o uso do modelo de filtro de Kalman e previsão de precipitação com informatividade de 0,5. Em relação ao índice de impacto social, essas reduções foram do valor potencial de 17,48 para valores entre 12,74 e 15,11 dias de renda familiar / ano para o modelo Arima (entre 12,58 e 13,69 para o modelo de filtro de Kalman). Para ambos os modelos, a mudança da estratégia de decisão sobre ações de proteção, de determinística para probabilística, mostrou-se mais vantajosa que a mesma mudança na emissão do alerta. As vantagens totais de mudança de estratégia (de determinística → determinística para probabilística → probabilística) foram maiores para o modelo Arima do que para o modelo de filtro de Kalman. As perdas residenciais totais foram reduzidas em R\$ 875 mil / ano para o primeiro modelo e em R\$ 459 mil / ano para o segundo. Isto também se verificou em relação ao índice de impacto social, com redução de 2,36 para o modelo Arima e de 1,10 dias de renda familiar / ano para o modelo de filtro de Kalman. Esses dados fortalecem a idéia de que as vantagens de uso das estratégias probabilísticas, considerando esse tipo de problema e modelo, são mais acentuadas para os casos de previsões de menor acurácia.

Tabela 7.8: Valores dos parâmetros de ajuste operacional, resultados e indicadores de desempenho relativos ao sistema de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo Arima

Ajuste Operacional do Sistema de Alerta de Inundações Baseado em Previsões do Modelo Arima				
Planície de Inundação (anos)	Estratégias de Emissão do Alerta			
	Determinística→ Determinística	Determinística→ Probabilística	Probabilística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Parâmetro	Tempo de Segurança (h)		Probabilidade Limite	
2	84	90	0,10	0,07
5	72	84	0,01 (0,14)	0,05
10	66	54	0,22	0,04
20	36	36	0,18	0,02
25	60	60	0,18	0,02
40	30	36	0,18	0,01
50	36	36	0,42	0,02
100	12	12	0,50	0,01
200	48	48	0,14	0,30
Resultado	Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais/ano)			
2	212	194	212	176
5	1.854	1.703	1.822 (1.844)	1.509
10	1.948	1.852	1.944	1.657
20	619	617	619	564
25	229	227	229	198
40	192	187	193	163
50	130	131	130	105
100	180	181	180	123
200	41	35	41	35
Total	5.404	5.127	5.369 (5.391)	4.529
Resultado	Índice de Impacto Social (dias de renda familiar/ano)			
2	134,14	126,38	134,11	114,54
5	65,02	60,43	63,89 (64,53)	53,61
10	18,53	17,90	18,48	16,08
20	8,26	8,26	8,25	7,50
25	6,86	6,83	6,86	5,98
40	4,94	4,80	4,98	4,20
50	3,59	3,57	3,59	2,88
100	2,36	2,40	2,36	1,63
200	0,83	0,75	0,83	0,75
Total	15,11	14,40	14,97 (15,04)	12,74
Indicador de Desempenho	Número Médio Anual de Falso Alerta			
2	0,29	0,29	0,81	1,29
5	0,16	0,16	4,23 (0,24)	0,66
10	0,06	0,06	0,04	0,23
20	0,00	0,00	0,03	0,29
25	0,00	0,00	0,00	0,09
40	0,00	0,00	0,00	0,21
50	0,00	0,00	0,00	0,01
100	0,00	0,00	0,00	0,01
200	0,00	0,00	0,00	0,00
Indicador de Desempenho	Tempo Médio entre o Alerta e o Início da Inundação (h)			
2	40,5	40,5	59,0	74,8
5	33,7	34,3	162,2 (66,6)	100,1
10	34,0	32,0	37,0	90,5
20	16,0	16,0	14,0	38,0
25	10,0	10,0	10,0	72,0
40	12,0	15,0	15,0	42,0
50	15,0	15,0	15,0	99,0
100	6,0	6,0	6,0	24,0
200	156,0	156,0	156,0	30,0

Tabela 7.9: Valores dos parâmetros de ajuste operacional, resultados e indicadores de desempenho relativos ao sistema de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo de filtro de Kalman, com informatividade de 0,5

Ajuste Operacional do Sistema de Alerta Baseado em Previsões do Modelo de Filtro de Kalman				
Planície de Inundação (anos)	Estratégias de Emissão do Alerta			
	Determinística→ Determinística	Determinística→ Probabilística	Probabilística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Parâmetro	Tempo de Segurança (h)		Probabilidade Limite	
2	90	90	0,10	0,07
5	84	72	0,01 (0,03)	0,08
10	84	84	0,09	0,07
20	78	72	0,06	0,04
25	78	72	0,06	0,03
40	84	84	0,08	0,03
50	78	78	0,06	0,04
100	24	24	0,14	0,02
200	84	60	0,10	0,38
Resultado	Perdas Residenciais Totais por Planície (mil Reais/ano)			
2	187	176	187	174
5	1.608	1.548	1571 (1573)	1.493
10	1.830	1.785	1.830	1.694
20	597	592	597	549
25	206	202	206	169
40	170	164	170	144
50	117	112	117	89
100	171	172	171	119
200	38	35	38	35
Total	4.924	4.787	4.887 (4.889)	4.465
Resultado	Índice de Impacto Social por Planície (dias de renda familiar/ano)			
2	119,99	114,66	120,00	113,49
5	56,68	54,99	55,32 (55,38)	53,04
10	17,54	17,25	17,55	16,41
20	7,99	7,92	7,98	7,35
25	6,17	6,09	6,18	5,13
40	4,33	4,23	4,32	3,69
50	3,14	3,09	3,15	2,49
100	2,26	2,28	2,25	1,56
200	0,80	0,75	0,80	0,75
Total	13,69	13,38	13,53 (13,54)	12,58
Indicador de Desempenho	Número Anual Esperado de Falso Alerta			
2	0,37	0,37	0,54	0,97
5	0,20	0,19	4,08 (1,24)	0,39
10	0,05	0,05	0,09	0,13
20	0,02	0,01	0,06	0,13
25	0,00	0,00	0,01	0,06
40	0,01	0,01	0,01	0,03
50	0,00	0,00	0,00	0,00
100	0,00	0,00	0,00	0,01
200	0,00	0,00	0,00	0,00
Indicador de Desempenho	Tempo Médio entre o Alerta e o Início da Inundação (h)			
2	55,8	55,8	62,4	62,4
5	52,0	50,2	163,3 (122,9)	163,3
10	49,9	49,9	56,7	56,7
20	20,8	20,0	33,6	33,6
25	19,2	18,8	59,2	59,2
40	24,0	24,0	26,4	26,4
50	94,8	94,8	99,0	99,0
100	8,4	8,4	9,6	9,6
200	118,8	91,2	141,6	141,6

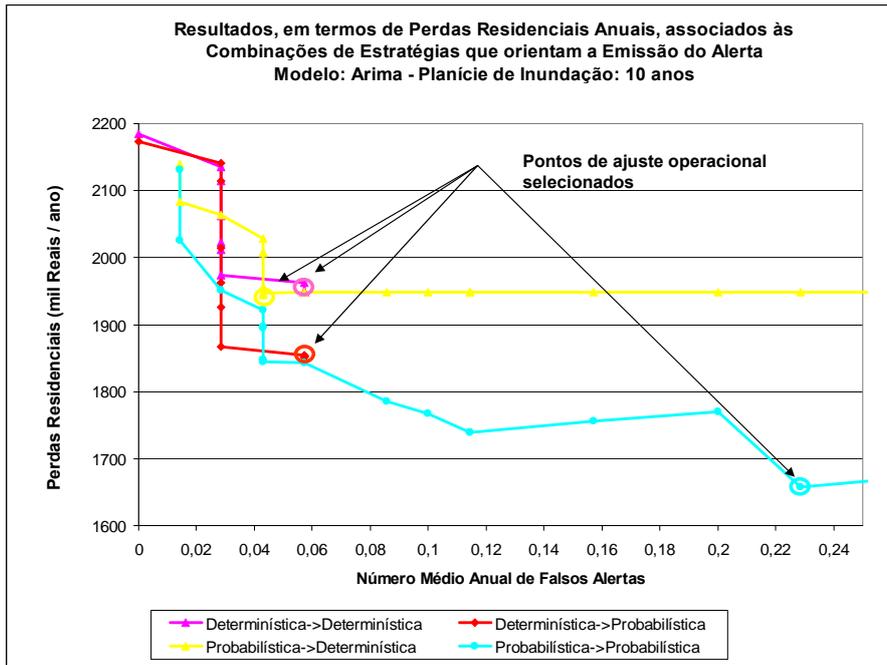


Figura 7.21: Relação entre as perdas residenciais anuais totais e o número médio de falso alerta, para o modelo de previsão Arima e a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a combinação de estratégias utilizada na emissão do alerta

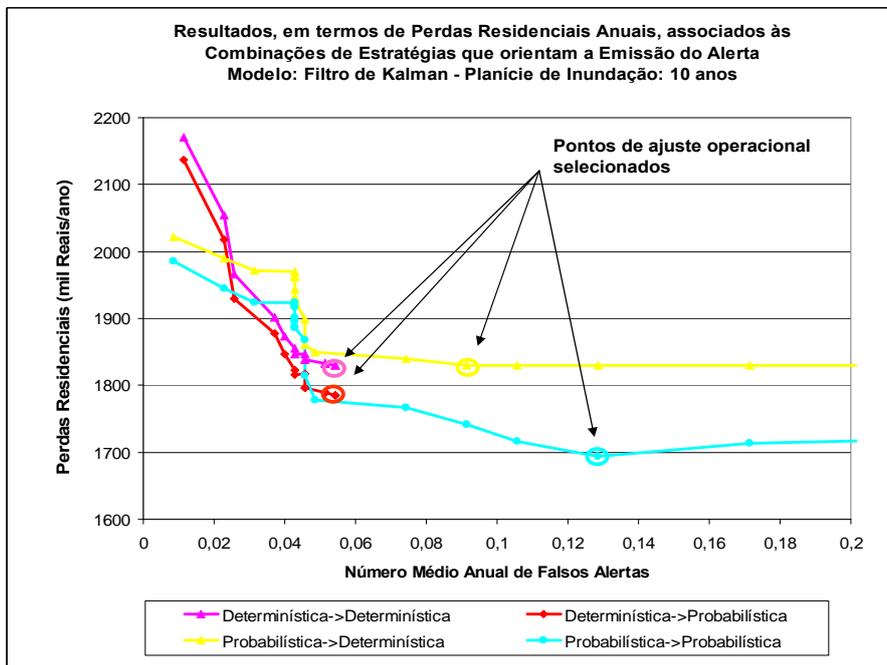


Figura 7.22: Relação entre as perdas residenciais anuais totais e o número médio de falso alerta, para o modelo de previsão de filtro de Kalman, com informatividade de 0,5, e a planície de 10 anos de tempo de recorrência, de acordo com a combinação de estratégias utilizada na emissão do alerta

Em relação aos parâmetros de ajuste operacional selecionados, para a estratégia determinística de emissão do alerta, é possível reconhecer uma tendência geral dos tempos de segurança serem decrescentes com a planície de inundação e similares em relação a ambas as estratégias de decisão sobre ações de proteção. Os tempos de segurança dos modelos Arima foram selecionados menores que os correspondentes do modelo de filtro de Kalman, o que proporciona menores números de falsos alertas. Em relação à estratégia probabilística de emissão do alerta, as probabilidades limites são razoavelmente independentes da planície de inundação, à exceção daquelas referentes à estratégia determinística de decisão sobre ações de proteção para o modelo Arima. Nesse caso, as probabilidades limites foram selecionadas nos maiores valores, o que proporciona os menores números de falsos alertas. As probabilidades limites referentes à estratégia probabilística de decisão sobre ações de proteção foram, em geral, selecionadas menores que aquelas referentes à estratégia determinística, indicando falta de capacidade da última em se beneficiar totalmente com os alertas probabilísticos.

É importante realçar que o ajuste operacional realizado, que minimiza os resultados, tanto em termos de perdas residenciais quanto do índice de impacto social em cada planície de inundação, pode conduzir a situações operacionais indesejadas ou insustentáveis em termos dos indicadores de desempenho e gerar efeitos comportamentais negativos na tomada de decisão sobre ações de proteção. Exemplo disso é o que ocorreu na planície de inundação de 5 anos, para a combinação de estratégias probabilística → determinística, que selecionou um ajuste operacional com número médio anual de falsos alertas maior que 4 para ambos os modelos. Esse valor de falso alerta, mais de 9 vezes o número médio observado de inundações na planície, foi considerado insustentável e procedeu-se à pesquisa do segundo menor valor de resultado, o que rendeu um ajuste operacional com falso alerta de 0,24 para o modelo Arima e de 1,24 para o de filtro de Kalman. Como as variáveis de resultado e os indicadores de desempenho do sistema de alerta estão comumente relacionados de forma inversa, e são admitidos pressupostos sobre o processo decisório da população atingida, tornam-se fundamentais as seguintes precauções: (1) tomar a seleção dos parâmetros de ajuste operacional como uma recomendação inicial de operação; (2) avaliar todas as consequências antes de sua implementação; e (3) acompanhar o seu desempenho e resultados futuros, para confirmar os pressupostos, sempre atento à necessidade ou oportunidade de novos ajustes operacionais.

7.6.4 Análise do valor da informação de alerta de inundação

De forma similar à avaliação dos impactos das inundações, a estimativa do valor da informação está condicionada à escolha do critério de mensuração do resultado e à seleção da combinação de estratégias que regula a emissão do alerta e a decisão sobre ações de proteção. A escolha do critério de mensuração deve ser condizente com os propósitos e valores que orientam a operação do sistema de alerta de inundações no município alvo. Neste estudo de valor, pode-se optar por medir o impacto das inundações e o valor da informação de alerta com base nas perdas residenciais anuais das edificações alagáveis, ou no índice de impacto social das inundações sobre a população atingível. Ambos os resultados são apresentados e discutidos. A seleção da estratégia de emissão do alerta, feita pela autoridade municipal ou responsável pela defesa civil, depende da disponibilidade das previsões probabilísticas e tomada de decisão pelo seu uso, a qual deve ser fruto de motivação e compreensão de seus benefícios. A seleção da estratégia de decisão sobre ações de proteção depende de pressupostos assumidos sobre o esquema predominante utilizado pela população para implementar medidas de proteção contra inundações em suas residências, o qual é influenciado pelos esforços empreendidos de motivação e capacitação para o uso das previsões probabilísticas. Conforme o caso, esquemas combinados e segmentados pela população podem ser avaliados. Neste estudo investigaram-se três estratégias de decisão sobre ações de proteção (probabilística, determinística e subjetiva), dos quais duas foram utilizadas no ajuste operacional. Os valores da informação de alerta derivados das combinações de estratégias investigadas, bem como as análises de sensibilidade desses valores em contextos de uso da estratégia subjetiva ou de informatividade da previsão de precipitação variável são apresentadas nos itens seguintes.

7.6.4.1 Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação a combinações de estratégias de decisão

A partir da formulação apresentada no item 7.5.6 e considerando a operação do sistema nos pontos de ajuste operacional selecionados no item 7.6.3, foram calculados os valores da informação para o sistema de alerta baseado nas previsões do modelo Arima e do modelo de filtro de Kalman, com informatividade da previsão de precipitação de 0,5. Esses valores são apresentados na Tabela 7.10 e Tabela 7.11. De acordo com a terminologia da metodologia proposta, os valores associados à previsão perfeita são considerados como valores perfeitos e aqueles associados à previsão derivada do modelo como valores imperfeitos. De forma similar, os valores associados

à combinação de estratégias probabilística → probabilística podem ser considerados valores normativos e os demais valores descritivos.

Tabela 7.10: Valores da informação de alerta de inundações baseado nas previsões do modelo Arima

Valores da Informação de Alerta de Inundações Baseado em Previsões do Modelo Arima				
Valores da Informação	Estratégias de Emissão do Alerta			
	Determinística→ Determinística	Determinística→ Probabilística	Probabilística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Critério	Valores Absolutos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais / ano)			
Previsão Perfeita	2.158	2.158	2.158	2.158
Previsão derivada do Modelo	702	980	716	1.577
Inclusão da Incerteza	0	278	13	875
Critério	Valores Relativos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (%)			
Previsão Perfeita	100,0	100,0	100,0	100,0
Previsão derivada do Modelo	32,5	45,4	33,2	73,1
Inclusão da Incerteza	0,0	12,9	0,6	40,5
Critério	Valores Absolutos Baseados no Índice de Impacto Social (dias de renda familiar/ano)			
Previsão Perfeita	6,17	6,17	6,17	6,17
Previsão derivada do Modelo	2,38	3,08	2,44	4,74
Inclusão da Incerteza	0,00	0,71	0,07	2,36
Critério	Valores Relativos Baseados no Índice de Impacto Social (%)			
Previsão Perfeita	100,0	100,0	100,0	100,0
Previsão derivada do Modelo	38,5	50,0	39,6	76,9
Inclusão da Incerteza	0,0	11,5	1,1	38,3

Tabela 7.11: Valores da informação de alerta de inundações baseado nas previsões hidrológicas do modelo de filtro de Kalman, com informatividade da previsão de precipitação de 0,5

Valores da Informação de Alerta de Inundações Baseado em Previsões do Modelo de Filtro de Kalman (Informatividade de 0,5)				
Valores da Informação	Estratégias de Emissão do Alerta			
	Determinística→ Determinística	Determinística→ Probabilística	Probabilística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Critério	Valores Absolutos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais / ano)			
Previsão Perfeita	2.158	2.158	2.158	2.158
Previsão derivada do Modelo	1.182	1.320	1.218	1.642
Inclusão da Incerteza	0	137	35	459
Critério	Valores Relativos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (%)			
Previsão Perfeita	100,0	100,0	100,0	100,0
Previsão derivada do Modelo	54,8	61,2	56,4	76,1
Inclusão da Incerteza	0,0	6,4	1,6	21,3
Critério	Valores Absolutos Baseados no Índice de Impacto Social (dias de renda familiar / ano)			
Previsão Perfeita	6,17	6,17	6,17	6,17
Previsão derivada do Modelo	3,80	4,11	3,94	4,90
Inclusão da Incerteza	0,00	0,31	0,15	1,10
Critério	Valores Relativos Baseados no Índice de Impacto Social (%)			
Previsão Perfeita	100,0	100,0	100,0	100,0
Previsão derivada do Modelo	61,6	66,6	63,9	79,5
Inclusão da Incerteza	0,0	5,0	2,4	17,9

Conforme se pode observar, os valores absolutos e relativos da informação são sensíveis ao critério e à combinação de estratégias selecionados. O valor absoluto da informação variou de R\$ 702 a 1.577 mil / ano para o modelo Arima e de R\$ 1.182 a 1.642 mil / ano para o modelo de filtro de Kalman, informatividade de 0,5. Esses valores expressam medidas de economia que o uso do sistema de alerta permite em termos de redução das perdas residenciais totais. A variação total do valor do alerta baseado no modelo Arima para diferentes combinações de estratégias foi de 125 %, muito maior que aquela do modelo de filtro de Kalman, de 39 %. Considerando-se

como critério o índice de impacto social, o valor absoluto da informação variou de 2,38 a 4,74 dias de renda familiar / ano para o modelo Arima e de 3,80 a 4,90 dias de renda familiar / ano para o modelo de filtro de Kalman. Esses valores expressam uma medida da redução na tragédia econômica representada pelas inundações para a população atingida, que deixaria de comprometer esse número de dias de sua renda familiar com o problema das enchentes. A variação total foi de aproximadamente 100 % para o modelo Arima e 29 % para o modelo de filtro de Kalman. Esses percentuais de variação expressam a importância da inclusão da incerteza, contemplada de forma parcial ou total, conforme a combinação de estratégias adotada. Os valores da informação são sempre maiores quando as estratégias incluem a incerteza das previsões, sendo a agregação de valor maior para o uso da estratégia probabilística na decisão sobre medidas de proteção.

Assim, por exemplo, a implementação de um processo de alerta de inundações, conforme descrito neste estudo, poderia partir de uma estratégia determinística → determinística, com um valor em redução de perdas residenciais de R\$ 702 mil / ano para o caso do modelo Arima. Ela poderia evoluir rapidamente para uma estratégia probabilística → determinística, com pequena agregação imediata de valor de R\$ 13 mil / ano, mas fundamental para a próxima etapa de evolução das estratégias, representada pela inclusão da incerteza na decisão sobre ações de proteção. Com a implementação da estratégia probabilística → probabilística, o valor do alerta totaliza R\$ 1.577 mil / ano, com uma agregação total de valor devido à inclusão da incerteza de R\$ 875 mil / ano. Essa agregação de valor atinge somente R\$ 459 mil / ano para o modelo de filtro de Kalman analisado. A agregação total de valor associada à inclusão da incerteza, considerando o critério do índice de impacto social, atinge 2,36 dias de renda familiar / ano (1,1 para o modelo de filtro de Kalman). Em ambos os casos, o valor da inclusão da incerteza foi significativamente maior para o modelo Arima do que para o modelo de filtro de Kalman. Esse fato deve estar relacionado tanto à estrutura de erros do primeiro modelo, quanto ao seu baixo valor inicial frente ao valor da previsão perfeita (32,5 % para o primeiro, 54,8 % para o segundo), o que cria maiores oportunidades de agregação de valor com a utilização das previsões probabilísticas. No final, os valores máximos da informação entre os modelos, vinculados à estratégia probabilística → probabilística, diferem menos que 5 % em relação a ambos os critérios, o que realça a importância de investimentos no uso adequado da informação, com destaque para o processamento das incertezas sempre presentes nas previsões.

O valor relativo da informação traduz uma medida do percentual de valor alcançado em relação ao máximo possível, derivado do uso da informação perfeita, e permite fácil comparação entre valores associados a diferentes critérios, estratégias e modelos de previsão. Uma visão geral dos valores relativos da informação de alerta

estimados neste estudo é dada pela Figura 7.23. A comparação entre critérios mostra o valor relativo das informações em relação ao índice de impacto social sempre superior àqueles em relação às perdas residenciais médias anuais. Isto está relacionado ao melhor funcionamento do sistema nos níveis relativos às primeiras planícies, que possuem peso maior na composição do índice de impacto social. A comparação entre estratégias confirma a supremacia da probabilística em relação à determinística, tanto na emissão do alerta, quanto na decisão sobre ações de proteção, destacando a relevância de combinar a inclusão das incertezas em ambos os processos decisórios (a agregação total de valor é maior que a soma das agregações parciais, quando somente um processo decisório é probabilístico). A comparação entre modelos mostra o valor do alerta baseado nas previsões do Arima sempre menor que o correspondente baseado nas previsões do filtro de Kalman, com informatividade de 0,5. A diferença torna-se muito pequena (menor que três pontos percentuais) com o uso da combinação de estratégias probabilística → probabilística, para ambos os critérios analisados.

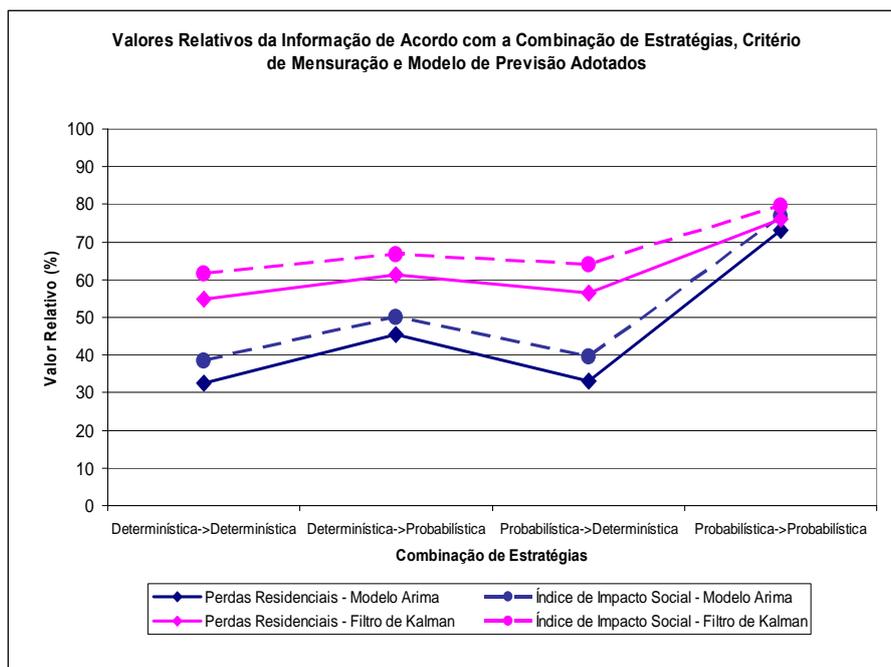


Figura 7.23: Valores relativos da informação de alerta de acordo com a combinação de estratégias, critério de mensuração e modelo de previsão adotados (Arima ou filtro de Kalman, com informatividade de 0,5)

7.6.4.2 Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação a variações na estratégia subjetiva de decisão

A análise dos valores da informação e da inclusão da incerteza é também condicionada pela admissão de uma estratégia subjetiva de decisão sobre ações de proteção, que neste estudo de valor foi considerada a partir de uma propensão a reduzir custos. Conforme apresentado no item 7.5.4.1, o tomador de decisão subjetivo sempre considera a opção de proteção completa ($\alpha=1$) quando há previsão determinística de inundação em sua planície, mas ele adia o início de implementação dessa estratégia de proteção até que um número mínimo de alertas seja emitido. Como as previsões são emitidas de 6 em 6 horas, esse número mínimo de alertas corresponde a um tempo de atraso para o início das ações de proteção, medido em horas, igual a 6 vezes esse número. Para este estudo de valor foi analisado a sensibilidade do valor da informação para a estratégia subjetiva de decisão sobre ações de proteção com tempos de atraso de 0, 6, 12, 18 e 24 horas, para alertas ajustados operacionalmente e emitidos pelas estratégias determinística e probabilística. Para essa análise foram realizadas 180 simulações do modelo Arima e 1.800 do modelo de filtro de Kalman, com informatividade de 0,5. Os resultados dessas simulações para ambos os modelos, considerados como valores descritivos da informação, são mostrados na Tabela 7.12. Uma visão comparativa dos valores relativos da informação de alerta, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, para cada um dos modelos hidrológicos, é apresentada na Figura 7.24 e Figura 7.25.

Tabela 7.12: Valores da informação de alerta de inundações contemplando a estratégia subjetiva de decisão, para os modelos de previsão analisados e diferentes tempos de atraso para o início da implementação das ações de proteção

Valores da Informação de Alerta de Inundações Incluindo a Estratégia Subjetiva de Decisão sobre Ações de Proteção												
Modelos de Previsão	Estratégias de Emissão do Alerta											
	Determinística → Determinística	Determinística → Subjetiva					Probabilística → Probabilística	Probabilística → Subjetiva				
		0	6	12	18	24		0	6	12	18	24
Tempos de Atraso (h)												
Critério	Valores Absolutos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais / ano)											
Arima	702	943	624	351	172	108	1.577	965	963	956	898	794
Filtro de Kalman	1.182	1.294	1.039	838	666	515	1.642	1.280	1.220	1.130	1.002	852
Critério	Valores Relativos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (%)											
Arima	32,5	43,7	28,9	16,2	7,9	5,0	73,1	44,7	44,6	44,3	41,6	36,8
Filtro de Kalman	54,8	60,0	48,1	38,8	30,9	23,9	76,1	59,3	56,5	52,4	46,4	39,5
Critério	Valores Absolutos Baseados no Índice de Impacto Social (dias de renda familiar/ano)											
Arima	2,38	2,95	1,91	1,08	0,58	0,40	4,74	3,05	3,05	3,02	2,83	2,48
Filtro de Kalman	3,80	4,03	3,30	2,68	2,12	1,66	4,90	4,05	3,86	3,60	3,19	2,74
Critério	Valores Relativos Baseados no Índice de Impacto Social (%)											
Arima	38,5	47,9	31,0	17,6	9,4	6,4	76,9	49,5	49,4	48,9	45,8	40,2
Filtro de Kalman	61,6	65,4	53,5	43,4	34,3	26,8	79,5	65,6	62,6	58,4	51,7	44,4

Conforme se pode observar na Tabela 7.12, existe uma redução no valor da informação para ambos os modelos, critérios e combinações de estratégias, quando

se aumenta o tempo de atraso para o início da implementação de ações de proteção. Essa redução no valor da informação comprova que a propensão a reduzir custos promove o aumento das perdas residenciais médias anuais e do índice de impacto social. Essa prática, relativamente comum na resposta da população a alarmes de eventos severos, deve ser desestimulada por meio de programas de conscientização e capacitação para uso das informações de alerta de inundações. Um aspecto relevante detectado foi a menor taxa de redução do valor da informação observada na estratégia probabilística de emissão do alerta em relação à estratégia determinística, quando do aumento do tempo de atraso. Essa taxa, para o modelo Arima, foi de aproximadamente R\$ 209 mil / ano a cada 6 horas de atraso, para a estratégia determinística (R\$ 195 mil / ano para o modelo de filtro de Kalman) e de R\$ 43 mil / ano a cada 6 horas de atraso, para a estratégia probabilística (R\$ 107 mil / ano para o modelo de filtro de Kalman). Tal fato também se observa em relação ao critério do índice de impacto social, qualificando a estratégia probabilística de emissão do alerta como mais resiliente à introdução de atrasos de início de implementação das ações de proteção em um regime de estratégia subjetiva de decisão, conforme apresentado. Se somente a inclusão da incerteza na emissão do alerta gera pequena agregação de valor, conforme observado na Tabela 7.10 e Tabela 7.11, ela promove um melhor ajuste com a estratégia subjetiva de decisão, sempre presente em alguma proporção na população, maximizando o valor final das informações de alerta. Isto ocorrerá se o ajuste operacional realizado e seus inevitáveis falsos alertas não se constituírem em motivadores extras de acréscimos nos tempos de atraso de início das ações de proteção.

A análise comparativa apresentada na Figura 7.24 e Figura 7.25 mostra, para ambos os modelos, que a estratégia subjetiva de decisão, quando executada sem atraso para o início das ações de proteção, apresenta maior valor da informação que a estratégia determinística de decisão sobre ações de proteção. Isto está relacionado ao fato de que, no modelo analisado, que apresenta baixos custos de resposta de proteção, uma atitude preventiva de sempre buscar implementar proteção máxima contra as inundações, gera menores perdas totais do que considerar o grau de resposta ótimo para os valores de face da previsão a cada momento de decisão. Entretanto, os valores da informação derivados da estratégia subjetiva, para ambos os modelos e independentes da forma de emissão do alerta, são sempre muito menores que aqueles associados à estratégia probabilística de decisão sobre ações de proteção.

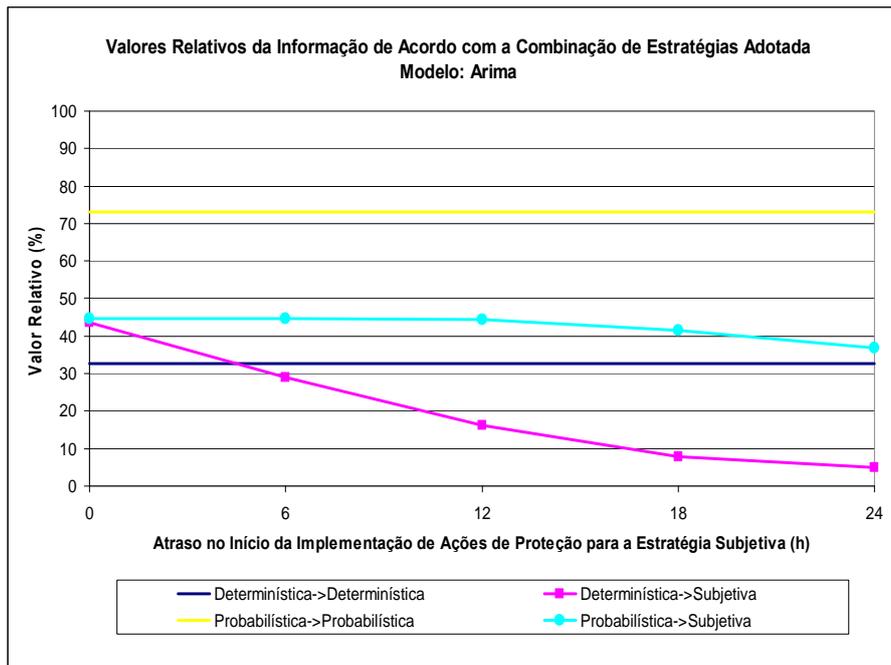


Figura 7.24: Valores relativos da informação, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, considerando o modelo Arima e a estratégia subjetiva, com diversos tempos de atraso para o início da implementação de ações de proteção

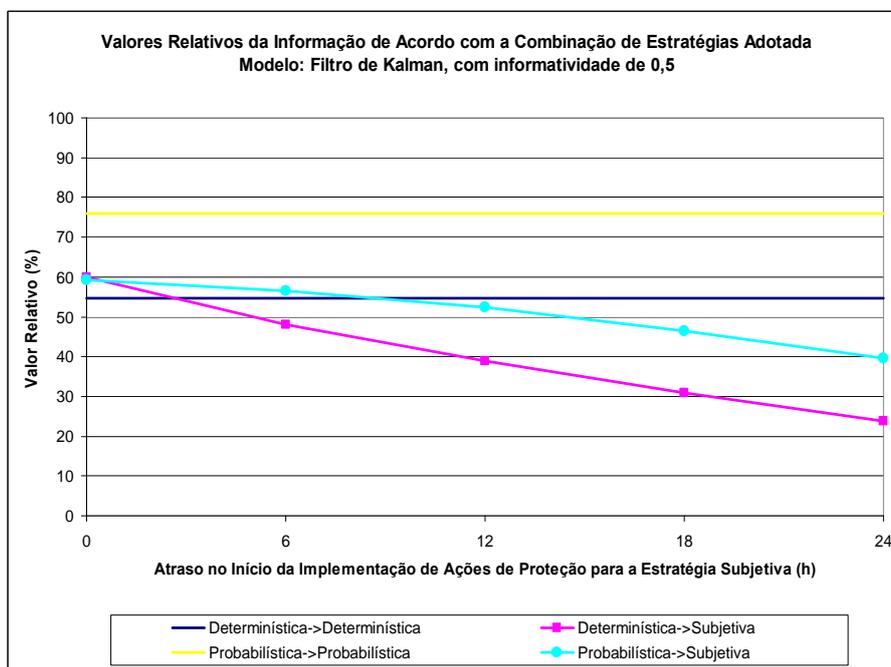


Figura 7.25: Valores relativos da informação, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, considerando o modelo de Filtro de Kalman, com informatividade de 0,5 e a estratégia subjetiva, com diversos tempos de atraso para o início da implementação de ações de proteção

7.6.4.3 Análise de sensibilidade do valor do alerta em relação à informatividade da previsão de precipitação

Uma última análise de sensibilidade do valor da informação foi realizada a partir da variação da informatividade da previsão de precipitação de 24 horas que alimenta o modelo hidrológico baseado em filtro de Kalman. Para essa análise foram realizadas 2.340 simulações, contemplando as 9 planícies de inundação, 2 combinações de estratégias, 10 seqüências aleatórias do modelo e 11 valores de informatividade ($\theta=0;0,1;0,2;\dots,1$), mais as simulações com a previsão de precipitação sempre nula ($p0$) e a previsão perfeita até 24 horas ($p1$). Os valores da informação foram calculados como a média dos valores obtidos a partir das 10 seqüências aleatórias simuladas. Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 7.13. Os parâmetros de ajuste operacional considerados foram aqueles relativos à informatividade de 0,5, conforme apresentados na Tabela 7.9, o que significa que é possível ainda alguma melhoria, em termos de desempenho e valor da informação, associada a ajustes operacionais realizados especificamente para cada valor de informatividade. Essa melhoria foi verificada para o caso da simulação $p1$, no qual um ajuste operacional específico rendeu acréscimos nos valores da informação inferiores a 7 % em relação ao ajuste operacional anterior considerado.

Conforme se pode verificar na Tabela 7.13, para ambas as combinações de estratégias, existem casos de pequena redução do valor da informação, inferiores a 2 %, quando se aumenta a informatividade da previsão de precipitação em passos de 0,1. Isto pode ser devido ao comportamento dos erros médios das previsões do tempo de ocorrência da vazão máxima em 96 horas, que inicialmente cresce e depois decresce com o aumento da informatividade, conforme discutido no item 7.6.1, ou derivado de flutuações nos resultados das simulações, decorrentes do número de seqüências aleatórias consideradas. A pequena redução de valor apresentada não contradiz o conceito de informatividade aplicado à previsão de precipitação, porque sua utilidade econômica não foi derivada diretamente de seu uso, mas por meio de um modelo hidrológico, cuja formulação e implementação podem privilegiar situações de menor informatividade.

Tabela 7.13: Valores da informação do alerta de inundações para distintas combinações de estratégias, contemplando simulações do modelo Arima e do modelo de filtro de Kalman com diferentes informatividades da previsão de precipitação, identificados por $\theta_0, \theta_0,1, \theta_0,2,\dots, \theta_1$, bem como com a previsão de precipitação sempre nula ($p0$) e a previsão perfeita até 24 horas ($p1$)

Valores da Informação de Alerta de Inundações para Simulações com Diferentes Informatividades da Previsão de Precipitação									
Modelos de Previsão	Simulação	Estratégias de Emissão do Alerta				Estratégias de Emissão do Alerta			
		Determinística → Determinística		Probabilística → Probabilística		Determinística → Determinística		Probabilística → Probabilística	
		Valor Absoluto	Valor Relativo	Valor Absoluto	Valor Relativo	Valor Absoluto	Valor Relativo	Valor Absoluto	Valor Relativo
Critério		Perdas Residenciais Anuais Totais				Índice de Impacto Social Total			
Unidade		mil Reais/ano	%	mil Reais/ano	%	dias de renda familiar/ano	%	dias de renda familiar/ano	%
Arima		702	32,5	1.577	73,1	2,38	38,5	4,74	76,9
Filtro de Kalman	p0	1.035	48,0	1.694	78,5	3,33	54,0	4,99	80,9
	θ_0	1.146	53,1	1.642	76,1	3,64	59,0	4,89	79,3
	$\theta_0,1$	1.147	53,1	1.637	75,8	3,66	59,3	4,87	79,0
	$\theta_0,2$	1.150	53,3	1.645	76,2	3,66	59,4	4,89	79,2
	$\theta_0,3$	1.143	53,0	1.627	75,4	3,65	59,2	4,84	78,4
	$\theta_0,4$	1.159	53,7	1.633	75,7	3,70	60,1	4,85	78,7
	$\theta_0,5$	1.182	54,8	1.642	76,1	3,80	61,6	4,90	79,5
	$\theta_0,6$	1.203	55,7	1.683	78,0	3,81	61,8	4,98	80,8
	$\theta_0,7$	1.225	56,8	1.715	79,4	3,87	62,7	5,05	81,9
	$\theta_0,8$	1.281	59,4	1.781	82,5	4,03	65,3	5,20	84,3
	$\theta_0,9$	1.340	62,1	1.785	82,7	4,20	68,1	5,20	84,4
	θ_1	1.413	65,5	1.819	84,3	4,41	71,5	5,28	85,6
		p1	1.426	66,1	1.815	84,1	4,44	72,0	5,26

Conforme é possível observar na Tabela 7.13, para ambos os critérios, os valores da informação associados à combinação de estratégias probabilística → probabilística (VI_{PP}) são sempre superiores àqueles associados à combinação determinística → determinística (VI_{DD}), independente da simulação considerada ($\theta_0, \theta_0,1, \theta_0,2,\dots, \theta_1; p1$ e $p0$). Também o valor da informação VI_{PP} do modelo Arima é superior aos valores VI_{DD} de todas as simulações do modelo de filtro de Kalman. Isto significa que, considerados os pressupostos e condições de simulação presentes neste estudo, é preferível empreender mudanças nas estratégias de uso da informação do que investir em melhoria da informatividade das previsões de precipitação que alimentam os modelos de filtro de Kalman, ou mesmo do que adotar a previsão baseada nesse tipo de modelo, o qual possui maiores requerimentos operacionais (por exemplo, os dados monitorados de precipitação nas sub-bacias a montante e as previsões de precipitação no horizonte de até 24 horas). Essa superioridade da configuração probabilística manteve-se mesmo quando foi realizado o ajuste operacional específico para a simulação $p1$, no qual o valor da informação VI_{DD} evoluiu para R\$ 1.519 mil / ano (4,66 dias de renda familiar / ano), mantendo-se inferior ao valor VI_{PP} do modelo Arima.

A diferença entre os valores da informação da simulação $p0$ do modelo de filtro de Kalman e do modelo Arima traduz uma idéia do ganho obtido com a introdução do novo modelo hidrológico. A diferença entre os valores da informação das simulações $p1$ e $p0$ traduz uma idéia do ganho potencial máximo com a introdução no modelo da previsão de precipitação de 24 horas, atualizada e fornecida em intervalos de 6 horas.

A soma dessas diferenças representa o ganho potencial máximo total com esse processo de modernização das previsões hidrológicas. Essas diferenças são condicionadas pela combinação de estratégias adotada. Assim, para a combinação de estratégias determinística → determinística, a diferença $VI_{DD}(p0) - VI_{DD}(Arima)$ é de R\$ 333 mil / ano e a diferença $VI_{DD}(p1) - VI_{DD}(p0)$ é de R\$ 391 mil / ano, o que totaliza R\$ 724 mil / ano. Para a combinação de estratégias probabilística → probabilística, a diferença $VI_{PP}(p0) - VI_{PP}(Arima)$ é de R\$ 117 mil reais / ano e a diferença $VI_{PP}(p1) - VI_{PP}(p0)$ é de R\$ 121 mil / ano, o que totaliza R\$ 238 mil / ano. Os ganhos com a combinação de estratégias determinísticas são significativamente maiores, mas serão aplicados sobre uma base muito menor, correspondente ao valor $VI_{DD}(Arima)$ de R\$ 702 mil / ano, enquanto o valor $VI_{PP}(Arima)$ já atinge R\$ 1.577 mil / ano. O resultado final em termos de redução de perdas e valor da informação permanece favorável à combinação de estratégias probabilística → probabilística. Todos esses valores de ganhos podem ser comparados com os custos esperados dos processos de modernização da previsão, servindo de base para decisões de investimento.

A Tabela 7.13 também mostra uma pequena diferença entre os valores da informação resultantes das simulações do modelo de filtro de Kalman com informatividade 1 ($\theta 1$) e com a previsão perfeita até 24 horas ($p1$). Essa diferença foi menor que 1 % para ambas as combinações de estratégias e critérios de mensuração, o que demonstra a adequação do uso das previsões de precipitação por categorias para alimentar os modelos de filtro de Kalman, de acordo com a definição de classes e esquema de atualização discutidos no item 7.5.2.3. Essa abordagem de previsão de precipitação, realizada por categoria, pode combinar o uso de modelos numéricos com a intervenção subjetiva de meteorologistas previsores, constituindo um processo do qual se espera um melhor resultado em termos de qualidade da previsão gerada.

Uma visão comparativa entre os valores relativos da informação, em termos das perdas residenciais médias anuais, para as simulações realizadas, é dada pela Figura 7.26. Conforme se podem verificar, para ambas as combinações de estratégias, os ganhos de valor da informação começam reduzidos, podem até ser negativos e só se tornam mais significativos nos últimos acréscimos de informatividade, quando o seu valor é superior a 0,6. Dentro do contexto analisado, os formatos das curvas de valor versus informatividade são do tipo convexo, fato que se traduz em limitações para se obter prontamente agregação de valor a partir da melhoria da previsão de precipitação, a qual depende do grau inicial de informatividade. Para a combinação de estratégias determinística → determinística, o valor da informação de alerta baseado em previsões do modelo de filtro de Kalman para diferentes informatividades é sempre

superior ao valor derivado da simulação $p0$. Isto significa que, para essa configuração de estratégias, o modelo de filtro de Kalman é sempre favorecido com a introdução da previsão de precipitação, independentemente da sua informatividade. Para a combinação de estratégias probabilística → probabilística, isto não se sustenta, sendo o processo de emissão dos alertas exigente em termos da informatividade da previsão de precipitação. Nesse caso, a informatividade deve ser de pelo menos 0,7 para se agregar valor à informação do alerta, em relação ao modelo de filtro de Kalman sem o uso de previsão de precipitação (simulação $p0$).

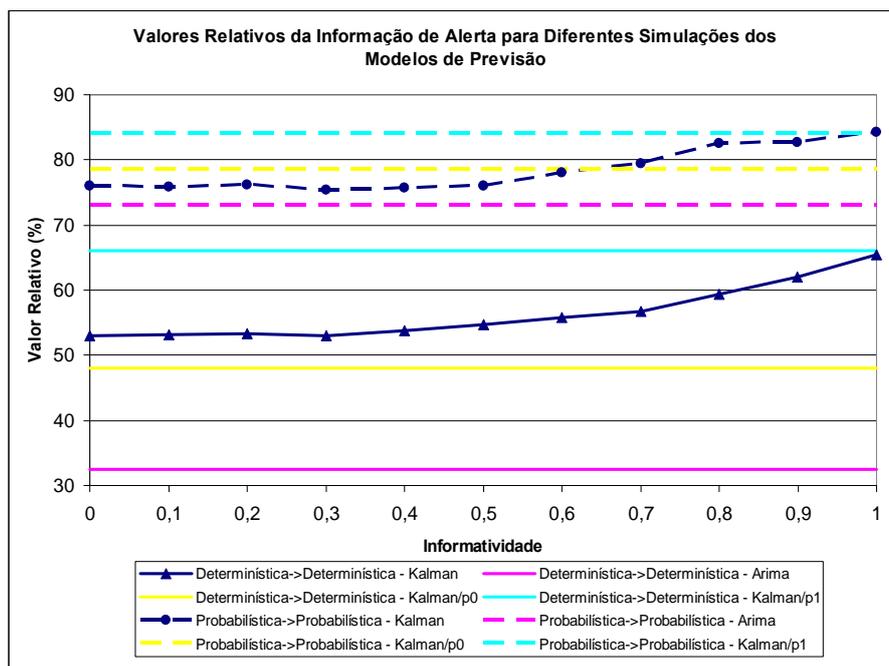


Figura 7.26: Valores relativos da informação de alerta de inundações, calculados com base no critério das perdas residenciais médias anuais, para distintas combinações de estratégias, contemplando simulações do modelo Arima e do modelo de filtro de Kalman, com diferentes informatividades da previsão de precipitação, bem como com a previsão de precipitação sempre nula ($p0$) e a previsão perfeita até 24 horas ($p1$)

Conforme observada nessa análise de sensibilidade, a incorporação de previsão de precipitação em modelos de filtro de Kalman oferece oportunidades de agregação de valor à informação de alerta, as quais são fortemente condicionadas pelo grau de informatividade apresentado pela previsão e pela combinação adotada de estratégias de emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção. Dentro do esquema proposto, essa agregação de valor pode chegar próxima a R\$ 391 mil / ano na configuração determinística de estratégias, mas sua utilização deve respeitar o limite mínimo de informatividade para agregação de valor, se a configuração probabilística de estratégias é adotada.

7.6.5 Análise das relações entre qualidade e valor do alerta de inundação

A natureza multidimensional do conceito de qualidade e a característica de dependência do valor da informação à especificidade de seu uso tornam a relação entre qualidade e valor muitas vezes complexa, sendo difícil a derivação de regras gerais de relacionamento entre as mesmas. Conforme apresentado no item 7.5.2.1, os aspectos de qualidade são múltiplos e as medidas comumente utilizadas são focais, mensurando o comportamento geral da informação em relação a um desses aspectos. Dessa forma, essas medidas são incapazes de traduzir a combinação específica dos aspectos de qualidade impactantes do valor derivado de um uso determinado das informações sob análise.

Neste estudo do valor da informação de alerta, foram executadas 14 simulações de previsão de vazão para União da Vitória, uma com o modelo Arima e 13 com o modelo de filtro de Kalman, correspondentes aos múltiplos valores de informatividade, situação de previsão de precipitação sempre nula e de previsão perfeita até 24 horas. Dos resultados dessas simulações, foram selecionadas duas variáveis hidrológicas principais, a vazão máxima em 96 horas e o seu tempo de ocorrência, para as quais foi calculado um conjunto de nove medidas de qualidade, que abrangem os aspectos de acurácia, associação linear e erro sistemático, conforme apresentado na Tabela 7.6. Também, baseado nos resultados dessas simulações, foram calculados os valores da informação de alerta, utilizando-se de dois critérios (perdas residenciais médias anuais e índice de impacto social), para duas combinações de estratégias de emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção (determinística → determinística e probabilística → probabilística), conforme apresentados na Tabela 7.13. Cabe destacar que as simulações realizadas não exaurem as múltiplas possibilidades de produção de previsões e uso dessas informações, mesmo considerando os pressupostos e a delimitação em termos de modelos hidrológicos e combinações de estratégias investigadas. Por exemplo, tem-se a possibilidade de alimentação do modelo de filtro de Kalman com previsões de precipitação não calibradas ou equilibradas entre as classes, e conseqüentemente não representadas pela variação da informatividade. Não obstante a essa limitação, o conjunto realizado de simulações abrange um extenso domínio de possibilidades de produção e uso das previsões representado pelos modelos e estratégias investigadas, o que justifica a análise das relações entre qualidade e valor do alerta.

A análise cruzada entre as medidas de qualidade e valor da informação revelou situações nas quais acréscimos de qualidade na previsão da vazão máxima estiveram majoritariamente associados a acréscimos de valor da informação do alerta. Tal fato não foi observado nas relações entre medidas de qualidade do tempo de ocorrência da vazão máxima e valores da informação, que apresentaram situações de correlação positiva e negativa. Exemplos dessas relações entre medidas de qualidade e valor da informação podem ser observados na Figura 7.27 e Figura 7.28.

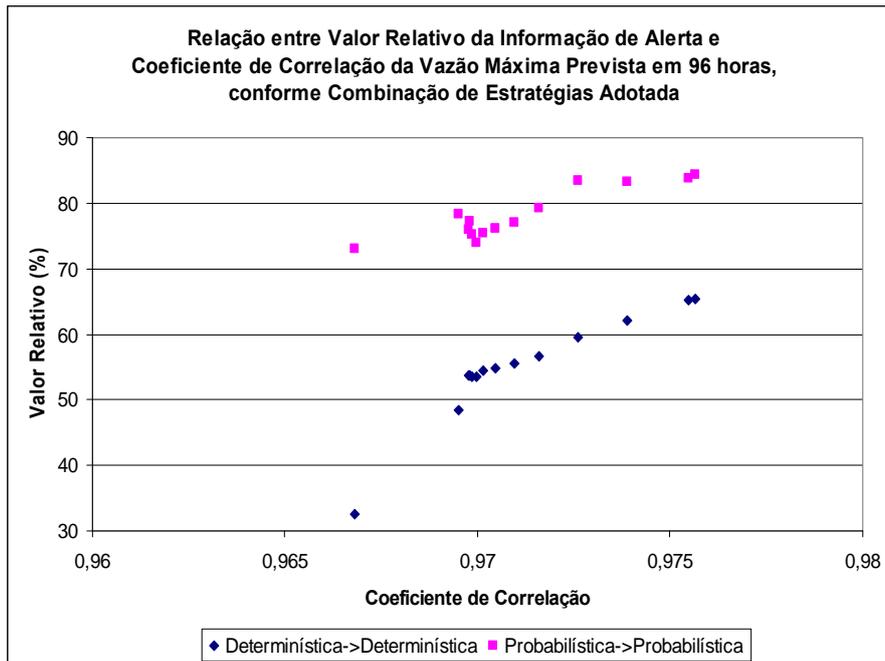


Figura 7.27: Relação entre o valor relativo da informação de alerta, calculado com base no critério de perdas residenciais médias anuais, e o coeficiente de correlação da vazão máxima prevista em 96 horas, conforme a combinação de estratégias adotada

A análise da correlação entre as medidas de qualidade e o valor da informação para as simulações de previsão de vazão realizadas revelou que o coeficiente de correlação da vazão máxima prevista guarda a maior correlação com o valor da informação VI_{PP} , apresentando coeficiente de 0,914. Esse resultado está em sintonia com as pesquisas de KRZYSZTOFOWICZ (1992), que discute as condições de suficiência estatística que qualificam o módulo do coeficiente de correlação como medida utilitária da qualidade da previsão, ou seja, aquela capaz de ordenar sistemas de previsão de acordo com o valor derivado de seu uso. Para o caso do valor da informação VI_{DD} , que utiliza os valores de face da previsão para a tomada de decisão, o erro médio absoluto da vazão máxima prevista apresentou a maior correlação,

revelando um coeficiente de $-0,967$. Nesse segundo caso, o coeficiente de correlação da vazão máxima também manteve uma alta correlação com o valor da informação, apresentando coeficiente de $0,907$. A construção de modelos regressivos de altos coeficientes de determinação (maiores que $0,99$), que combinam medidas de qualidade da vazão máxima e do seu tempo de ocorrência para determinar o valor da informação é possível, mas esses modelos não serão apresentados porque a validade dos mesmos, em situações diversas das investigadas neste estudo, não deve se sustentar.

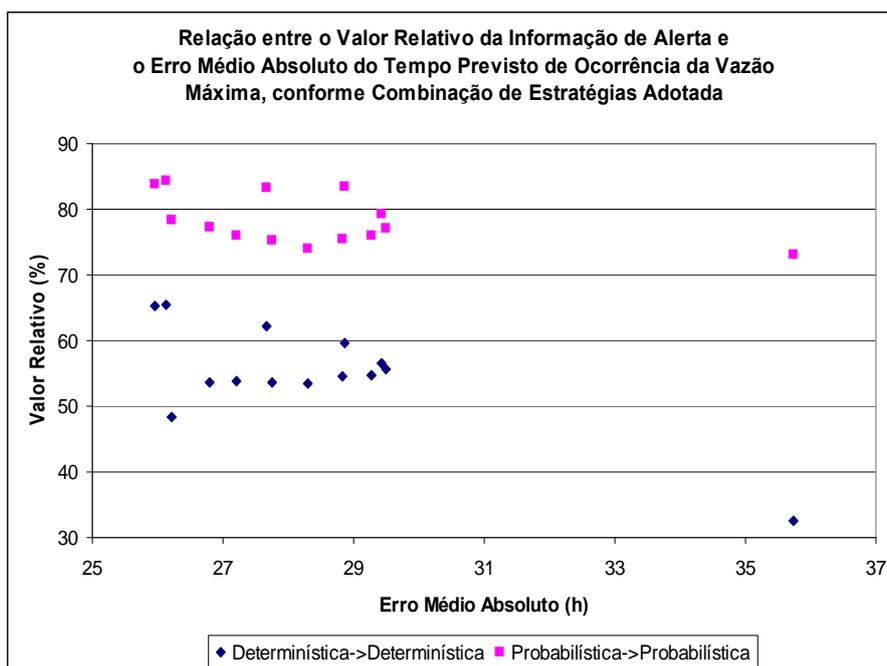


Figura 7.28: Relação entre o valor relativo da informação de alerta, calculado com base no critério de perdas residenciais médias anuais, e o erro médio absoluto do tempo previsto de ocorrência da vazão máxima, conforme a combinação de estratégias adotada

A análise do formato dominante das relações entre valor da informação e o coeficiente de correlação da vazão máxima, realizada a partir da análise da derivada da função quadrática ajustada, revela uma característica convexa para o valor VI_{PP} e uma característica côncava para o valor VI_{DD} . O primeiro resultado está de acordo com as pesquisas de KATZ e MURPHY (1997b), que encontrou relações entre o valor da informação e a qualidade das previsões dominadas por funções convexas, em um contexto bayesiano de decisão. O processo de construção de valor, visto como um todo, conforme investigado neste estudo, admite as seguintes etapas: (1) começa privilegiando os ganhos iniciais de qualidade em uma configuração determinística de

estratégias de decisão; (2) satura-se em um patamar intermediário nessa configuração de estratégias; (3) requer, para novos incrementos de valor, salto qualitativo para uma configuração probabilística de estratégias, onde se otimiza a agregação de valor da qualidade já conquistada; e (4) nova aceleração de crescimento exige alto patamar de qualidade das previsões. A compreensão desse processo pode subsidiar a elaboração de planos de investimentos que maximizem a geração de benefícios e a agregação de valor, combinando projetos de modernização da geração e do uso das informações hidrometeorológicas.

A análise das potenciais alternativas de melhoria no processo de previsão hidrológica remete a investigação para a relação entre a estrutura de erros da previsão e a defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita. Conforme discutido no item 7.5.6, neste estudo foi investigada a sensibilidade do valor da informação em relação à melhoria da previsão hidrológica, em termos do horizonte de tempo de referência. Essa análise foi realizada a partir de simulações de novas seqüências de previsões, progressivamente melhoradas a partir do curto prazo, tendo como base as previsões originais do modelo Arima. Nas simulações dessas seqüências de previsões considerou-se as combinações de estratégias determinística → determinística e probabilística → probabilística e o número máximo de previsões perfeitas de 8, correspondente às primeiras 48 horas. O ajuste operacional foi realizado independente para cada seqüência, conforme discutido nos itens 7.5.5 e 7.6.3, o que demandou um grande número de simulações. Os resultados dessas simulações, em termos de qualidade da previsão e valor da informação são mostrados, respectivamente, na Tabela 7.14 e Tabela 7.15.

Conforme se pode observar na Tabela 7.14, a melhoria progressiva das previsões a partir do curto prazo causou incremento gradual na acurácia da previsão da vazão máxima em 96 horas e do tempo de sua ocorrência. Com previsões perfeitas de 6 a 48 horas ($n_{pp}=8$), a redução total do erro médio quadrático foi de 55 % para a previsão da vazão máxima e de 21 % para a previsão do tempo de sua ocorrência. Esse incremento gradual observado na qualidade da previsão não se verifica no comportamento do valor da informação, que, segundo se pode observar na Tabela 7.15, apresenta os maiores acréscimos nas simulações de seqüências de números intermediários de previsões perfeitas, o que indica a existência de uma região crítica para a agregação de valor. Os impactos progressivos dessas melhorias a partir do curto prazo na defasagem do valor da informação podem ser visualizados na Figura 7.29.

Tabela 7.14: Qualidade das previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme o número de previsões perfeitas considerado

Qualidade das Previsões Melhoradas do Modelo Arima		
Aspectos Analisados	Número de Previsões Perfeitas	Valores
EMQ da Vazão Máxima em 96 horas ($m^3 \cdot s^{-1}$) ²	0	14.756
	1	14.502
	2	14.082
	3	13.256
	4	12.032
	5	10.640
	6	9.238
	7	7.882
	8	6.582
EMQ do Tempo de Ocorrência da Vazão Máxima (h ²)	0	2.618
	1	2.605
	2	2.558
	3	2.515
	4	2.453
	5	2.369
	6	2.273
	7	2.172
	8	2.068

Tabela 7.15: Valor das previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme a combinação de estratégias adotada e o número de previsões perfeitas considerado

Valor das Previsões Melhoradas do Modelo Arima			
Aspectos Analisados	Número de Previsões Perfeitas	Combinação de Estratégias	
		Determinística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Valor Relativo da Informação, baseado no critério das Perdas Residenciais Anuais Totais (%)	0	33	73
	1	34	77
	2	35	79
	3	45	88
	4	65	95
	5	88	95
	6	97	95
	7	98	96
	8	98	97
Valor da Defasagem, baseado no critério das Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais / ano)	0	1.456	581
	1	1.433	502
	2	1.411	464
	3	1.180	248
	4	749	115
	5	262	113
	6	72	97
	7	44	82
	8	33	73

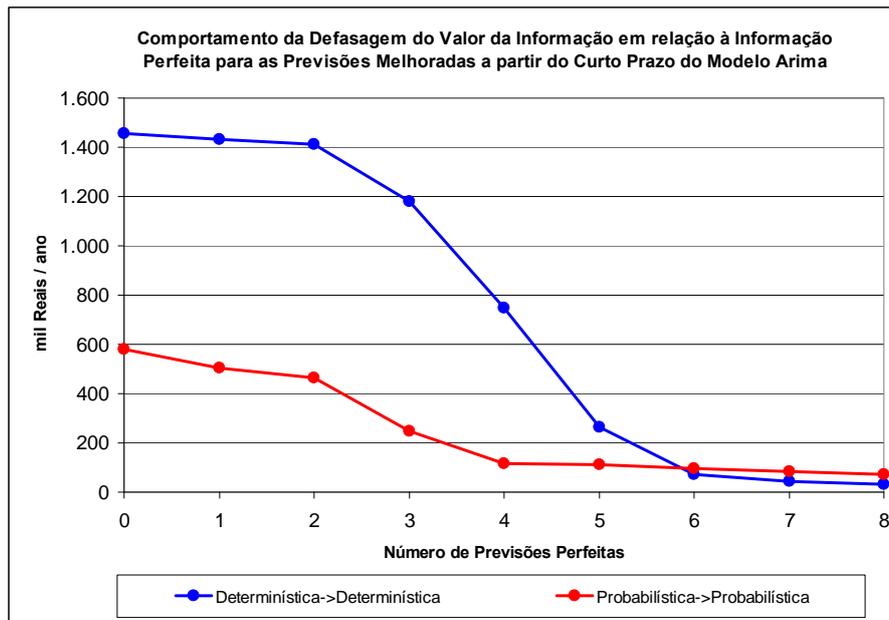


Figura 7.29: Comportamento da defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita, em termos das perdas residenciais médias anuais, para as previsões melhoradas a partir do curto prazo do modelo Arima, conforme a combinação de estratégias adotada e o número de previsões perfeitas considerado

Conforme se pode verificar na Figura 7.29, os valores da defasagem para as previsões melhoradas a partir do curto prazo são significativamente menores para a configuração probabilística de estratégias do que para a determinística, à exceção das situações nas quais a previsão é perfeita até o horizonte de 36 horas ou mais. Nessa região de quase saturação na agregação de valor, na qual o valor relativo da informação é maior ou igual a 95 % e a defasagem próxima ou inferior a R\$ 100 mil / ano, percebe-se uma pequena diferença desfavorável para a combinação de estratégias probabilística → probabilística. Isto se deve ao método implementado de tratamento das incertezas, que utiliza discretizações e interpolações, e não à abordagem probabilística bayesiana em si, que conceitualmente sempre provê valor da informação não inferior às demais abordagens. A redução da defasagem do valor da informação para a previsão perfeita até 48 horas ($npp=8$) foi quase completa (de 98 % para a configuração determinística e de 87 % para a probabilística), contemplando variação relativa muito superior àquela verificada nas medidas de qualidade analisadas.

A análise da Figura 7.29 mostra que a melhoria da previsão até o horizonte de 12 horas agregou pouco valor ao alerta emitido com base no modelo Arima original, na qual os investimentos necessários estão associados a benefícios potenciais máximos

de R\$ 45 mil / ano, para a configuração determinística, e de R\$ 117 mil / ano, para o outro caso. A melhoria da previsão até o horizonte de 24 horas para a configuração probabilística e até 36 horas para a determinística reduz significativamente a defasagem, sendo capaz de levar o valor da informação para a região de saturação, onde progressivas melhorias no horizonte de previsão agregam muito pouco valor. Os benefícios potenciais associados a investimentos nessas melhorias são da ordem de R\$ 1,38 milhão / ano para a configuração determinística e de R\$ 466 mil / ano para a probabilística. O primeiro intervalo de horizonte de previsão, de 6 a 12 horas, não representa oportunidade de agregação de valor, pois o mesmo já possui previsão de boa acurácia produzida pelo modelo Arima (erro médio absoluto menor que $13 \text{ m}^3/\text{s}$ para 12 horas). O segundo intervalo de horizonte de previsão, de 18 a 36 horas, configura-se em uma região crítica de agregação de valor, cuja melhoria de previsão está associada a benefícios significativos em ambas as combinações de estratégias e cujo investimento deve ser priorizado para modernizar o alerta de inundação em União da Vitória. Melhorias em horizontes de tempo superiores a 36 horas estão associadas a agregações marginais de valor, se horizontes menores já foram contemplados.

Considerando-se todos os resultados simulados, fica clara a insuficiência da análise da qualidade como determinante das opções de investimentos em melhoria das previsões. Os esforços na adoção da estratégia probabilística na emissão do alerta e na decisão de ações de proteção potencializam as melhorias da previsão hidrológica, encurtando o horizonte de tempo necessário para a máxima agregação de valor. Mantido o atual esquema de previsões até 96 horas, os investimentos em melhores previsões no curto prazo, até o horizonte de 36 horas, são críticos na agregação de valor e estão associados a benefícios potenciais que podem superar o R\$ 1 milhão / ano, se considerar-se o seu uso direto pelo valor de face no problema de inundações em União da Vitória.

7.7 Conclusões do estudo

De acordo com os objetivos propostos, este estudo estimou o valor da informação de alerta de inundação, considerando diferentes configurações de modelos e previsões hidrológicas, critérios de mensuração de impactos e estratégias de decisão, para o caso da proteção de bens móveis em edificações residenciais de União da Vitória. Também foi realizada análise de sensibilidade do valor da informação quanto a perturbações tanto na previsão hidrológica quanto na estratégia de proteção,

sendo investigados os condicionantes de construção do valor e as oportunidades vinculadas de melhoria nos processos de geração das previsões, emissão dos alertas e uso das informações hidrometeorológicas associadas.

O ambiente de análise implementado neste estudo de valor foi baseado na abordagem Dinâmica de Sistemas, sendo constituído de nove módulos de tratamento de dados e simulação, organizados em um diagrama de bloco, conforme apresentado na Figura 7.14. O método de avaliação dos impactos das inundações considerado foi baseado na identificação de funções unitárias de nível versus perdas, condicionadas pela classe de renda familiar. O modelo decisório de proteção considerou a proposta de KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a), que admite graus de resposta variáveis e utiliza funções unitárias de custos, redução de perdas e restrição temporal à implementação de ações de proteção contra inundações. Foram admitidas combinações de estratégias determinísticas e probabilísticas para a emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção, contemplando a oportunidade de avaliar os impactos da inclusão das incertezas das previsões nos processos decisórios pertinentes. Em especial, foi proposta e avaliada uma estratégia de emissão do alerta baseada na probabilidade conjunta da excedência do nível e do tempo de alagamento, ambos tratados como variáveis aleatórias. O desenvolvimento e utilização de dois critérios de mensuração dos impactos das inundações (as perdas residenciais médias anuais e o índice de impacto social) permitiram a estimativa do valor do alerta em termos de redução das perdas financeiras ou da mitigação da tragédia econômica imposta pelas inundações, viabilizadas com o uso da informação pela população potencialmente atingível.

Os resultados da simulação combinada do comportamento hidrológico, previsões, processos decisórios de uso dessas informações e impactos resultantes revelaram a existência de perdas residenciais potenciais de R\$ 6,107 milhões / ano devido a inundações em União da Vitória, o que corresponde a 17,48 dias de renda familiar / ano da população potencialmente atingível. O resumo dos valores da informação de alerta derivado das previsões perfeitas (valores perfeitos) e dos modelos analisados (valores imperfeitos) para as combinações de estratégias determinísticas (valores descritivos) e probabilísticas (valores normativos) é mostrado na Tabela 7.16. A faixa de valores apresentada para o modelo de filtro de Kalman é derivada da variação da informatividade da previsão de precipitação considerada na simulação desse modelo.

Tabela 7.16: Resumo dos valores da informação de alerta derivado das previsões perfeita e dos modelos Arima e filtro de Kalman, conforme a combinação de estratégias adotada para emissão do alerta e decisão sobre ações de proteção

Resumo dos Valores da Informação de Alerta para União da Vitória		
Valores da Informação	Combinação de Estratégias	
	Determinística→ Determinística	Probabilística→ Probabilística
Valores Absolutos Baseados nas Perdas Residenciais Anuais Totais (mil Reais / ano)		
Previsão Perfeita	2.158	
Previsão derivada do Modelo Arima	702	1.577
Previsão derivada do Modelo de Filtro de Kalman	1.143 - 1.413	1.627 - 1.819
Valores Absolutos Baseados no Índice de Impacto Social (dias de renda familiar / ano)		
Previsão Perfeita	6,17	
Previsão derivada do Modelo Arima	2,38	4,74
Previsão derivada do Modelo de Filtro de Kalman	3,64 - 4,41	4,84 - 5,28

A diferença entre os impactos potenciais e os valores da informação perfeita representa a parcela de impacto não factível de redução com o uso do alerta hidrológico. A diferença a maior da configuração probabilística de estratégias em relação à determinística, para determinado modelo de previsão, representa o ganho associado à otimização do uso, via inclusão da incerteza nos processos decisórios. Essa diferença é indicativa do benefício associado à modernização do uso da informação de alerta de inundações em União da Vitória. As diferenças dos valores da informação entre os modelos analisados ou entre os valores limites da faixa referente ao modelo de filtro de Kalman representam o ganho associado à inovação do processo de previsão hidrometeorológica, via melhoria do próprio modelo ou das informações que o alimentam. Essas diferenças são exemplos de benefício que a modernização do processo de previsão pode agregar. Conforme se pode observar na Tabela 7.16, para o contexto e casos analisados, os valores dos benefícios associados à modernização de uso são significativamente superiores àqueles associados à modernização da previsão. Essa constatação deve ser motivadora do estabelecimento de um balanço de investimentos nos programas de modernização conforme os benefícios associados, contemplando, além da melhoria das previsões, processamento e disseminação das incertezas na forma de previsões probabilísticas e capacitação de uso para essas previsões.

A atitude comportamental do morador sob risco de inundação de postergar o início da implementação de ações de proteção, que caracteriza uma propensão a reduzir custos, foi analisada no âmbito de uma estratégia subjetiva de decisão. Essa análise revelou redução progressiva generalizada no valor da informação quando se aumenta esse atraso, mas a estratégia probabilística de emissão do alerta mostrou-se mais resiliente a esse comportamento que a determinística, apresentando menores

reduções de valor. A análise da sensibilidade do valor da informação em relação à informatividade da previsão de precipitação em modelos baseados em filtro de Kalman mostrou oportunidades de agregação de valor com a melhoria dessas previsões de entrada, mas fortemente condicionadas pelo grau de informatividade inicial apresentado e pela combinação de estratégias adotada. A configuração probabilística mostrou-se exigente em termos de informatividade, exibindo limite mínimo de qualidade da previsão de precipitação para justificar a introdução desse preditor em modelos de filtro de Kalman.

A análise das relações entre qualidade e valor do alerta de inundações, utilizando-se das múltiplas simulações do modelo Arima e de filtro de Kalman, revelou um processo de construção de valor com o domínio do formato côncavo, para a configuração determinística de estratégias, e convexa, para a probabilística. Ela também revelou a existência de oportunidade de um salto qualitativo de agregação de valor, quando se desloca da configuração determinística de estratégias para a probabilística. A investigação das alternativas de melhoria do processo de previsão hidrológica foi realizada por meio de um experimento que tornava perfeita a previsão do modelo Arima a partir do curto prazo. Ela revelou a existência de uma região crítica relativa ao horizonte de previsão, entre 18 e 36 horas, cuja melhoria provocava significativa agregação de valor no caso em estudo, fato não revelado na análise de qualidade. Os resultados desse experimento realçaram a insuficiência da avaliação da qualidade como determinante das opções de investimentos em melhoria das previsões e também caracterizaram a configuração probabilística de estratégias como potencializadora dessas melhorias, capaz de encurtar o horizonte de tempo necessário para a máxima agregação de valor.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O problema de associar valor à informação hidrometeorológica tem conquistado interesse dos meios acadêmico, empresarial e governamental face à consciência coletiva crescente da necessidade de explicitar as conexões entre o desenvolvimento científico e tecnológico da área e suas contribuições para a sociedade. Essas contribuições estão associadas tanto à redução da vulnerabilidade humana e ambiental quanto à alavancagem da eficiência econômica e competitividade dos negócios. Conforme discutido, as motivações para o estudo do valor da informação hidrometeorológica abrangem a busca de justificativas para o financiamento da área, a orientação para novos investimentos em pesquisa e produtos e a identificação de oportunidades para otimização do uso das informações disponíveis.

Frente à relevância do problema e das motivações identificadas, e em consonância com os objetivos apresentados, este trabalho de pesquisa buscou estruturar uma abordagem metodológica para a gestão do valor da informação hidrometeorológica, bem como apresentar a aplicação da mesma a um problema representativo de um caso concreto: o valor da informação de alerta de inundação para proteção de bens móveis em edificações residenciais de União da Vitória. Com a mudança de foco proposta neste trabalho, de estudos isolados de valor da informação hidrometeorológica para um processo sistemático e estruturado de gestão do valor da informação, a ser desenvolvido nas organizações sensíveis ao tempo, clima ou recursos hídricos, busca-se o estabelecimento de um ciclo positivamente realimentado de desenvolvimento na área. Nesse ciclo, os primeiros estudos geram a consciência das oportunidades de maior aproveitamento do atual potencial de uso das informações disponíveis, cuja implementação gera os benefícios iniciais baseados na formalização e otimização do uso, em processos de ajustamento operacional. Esses benefícios iniciais estimulam a realização de novos estudos de valor, que agregam motivação e orientação para os investimentos adicionais necessários em infra-estrutura e inovação na produção de informações, em processos de ajustamento tecnológico. Esse ciclo positivamente realimentado tem o potencial de impulsionar o desenvolvimento

sustentável das ciências atmosféricas e ambientais e justificar os serviços operacionais, públicos e privados, de provimento das informações hidrometeorológicas, com a produção ordenada e crescente de benefícios agregados para os setores produtivos usuários e para toda a sociedade.

As principais conclusões deste trabalho de tese, bem como algumas recomendações, comentários e desafios de pesquisa identificados, que estão relacionados ao tema discutido, estão reunidos neste capítulo final. Algumas informações relevantes, já anteriormente apresentadas, também foram adicionadas ao capítulo para maior compreensão dos itens discutidos. As conclusões e recomendações foram organizadas segundo sua abrangência, sendo inicialmente apresentadas as gerais, relativas ao problema da estimativa e gestão do valor da informação hidrometeorológica, depois as específicas, relativas à abordagem metodológica proposta e, finalmente, aquelas derivadas do estudo realizado, relativas ao valor da informação de alerta de inundação.

8.1 Relativas ao problema da estimativa e gestão do valor da informação hidrometeorológica

No âmbito deste trabalho, configurou-se o problema de associar valor à informação, dentro de algum contexto de análise, ao desafio de buscar identificar uma medida do quanto é desejável nesse contexto, empreender processos de acesso, assimilação e uso da informação, promovendo, como conseqüência, a redução da incerteza, alteração comportamental e geração de conhecimentos. Assumindo esse referencial, para cada problema de valor deve-se explicitar qual conceito de desejável é representativo do valor, utilizando-se da perspectiva sociológica, utilitarista ou mercadológica, e qual a métrica mais apropriada para mensuração do valor nesse contexto. Também se devem identificar quais os resultados, condicionados pela informação e avaliados em relação aos objetivos, interesses e finalidades do contexto de análise, expressam o desejo e conseqüentemente determinam o valor da informação. O fundamental é não perder a perspectiva de que valor é medida atribuída pelo indivíduo, organização ou sociedade à experiência vivenciada de acesso, assimilação e uso da informação alvo de análise, não se limitando à mensuração de suas características próprias e endógenas, que comumente retratam a sua qualidade.

As informações hidrometeorológicas, conforme configuradas neste trabalho, como sendo responsáveis por caracterizar o estado da atmosfera e dos recursos hídricos, foram consideradas como constituintes de uma classe mais geral denominada de informações ambientais. Um aspecto de pesquisa não incluído no

trabalho é estimar o valor da informação hidrometeorológica como insumo fundamental para o gerenciamento direto dos recursos naturais água e ar, bem como para a gestão ambiental integrada. O desafio de pesquisa identificado advém da oportunidade de buscar qualificar aspectos da informação hidrometeorológica que coadunam com a proposta de desenvolvimento sustentável, bem como quantificar o seu valor nos processos decisórios componentes da gestão dos recursos naturais. Adicional ao valor dos múltiplos usos associados aos impactos do tempo, clima ou recursos hídricos sobre as atividades sociais, produtivas ou não, o valor ambiental das informações hidrometeorológicas pode agregar novas demandas e justificativas para a produção e inovação dessas informações.

A perspectiva teórica principal selecionada neste trabalho de pesquisa para embasar os estudos de valor da informação hidrometeorológica foi a Teoria da Decisão, proveniente das Ciências da Administração. Essa opção foi motivada pelo interesse no contexto de análise de nível organizacional e / ou individual e pelas oportunidades de entendimento ampliado dos processos de acesso, assimilação e uso das informações, que o estudo dos processos decisórios sensíveis oferece. Diversos modelos baseados nessa perspectiva teórica foram discutidos, como o modelo analítico simplificado, o modelo bayesiano ampliado e o modelo bayesiano *fuzzy*. Também foi discutida a aplicação dessa perspectiva e modelos em processos decisórios típicos de problemas envolvendo as informações hidrometeorológicas. A aplicabilidade dos modelos considerados guarda estreita relação com a caracterização do processo decisório, seu nível de formalização, sua racionalidade preponderante e sua natureza mais objetiva ou subjetiva. Enquanto os modelos considerados quantificam adequadamente os efeitos sobre os resultados da incorporação da informação em processos decisórios mais objetivos, formalizados, cuja racionalidade preponderante é programável, o mesmo não acontece com processos decisórios mais subjetivos, cuja racionalidade combina valores, interesses e cognição dos envolvidos. Nesse sentido, apesar de avanços consideráveis nas ciências comportamentais, a maioria dos resultados de estudos empreendidos é qualitativa e sua incorporação em modelos analíticos é incipiente, fato que limita os estudos descritivos de processos decisórios mais subjetivos. As alternativas mais utilizadas têm sido o uso de perturbações subjetivas determinadas sobre modelos normativos e utilização de funções utilidade que incorporam a aversão ao risco do tomador de decisão. Iniciativas como a de FERREL e KRZYSZTOFOWICZ (1983) e de ROULSTON e SMITH (2004), que modelam aspectos comportamentais do processo decisório sob efeito de informações hidrometeorológicas são raras. Nesse sentido, um desafio de pesquisa identificado é o desenvolvimento de modelos descritivos de decisão envolvendo

informações hidrometeorológicas, em situações de eventos extremos ou não, que incorporem variáveis comportamentais tais como confiança, intolerância a falhas de previsão, aprendizagem, percepção de risco, estado de preparação e disposição em acreditar em alertas e avisos.

Os processos decisórios sensíveis ao tempo, clima e recursos hídricos exibem comumente descontinuidades e fortes assimetrias em suas funções de resultado, em especial aqueles relacionados aos eventos extremos, constituindo-se em problemas potencialmente afetados pela incorporação das incertezas. Em diversos usos da informação hidrometeorológica, é possível identificar um ou mais valores críticos, a partir dos quais o resultado é diferentemente afetado, criando descontinuidades ou degraus, similares aos estudados por MORGAN e HENRION (1990). Essa situação revela a importância do processamento e disseminação das incertezas das informações hidrometeorológicas e de sua inclusão no processo decisório, condição para a adoção plena dos princípios da racionalidade bayesiana. As incertezas sobre previsões podem ser identificadas em um esforço específico próprio, de atualização periódica, ou serem incorporadas na própria informação, o que dá origem às chamadas previsões probabilísticas. Essas previsões incorporam capacidade de atualização dinâmica das incertezas e apresenta uma série de vantagens discutida no item 5.4, entre as quais realça a garantia de valor da informação maior ou igual a outros tipos de previsão ditas determinísticas, se todas são oriundas do mesmo processo de produção, ou seja, existe relação de suficiência estatística entre elas. Nesse sentido recomenda-se a divulgação, pelas agências e empresas de meteorologia e recursos hídricos, das incertezas presentes nas informações de monitoramento e previsão, bem como a adoção mais generalizada do formato probabilístico como modelo de disseminação das previsões hidrometeorológicas. Certamente, tal esforço exigirá estudos de propagação das incertezas e alterações nos sistemas de previsão, o que já acontece em algumas agências e empresas brasileiras, que começam a adotar o modelo probabilístico em suas previsões. Existe convergência de que tanto o pessoal técnico quanto o grande público podem compreender uma informação em termos de probabilidades, em especial, se essa é precedida de explicação e treinamento. A disseminação generalizada das previsões probabilísticas favorecerá a formalização e otimização dos processos decisórios sensíveis às informações hidrometeorológicas.

As informações do tempo, clima e recursos hídricos apresentam um conjunto de condicionantes econômicos que perturba o equilíbrio de mercado, impede o uso de instrumentos clássicos de precificação e agrega dificuldades extras na estimativa de seu valor nos contextos setorial e social. Os aspectos gerais do produto informação

aliados aos aspectos específicos de não rivalidade, não exclusividade, não apropriação da utilidade e caráter estratégico, que as informações hidrometeorológicas apresentam em determinado grau, condicionam preferencialmente o seu provimento como bens públicos, a exemplo do que acontece na maioria dos países do mundo. Uma questão recorrente é a delimitação da responsabilidade pelo financiamento da produção dessas informações, entre usuários e contribuintes. Em uma ampla análise do tema, GUNASEKERA (2004) discute modelos de sustentabilidade das agências oficiais de meteorologia frente ao valor econômico das informações geradas, de total financiamento público até modelos empresariais, com financiamento privado para alguns serviços, visando a recuperação de custos. Um ponto de convergência identificado é a necessidade de manutenção dos expressivos benefícios de ampla abrangência (*spillover benefits*), que estão associados à informação hidrometeorológica, cujo uso torna-se generalizado na sociedade a partir de seu livre provimento e justificam o financiamento público. Sob a perspectiva ampla, social, uma política de recuperação de custos deve ser avaliada frente aos impactos que provoca nos benefícios generalizados, pois a economia gerada para a agência pode ser muito menor que a supressão de ganhos extensivos para toda a sociedade. Independentemente do modelo de sustentabilidade adotado, estudos do valor da informação cumprem papel relevante, tanto no financiamento público, na competição por recursos cada vez mais escassos frente às múltiplas demandas sociais, quanto no financiamento privado, na elaboração de estratégias de marketing e precificação do serviço de provimento das informações específicas a serem disponibilizadas.

Considerando-se a realidade brasileira, as informações hidrometeorológicas têm sido produzidas por um complexo técnico-científico de instituições ainda pouco articulado, que envolve agências públicas federais, estaduais e até municipais, institutos de pesquisa, universidades e empresas usuárias e de meteorologia. Nos últimos anos percebem-se incrementos na consciência coletiva sobre o problema e avanços significativos no esforço de articulação nacional, representados por ações tais como a estruturação do Sistema Nacional de Recursos Hídricos, com implementação em curso do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, bem como a formalização e funcionamento, no âmbito interministerial, da Comissão de Coordenação das Atividades de Meteorologia, Climatologia e Hidrologia. Apesar desses avanços, persiste um conjunto de indefinições de responsabilidades e de sobreposições de papéis, o qual tem gerado, por um lado, disponibilidade limitada de dados, previsões e outras informações de diversas naturezas e em diferentes escalas e, por outro, duplicidade de esforços e custos nas instituições envolvidas. Os investimentos realizados e planejados em tecnologia de monitoramento e capacitação

de pesquisa na área, bem como os custos de manutenção e operação da infraestrutura instalada são vultosos e o país não tem aproveitado todo o potencial de economia de escala e escopo advindo da articulação vertical, entre os níveis nacional, estadual, municipal e privado e da articulação horizontal, entre as áreas da meteorologia, de recursos hídricos e de meio ambiente, bem como entre os setores usuários. A continuidade do financiamento do sistema ainda desarticulado acaba por reforçar as contradições existentes. Nesse sentido, recomenda-se acelerar e aprofundar os esforços de articulação do complexo provedor das informações hidrometeorológicas, com participação de provedores e usuários de diversos níveis de governo e da comunidade usuária, bem como elaborar um programa nacional de inovação da área, que fomenta estudos do valor da informação hidrometeorológica em múltiplos setores usuários e oriente seus projetos de desenvolvimento conforme a significância dos valores socialmente estimados por esses estudos. Também, a exemplo de outros países e de forma articulada com os organismos de defesa civil, recomenda-se a estruturação de um banco de dados nacional de impactos sociais, que envolva seus aspectos econômicos, dos eventos extremos de tempo, clima e recursos hídricos. O esforço dessa estruturação será recompensado pela multiplicidade e qualidade de estudos de valor que se desenvolverão nos meios acadêmicos e profissionais, das instituições provedoras e usuárias das informações hidrometeorológicas.

8.2 Relativas à metodologia proposta de gestão do valor da informação hidrometeorológica

A abordagem metodológica proposta enfatiza o estabelecimento de um processo sistemático de gestão do valor da informação hidrometeorológica em substituição à realização isolada de estimativas do valor dessa informação. Essa mudança de foco advém das seguintes constatações: (1) os motivadores para a realização de estudos de valor são suficientemente relevantes para suportar esforço continuado permanente de gestão nas organizações sensíveis ao tempo, clima e recursos hídricos; (2) os condicionantes e desafios para a realização de estudos de valor exigem comumente aprofundamento sucessivo no conhecimento do problema, geração de dados específicos de impacto e representação realística dos processos decisórios vinculados, o que dificulta sua realização em um esforço único concentrado; (3) os valores associados à informação não são únicos, mas múltiplos, dependem do método utilizado e exigem diversas iniciativas de estudo de valor para serem suficientemente avaliados; (4) cada valor estimado traduz um aspecto da relação entre características

da informação e seu processo de acesso, assimilação e uso, e a análise combinada desses valores gera oportunidades de gestão no sentido de agregação de valor; e (5) essas oportunidades de gestão podem ser combinadas na forma de estratégias voltadas à otimização do uso e / ou à inovação na produção da informação. Dentro dessa abordagem, gestão do valor da informação deve ser visto como um processo contínuo, concomitante ao uso, que agregue em um esforço compartilhado usuários e provedores da informação. Esse processo deve ser capaz tanto de gerar estimativas, cada vez mais elaboradas, do valor da informação, quanto de revelar o processo de construção do valor, que permita a derivação de estratégias de gestão. Nesse sentido, o esforço aplicado à gestão do valor da informação deve ser visto como um investimento, com benefícios no presente e no futuro, para usuários e provedores, na medida em que favorece a compreensão e a melhoria no uso das informações no curto prazo, e subsidia o planejamento da pesquisa, da infra-estrutura e da inovação na produção da informação, no médio e longo prazos.

A abordagem proposta está focada na gestão do valor da informação hidrometeorológica, tendo aplicação orientada para o contexto de análise organizacional e individual. Ela estrutura o processo de gestão em três módulos interdependentes abrangendo a configuração do problema e delimitação do espaço de análise, a seleção e integração dos métodos de estimativa de valor e a derivação das estratégias de gestão, os quais devem ser periodicamente revisados, ampliados e renovados. Conforme o caso, sua implementação progressiva permite a derivação de múltiplos valores da informação, os quais foram denominados de valor de controle, valores perfeitos, posterior, percebido, descritivo e normativo, e valores imperfeitos, percebido, descritivo e normativo. Também os valores de demanda e de oferta podem ser estimados, conforme discussão de LAWRENCE (1999), se a função utilidade é não aditiva e incorpora a aversão ao risco do tomador de decisão. A análise combinada desses valores por processo decisório subsidia a identificação de necessidades de conscientização dos tomadores de decisão, ajustamentos e capacitação de uso, melhorias do serviço de provimento das informações, pesquisa e inovação na produção de informações específicas. As análises entre processos decisórios e organizacionais subsidiam a definição de prioridades entre atividades e processos e a consolidação de estratégias institucionais voltadas à manutenção, à melhoria e à inovação dos serviços de informação, respaldando investimentos em infra-estrutura, P&D, capacitação, consultoria e prestação de serviços a serem compartilhados pela organização. A análise combinada das condições de uso e geração das informações pode favorecer a derivação de estratégias de ajustamento, que podem ser operacionais, orientadas para mudanças não estruturais, através de

recalibrações ou ajustes, ou tecnológicas, orientadas para mudanças estruturais, através da inovação tecnológica da infra-estrutura e dos processos de uso e produção das informações.

A abordagem metodológica abrange ainda um esquema de estruturação do ambiente de simulação e análise do valor da informação hidrometeorológica, o qual foi concebido para ser utilizado nos modelos descritivos e normativos que exigem modelagem do processo de tomada de decisão. Esse esquema identifica um conjunto de módulos estruturantes responsáveis por: (1) gerar as condições de contorno de informação disponível, estado futuro e impacto potencial; (2) reproduzir o processo decisório de seleção da alternativa de ação em cada momento de decisão, condicionada pela informação disponível; (3) calcular os resultados do impacto em termos de indicadores de valor; e (4) estimar o valor da informação em relação a uma informação de referência. Na implementação do ambiente de simulação, tanto em problemas típicos do valor da informação hidrometeorológica apresentados no Anexo A, quanto no caso do valor do alerta de inundações apresentado no capítulo 7, bem como em outros problemas de valor da informação desenvolvidos pelo autor, foi testada a abordagem Dinâmica de Sistemas. A aplicabilidade dessa abordagem foi verificada, atestando os argumentos explicitados para a sua adequação à modelagem e simulação de problemas de valor da informação hidrometeorológica, apresentados no item 6.3.2. Como era de se esperar, a abordagem não torna simples a tarefa de modelagem nem elimina os esforços teóricos e empíricos necessários para avançar o conhecimento sobre os sistemas reais. Entretanto, merece destaque a força de comunicação dos ambientes baseados em Dinâmica de Sistemas acerca do comportamento dinâmico do sistema modelado, bem como dos seus pressupostos. Esse fato cria empatia e interesse, desenvolve o espírito crítico dos usuários e realimenta o analista com críticas e sugestões de melhoria, o que favorece a modelagem como um todo, tornando-a parte de um processo interativo de aprendizagem e solução de problemas.

Com o intuito de subsidiar e acelerar os estudos de valor da informação hidrometeorológica, a abordagem metodológica inclui também uma proposta de tipologia de problemas do valor da informação hidrometeorológica. Apesar dos casos concretos não serem diretamente redutíveis aos tipos identificados, o reconhecimento de similaridades com categorias pré-estabelecidas ajuda no entendimento do problema, pode gerar propostas iniciais de modelagem e admitir extensões e generalizações para abranger o caso de interesse. Na tipologia proposta, os problemas foram categorizados em relação à representação que exigem: (1) do estado da atmosfera ou dos recursos hídricos; (2) da natureza e nível de agregação dos

indicadores de valor; e (3) do processo decisório impactado pelas informações. Também, com o mesmo intuito, é apresentada no Anexo A, a modelagem de problemas típicos do valor da informação hidrometeorológica utilizando-se da abordagem Dinâmica de Sistemas. Nesse anexo, além da ilustração de estimativa do valor da informação para casos hipotéticos, é realizada análise de sensibilidade do valor e derivadas expressões analíticas para o seu cálculo em relação aos principais parâmetros do problema, bem como investigadas estratégias de ajustamento operacional e tecnológico.

A expectativa de resultados com a implantação da gestão do valor da informação, baseada na abordagem metodológica apresentada, é uma mudança de patamar no uso das informações hidrometeorológicas, de uma ênfase predominantemente qualitativa, na qual a decisão é condicionada pela comunicação subjetiva da informação, para uma ênfase predominantemente quantitativa, baseada na otimização de processos decisórios formalizados e programáveis, com inclusão controlada de perturbações subjetivas. A produção das informações hidrometeorológicas já evoluiu do nível qualitativo, de descrição dos eventos possíveis e domínio das variáveis binárias, para um nível de maior detalhamento, com a caracterização quantitativa dos eventos e uso das variáveis categóricas e contínuas. Processos de gestão do valor da informação, na medida em que revelar ganhos potenciais baseados na incorporação das incertezas, podem estimular a produção de informações probabilísticas de monitoramento e previsão. Também, iniciativas de modelagem do processo decisório, realizadas no âmbito de um processo sistemático de gestão, podem estimular sua formalização e sua programação nos limites do domínio de sua objetividade. Avanços nas ciências comportamentais devem prover modelos quantitativos suficientes para incorporar as perturbações subjetivas nos processos decisórios dominantes. No seu conjunto, esse esforço de gestão, estudo e pesquisa deve estimular a mudança de patamar no uso das informações hidrometeorológicas para o domínio de uma ênfase mais quantitativa. Nesse sentido de otimização dos processos decisórios impactados, gestão do valor da informação hidrometeorológica comunga de constituintes e métodos comuns com a gestão de risco, entendida como uma abordagem estruturada de gerenciamento da incerteza, através da identificação e avaliação das fontes de risco e desenvolvimento de estratégias para administrá-lo (CROUHY *et al.*, 2006). Considerando-se risco como o valor esperado das conseqüências da ocorrência de determinado evento relevante para a organização, gestão do valor da informação hidrometeorológica pode ser vista como uma estratégia da gestão de risco voltada a minimizar (ou maximizar) o valor

esperado das conseqüências negativas (ou positivas) associadas à ocorrência de eventos de tempo, clima ou recursos hídricos para a organização.

Problemas de gestão do valor da informação hidrometeorológica, de acordo com a perspectiva teórica analisada, conectam necessariamente domínios científicos distintos e configuram-se como transversais e polidisciplinares. O seu tratamento necessita reunir conhecimentos oriundos de diversas fontes: (1) das ciências atmosféricas e ambientais, responsáveis pela caracterização da informação hidrometeorológica; (2) das ciências comportamentais e da administração, responsáveis pela caracterização dos processos decisórios usuários da informação e das estratégias de gestão; (3) da área disciplinar objeto do problema, responsáveis pela caracterização dos impactos do tempo, clima ou recursos hídricos. A ambigüidade do conceito de valor e a diversidade dos contextos de análise exigem definições prévias a cada estudo de valor, as quais condicionam a seleção de abordagens e métodos disponíveis. Diante da complexidade do problema, o fechamento desta abordagem metodológica de gestão exigiu operações concomitantes de análise e síntese. De análise, na investigação aprofundada dos constituintes do problema (valor, informação, processo decisório, impacto, resultado, incerteza, qualidade, etc.) e da diversidade de métodos de estimativa de valor. De síntese, na busca de uma visão de conjunto do problema, de reconhecimento de padrões entre constituintes e métodos e da combinação dos mesmos em um todo inovador, capaz de revelar a complexidade do processo de construção de valor presente no uso da informação hidrometeorológica e oportunidades para a sua gestão. Conforme comentado por CHRISTOFOLETTI (1999), o fundamental é sempre estar ciente da totalidade do sistema abrangente, da complexidade que o caracteriza e da sua estruturação hierárquica. Assim, a combinação de análise e síntese, em um processo realimentado de reducionismo e holismo, garante o avanço científico sobre a complexidade. A proposta metodológica emergente foi testada em um estudo de valor revelando potencial de aplicabilidade. Não se trata de nenhum atestado de validade ou de formulação acabada, pronta para uso. Antes disso, representa um conjunto coerente e lógico de proposições inicialmente testado, que merece ser inserido no processo de desenvolvimento científico para ser recorrentemente questionado e testado, aperfeiçoado e até substituído, quando de sua superação.

8.3 Relativas à estimativa e gestão do valor da informação de alerta de inundação

As conclusões específicas relativas ao caso de estudo realizado de valor dos alertas de inundação em União da Vitória foram reunidas e apresentadas no item 7.7. Algumas conclusões e recomendações mais abrangentes, relativas à estimativa e gestão do valor da informação para problemas de inundações urbanas, advindas do esforço empreendido de estudo, são discutidas na seqüência.

O modelo conceitual linear de informação-decisão para sistema de previsão e alerta de inundações, originalmente proposto por KRZYSZTOFOWICZ e DAVIS (1983a), têm sido referência recorrente nos trabalhos sobre o tema. Ele possui o mérito principal de integrar os processos de informação e decisão e modificar a perspectiva de avaliação do sistema, de medidas de qualidade da previsão para valor da informação. Neste trabalho de pesquisa, o modelo citado foi criticado em seus constituintes e relações, conforme apresentado no item 7.3.3, o que possibilitou a proposição de um modelo modificado, que expande as relações externas e internas do sistema e incrementa a sua representatividade e integração. Entre as modificações propostas destacam-se: (1) a inclusão de informações meteorológicas como insumo significativo do sistema; (2) a identificação de dois processos decisórios interdependentes no problema, a emissão do alerta e a tomada de decisão de proteção; (3) a explicitação das incertezas, que devem ser processadas, disseminadas e incorporadas em ambos os processos decisórios identificados; (4) a introdução de realimentação entre os subsistemas de informação e decisão, o que reforça a idéia de ajustamentos sistemáticos, operacionais e tecnológicos, orientados segundo o valor estimado dos alertas; e (5) a integração com processos mais abrangentes, de gestão de desastres naturais e de gestão integrada de recursos hídricos, como forma de contextualizar e incrementar a eficácia do sistema. Considera-se que o modelo proposto agrega os constituintes fundamentais para ser utilizado como referencial em estudos futuros do valor da informação de alerta de inundações.

A metodologia adaptada de avaliação dos impactos de inundações incorporou estudos brasileiros na área, o que favoreceu a aplicabilidade ao caso estudado. Sua utilização exigiu o desenvolvimento de um sistema de informações geográficas para análise de inundações, com integração de dados espaciais sobre o uso e ocupação da área urbana, e dados censitários sobre a distribuição e renda da população. Cabe destacar a importância da utilização de ambientes computacionais com potencialidades de processamento de informações georreferenciadas, conhecidos como sistemas de informações geográficas (SIG). A aplicação desse ferramental

mostrou-se preponderante na caracterização da ocupação das planícies de inundação e estimação de atributos específicos dessa ocupação, tais como a distribuição dos domicílios por classe econômica e as áreas construídas médias das edificações. A importância de sua utilização permanece nas etapas de manutenção e atualização da base de informações georreferenciadas e seu emprego pode abranger as etapas de análise das previsões, tomada de decisão e disseminação dos alertas de inundação. Conforme reconhecido por CHRISTOFOLETTI (1999) e GÜNTHER (1998), uma deficiência encontrada nos ambientes de SIG analisados foi a ausência de funções analíticas e de modelagem, o que impôs a realização de esforços extras, externos ao ambiente, no processamento das informações requeridas. Um exemplo de dificuldade encontrado no caso estudado foi a delimitação das planícies de inundação, que leva em consideração a inclinação da linha d'água ao longo do rio. A solução implementada exigiu utilização de resultados de modelos hidrodinâmicos previamente processados e desenvolvimento de um programa externo para determinação dos pontos limites de cada planície em relação a uma seção do rio de referência. A incorporação dessas facilidades de processamento mais sofisticadas, necessárias à modelagem e simulação, bem como a extensão da capacidade de integração com outros ambientes computacionais especializados, podem qualificar os SIGs como ferramentas básicas, tanto para a gestão do valor da informação hidrometeorológica quanto para a gestão de risco, que envolvam problemas de inundação urbana ou outros que exijam processamento de informações georreferenciadas.

O estudo empreendido de valor do alerta de inundações abrangeu proposições de indicador de valor e de estratégia de emissão do alerta não identificadas na revisão bibliográfica realizada. A utilização dessas proposições em problemas diversos de inundação pode orientar a decisão de emissão de alerta no sentido de uma maior sensibilidade social, combinada a uma maior agregação de valor no uso da informação. A proposta de indicador de valor refere-se à formulação de um índice de impacto social, conforme apresentado no item 7.5.4.2, a ser utilizado como critério de mensuração dos impactos da inundação, o qual deve ser minimizado com a operação do sistema de alerta. Esse índice pondera as perdas residenciais esperadas devido às inundações pela renda média familiar, buscando quantificar o tempo necessário, em dias / ano, de recomposição das perdas esperadas, com o uso de toda a renda disponível em cada domicílio. O índice tenta refletir uma medida da tragédia econômica imposta pelas inundações à população atingida. Sistemas de alerta orientados para minimizar o índice de impacto social reduzem o esforço econômico coletivo de recomposição material a uma situação similar àquela existente antes da inundação; eles não simplesmente minimizam o montante de perdas financeiras

esperadas devido ao fenômeno. A proposta de estratégia de emissão de alerta é de base probabilística, trata simultaneamente como variáveis aleatórias o nível máximo e o tempo de alagamento e considera a dependência estatística do tempo em relação ao nível. Pode ser considerada uma expansão da estratégia formulada por KRZYSZTOFOWICZ (1998), na qual só o nível é tratado como variável aleatória. A emissão do alerta é baseada na probabilidade conjunta do nível exceder determinado limite da planície de inundação e do tempo de alagamento ser inferior a um limite necessário à tomada de decisão de proteção. De acordo com as pesquisas apresentadas no item 5.4, a incorporação das incertezas da informação ao processo decisório usuário, realizada segundo os princípios bayesianos, traduz em uma agregação de valor positiva ou no mínimo nula (não reduz o valor utilitário). Esse fato foi verificado no estudo de valor realizado, quando se comparou os valores associados a essa estratégia de emissão de alerta em relação à estratégia puramente determinística, com demonstrações de agregação de valor para o primeiro caso. Um desafio de pesquisa aberto com este trabalho é comparar as estratégias probabilísticas de emissão de alerta, nas quais se varia o número e forma de tratamento da aleatoriedade das variáveis envolvidas, e buscar determinar os condicionantes de agregação de valor para cada proposta de estratégia.

Um aspecto de implementação que se mostrou satisfatório no estudo de valor realizado foi a opção pela construção e manutenção, em bases numéricas, das matrizes de verossimilhança e não utilização de distribuições teóricas de probabilidade para a sua representação. Essa opção foi utilizada tanto na produção das previsões associadas ao modelo de filtro de Kalman para a base histórica estimada de vazões, conforme apresentada no item 7.5.2.3, quanto na produção das incertezas relativas à previsão da vazão máxima e do tempo de sua ocorrência para ambos os modelos hidrológicos investigados, conforme apresentada no item 7.5.4.2. Essas matrizes construídas são do tipo classe prevista x classe observada, formatadas conforme categorias estabelecidas de diferenças de vazão ou tempo de ocorrência da vazão máxima. Em ambos os casos de aplicação, utilizou-se diferenças de vazão como variável de interesse. Essa consideração mostrou-se satisfatória, pois se adequou perfeitamente aos modelos diferenciais utilizados, bem como contornou o sério problema de baixa amostragem de vazões extremas nas séries de calibração. Sua utilização merece ser investigada para outros tipos de modelos hidrológicos e domínios de aplicação, com a possibilidade, se necessário, de inclusão da classe da última vazão observada como condicionante na matriz de verossimilhança. Na aplicação de produção das incertezas relativas à previsão da vazão máxima e do tempo de sua ocorrência, também se agregou o procedimento de atualização dinâmica

das matrizes de verossimilhança, o que na prática transformou a previsão determinística em uma previsão probabilística das duas variáveis, com a agregação da incerteza histórica permanentemente revisada. Essa abordagem pode ser o caminho mais curto para a obtenção de previsões probabilísticas para uso em problemas de inundação a partir dos modelos hidrológicos determinísticos disponíveis.

Algumas análises realizadas no estudo empreendido de valor e suas conseqüências para a derivação de estratégias merecem destaque nessas conclusões finais. Independentemente dos resultados específicos do estudo realizado, recomenda-se a realização dessas análises, pois as mesmas agregam benefícios extensivos à gestão do valor da informação de alerta em qualquer problema de inundação. A investigação dos efeitos da incorporação das incertezas nos processos decisórios pertinentes permite a determinação de um valor para a inclusão da incerteza, que serve de referência para ações de modernização do uso e produção de previsões probabilísticas. Análises de múltiplas estratégias de tomada de decisão de proteção aliadas a simulações com perturbações subjetivas de atraso da população na implementação de ações de proteção revelam a importância das ações de capacitação para o uso da informação de alerta e seu impacto na determinação do valor da informação. Comparativos entre iniciativas de modernização tanto no uso das informações, através da variação de estratégias de decisão de emissão do alerta e proteção dos bens, quanto na produção das informações, através de variações de modelo hidrológico e da informatividade da previsão de precipitação, orientam o equacionamento dos investimentos entre ambos os enfoques para maior agregação de valor. A análise das relações entre qualidade e valor advindas de múltiplas simulações de previsões hidrológicas combinadas com estratégias de uso, pode revelar formatos dominantes, relações invertidas e existência de degraus, os quais ajudam a dimensionar os esforços ainda necessários para efetiva agregação de valor, bem como subsidiam a elaboração de planos de investimentos com essa finalidade. A investigação de potenciais alternativas de melhoria no processo de previsão hidrológica, a partir de experimentos que corrigem tipos de erros específicos, subsidia o entendimento da relação entre valor e a estrutura de erros das previsões e pode orientar os esforços de melhoria na produção das informações, demonstrando comumente a insuficiência da avaliação da qualidade como determinante das opções de investimentos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEP, 2006, *Critério de Classificação Econômica Brasil*. Disponível em http://www.abep.org/codigosquias/ABEP_CCEB.pdf. Acesso em 10/04/06.
- AGÜERO, P. V., 1996, *Avaliação econômica dos recursos naturais*. Tese de D.Sc., Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, USP, São Paulo, SP, Brasil.
- ANDERSON, B. D., MOORE, J. B., 2005, *Optimal filtering*. Mineola, USA, Dover Publications.
- BARRETO, A. A., 1999, "A oferta e a demanda da informação: condições técnicas, econômicas e políticas", *Revista Ciência da Informação*, IBICT, v. 28, n. 2, pp. 168-173.
- BAZERMAN, M. H., 2004, *Processo decisório*. Rio de Janeiro, Editora Campus.
- BEAL, A., 2004, *Gestão estratégica da informação*. São Paulo, Editora Atlas.
- BENJAMIN, J. R., CORNELL, C. A., 1970, *Probability, statistics, and decision for civil engineers*. New York, McGraw-Hill Book Company.
- BERROCAL, V. J., RAFTERY, A. E., GNEITING, T., 2007, "Combining spatial statistical and ensemble information in probabilistic weather forecasts", *Monthly Weather Review*, v. 135, n. 4 (Apr), pp. 1386-1402.
- BRAS R. L., RODRÍGUEZ-ITURBE, I., 1993, *Random functions and hydrology*. New York, Dover Publications.
- BRICEÑO, S., 2007, "Using what we know about disaster for safer lives and livelihoods". In: WMO, 2007, *Elements for life*, Chapter III.1, Geneva, Switzerland, Tudor Rose.
- BRIGGS, W., 2005, "A general method of incorporating forecast cost and loss in value scores", *Monthly Weather Review*, v. 133, n. 11 (Nov), pp. 3393-3397.
- BROOKS, H. E., 2004, "Tornado-warning performance in the past and future: a perspective from signal detection theory", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, n. 6 (Jun), pp. 837-843.
- BURN, D. H., 1999, "Perceptions of flood risk: a case study of the Red River flood of 1997", *Water Resources Research*, v. 35, n. 11 (Nov), pp. 3451-3457.

CECEZ-KECMANOVIC, D., 1983, "The value of information in decision-making". In: Sol, H. G. (editor), *Processes and Tools for Decision Support*, North-Holland Publishing Company.

CEHPAR, 1996, *Análise do escoamento em regime não permanente no rio Iguaçu entre Fluvópolis e Foz do Areia*, Relatório Técnico n. 5, Projeto HG-79, CEHPAR/UFPR.

CHANGNON, S. A., 2003, "Measures of economic impacts of weather extremes", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 84, n. 9 (Sep), pp. 1231-1235.

CHANGNON, S. A., PIELKE JR., R. A., CHANGNON, D., *et al.*, 2000, "Human factors explain the increased losses from weather and climate extremes", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 81, n. 3 (Mar), pp. 437-442.

CHRISTOFOLETTI, A., 1999, *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo, Editora Edgard Blücher.

CLARKE, R. T., 1973, "A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use", *Journal of Hydrology*, v. 19, pp. 1-20.

COELHO NETTO, J. T., 2001, *Semiótica, informação e comunicação*. 5 ed. São Paulo, Editora Perspectiva.

CROUHY, M., GALAI, D., MARK, R., 2006, *The essentials of risk management*. New York, The McGraw-Hill Companies.

DOSWELL III, C. A., 2004, Weather forecasting by humans: heuristics and decision making. *Weather and Forecasting*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1115-1126.

DOSWELL III, C. A., BROOKS, H. E., 1998, "Budget cutting and the value of weather services", *Weather and Forecasting*, v. 13, n. 1 (Mar), pp. 206-212.

FERREL, W. R., KRZYSZTOFOWICZ, R., 1983, "A model of human response to flood warnings for system evaluation", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1467-1475.

FORRESTER, J. W., 1971, "Counterintuitive behavior of social systems", *Theory and Decision*, v. 2, n. 2 (Dec), pp. 109-140.

FORRESTER, J. W., 1994, "System dynamics, system thinking, and soft OR", *System Dynamics Review*, v. 10, n. 2-3 (Summer-Autumn), pp. 245-256.

GLAHN, B., 2005, "Comments on 'understanding user decision making and the value of improved precipitation forecasts: lessons from a case study'", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 86, n. 10 (Oct), pp. 1484-1487.

GOMES, L. F., GOMES, C. F., ALMEIDA, A. T., 2002, *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. São Paulo, Editora Atlas.

GRAEBER, D., 2001, *Toward an anthropological theory of value: the false coin of our own dreams*. New York, Palgrave.

GUNASEKERA, D., 2004, *Economic issues relating to meteorological services provision*, BMRC Research Report n. 102, Bureau of Meteorology Research Centre, Australia.

- GÜNTHER, O., 1998, *Environmental information systems*. Berlin, Springer.
- HAND, J., LEV, B. (eds), 2003, *Intangibles assets: values, measures and risks*. New York, Oxford University Press.
- HARVEY JR., L. O., HAMMOND, K. R., LUSK, C. M., *et al.*, 1992, "The application of signal detection theory to weather forecasting behavior", *Monthly Weather Review*, v. 120, n. 5 (May), pp. 863-883.
- JICA, 1995a, *The master plan study on the utilization of water resources in Paraná state in the Federative Republic of Brazil*, Final Report, Sectoral Report, Volume H, Flood Control, Japan International Cooperation Agency.
- JICA, 1995b, *The master plan study on the utilization of water resources in Paraná state in the Federative Republic of Brazil*, Final Report, Sectoral Report, Volume N, Cost Estimate, and Economic and Financial Assessment, Japan International Cooperation Agency.
- JOHNSON, S. R., HOLT, M. T., 1997, "The value of weather information". In: Katz, R. W., Murphy, A. H., *Economic value of weather and climate forecasts*, chapter 3, Cambridge, Cambridge University Press.
- JOLLIFFE, I. T., STEPHENSON, D. B. (eds), 2003, *Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science*. Chichester, England, John Wiley & Sons.
- KAST, F. E., ROSENZWEIG, J. E., 1976, *Organização e Administração: um enfoque sistêmico*. São Paulo, Pioneira.
- KATZ, R. W., MURPHY, A. H., 1997a, *Economic value of weather and climate forecasts*. Cambridge, Cambridge University Press.
- KATZ, R. W., MURPHY, A. H., 1997b, "Forecast value: prototype decision-making models". In: Katz, R. W., Murphy, A. H., *Economic value of weather and climate forecasts*, chapter 6, Cambridge, Cambridge University Press.
- KELLY, J., 2006, *Opportunities for 21st century meteorology: new markets for weather, water and climate information*. Disponível em www.ametsoc.org/atmospolicy/presforums/albq2001/Kelly.pdf. Acesso em 20/01/06.
- KELLY, K. S., KRZYSZTOFOWICZ, R., 1994, "Probability distributions for flood warnings systems", *Water Resources Research*, v. 30, n. 4 (Apr), pp. 1145-1152.
- KERSTEN, G. E., MIKOLAJUK, Z., YEH, A. G. (eds), 2000, *Decision support systems for sustainable development*. Ottawa, Canada, IDRC.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1983a, "A methodology for evaluation of flood forecast-response systems: 2. theory", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1431-1440.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1983b, "A bayesian markov model of the flood forecast process", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1455-1465.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1983c, "Why should a forecaster and a decision maker use Bayes theorem", *Water Resources Research*, v. 19, n. 2 (Apr), pp. 327-336.

- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1992, "Bayesian correlation score: a utilitarian measure of forecast skill", *Monthly Weather Review*, v. 120, n. 1 (Jan), pp. 208-219.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1993, "A theory of flood warning systems", *Water Resources Research*, v. 29, n. 12 (Dec), pp. 3981-3994.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1998, "Probabilistic hydrometeorological forecasts: toward a new era in operational forecasting", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, n. 2 (Feb), pp. 243-251.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 1999, "Bayesian theory of probabilistic forecasting via deterministic hydrologic model", *Water Resources Research*, v. 35, n. 9 (Sep), pp. 2739-2750.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 2001, "The case for probabilistic forecasting in hydrology", *Journal of Hydrology*, v. 249, n. 1-4 (Aug), pp. 2-9.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., 2002, "Bayesian system for probabilistic river stage forecasting", *Journal of Hydrology*, v. 268, n. 1-4 (Nov), pp. 16-40.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., DAVIS, D. R., 1983a, "A methodology for evaluation of flood forecast-response systems: 1. analyses and concepts", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1423-1429.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., DAVIS, D. R., 1983b, "A methodology for evaluation of flood forecast-response systems: 3. cases studies", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1441-1454.
- KRZYSZTOFOWICZ, R., DAVIS, D. R., 1983c, "Category-unit loss function for flood forecast-response system evaluation", *Water Resources Research*, v. 19, n. 6 (Dec), pp. 1476-1480.
- LAWRENCE, D. B., 1999, *The economic value of information*. New York, Springer.
- LEITE, E. A., BENETI, C. A., GUETTER, A. K., 2002, "Aplicações meteorológicas para o setor elétrico: a experiência do SIMEPAR", *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, v. 26, Agosto, p. 7-17.
- LEITE, E. A., DIAS, N. L., ROTUNNO FILHO, O. C., 2006, "The effect of precipitation forecasts and monitoring on hourly hydrological statistical prediction models". In: *Proceedings of 8th ICSHMO*, 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Foz do Iguaçu, Brazil, April.
- LEITE, E. A., GONÇALVES, J. E., ROTUNNO FILHO, O. C., 2007, "Sensibilidade da previsão hidrológica em relação à informatividade da previsão de precipitação: análise comparativa de diferentes modelos". In: *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, São Paulo, Novembro.
- LEITE, E. A., MORO, R. R., 2004, "Planejamento tecnológico da área de hidrometeorologia para o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS". In: *Anais do XXIII Simpósio Nacional de Gestão da Inovação Tecnológica*, PACTO, Curitiba, Outubro.
- LEITE, E. A., ROTUNNO FILHO, O. C., 2004, "Proposta de abordagem para o problema de estimativa do valor da informação de tempo, clima e recursos hídricos

- para empresas do setor elétrico”. In: *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, SBMET, Fortaleza. Agosto.
- LEITE, E. A., ROTUNNO FILHO, O. C., 2006, “Análise de sensibilidade da previsão hidrológica em relação à informatividade da previsão de precipitação”. In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, SBMET, Florianópolis, Novembro.
- LEV, B., 2001, *Intangibles: management, measurement and reporting*. Washington, Brookings Institution Press.
- MACAULEY, M. K., 1997, “Some dimensions of the value of weather information: general principles and a taxonomy of empirical approaches”. In: *Workshop on the social and economic impacts of weather proceedings*, Boulder, USA, USWRP. Disponível em <http://sciencepolicy.colorado.edu/socasp/weather1/macaulley.html>.
- MACAULEY, M. K., 2005, *The value of information: a background paper on measuring the contribution of space-derived earth science data to national resource management*, Discussion Paper 05-26 (May), Resources for the Future, Washington, USA. Disponível em <http://www.rff.org/Documents/RFF-DP-05-26.pdf>.
- MACHADO, M. L., NASCIMENTO, N., BAPTISTA, M., *et al.*, 2007, *Curva da danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia*, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG. Disponível em <http://www.eclac.cl/samtac/noticias/documentosdetrabajo/9/23439/InBr02002.pdf>.
- MARX, K., 2004, *O capital: extratos por Paul Lafargue*. São Paulo, Conrad Editora do Brasil.
- MCCONNELL, P. (editor), 1995, *Making a difference: measuring the impact of information on development*. Ottawa, Canada, IDRC.
- MENOU, M. J., 1993, *Measuring the impact of information on development*. Ottawa, Canada, IDRC.
- MERKHOFFER, M. W., 1987, *Decision science and social risk management*. Dordrecht, Holland, D. Reidel Publishing Company.
- MERZ, B., KRELBICH, H., THICKEN, A., *et al.*, 2004, “Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to building”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 4, pp. 153-163.
- MILLER, F. J., 2005, *I=0: Information has no intrinsic meaning*. Disponível em <http://www.sveiby.com/articles/Miller99.htm>. Acesso em 18/10/05.
- MINTZBERG, H., RAISINGHANI, D., THÉORËT, A., 1976, “The structure of ‘unstructured’ decision processes”, *Administrative Science Quarterly*, v. 21, n. 2 (Jun), pp. 246-275.
- MIT, 1992, *Road maps: a guide to learning system dynamics*, SDEP, System Dynamics Group, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology. Disponível em <http://sysdyn.clexchange.org/road-maps/rm-toc.html>.
- MOODY, D., WALSH, P., 1999, “Measuring the value of information: an asset evaluation approach”. In: *7th European Conference on Information Systems Proceedings*, pp. 496-512, Copenhagen, Denmark.

- MORESI, E. D., 2000, "Delineando o valor do sistema de informação de uma organização", *Ci. Inf.*, v. 29, n. 1 (Jan-Abr), pp. 14-24.
- MORGAN, M. G., HENRION, M., 1990, *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- MURPHY, A. H., 1976, "Decision-making models in the cost-loss ratio situation and measures of the value of probability forecasts", *Monthly Weather Review*, v. 104, n. 8 (Aug), pp. 1058-1065.
- MURPHY, A. H., 1977, "The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss ratio situation", *Monthly Weather Review*, v. 105, n. 7 (Jul), pp. 803-816.
- MURPHY, A. H., 1985, "Decision-making and the value of forecasts in a generalized model of the cost-loss situation", *Monthly Weather Review*, v. 113, n. 3 (Mar), pp. 362-369.
- MURPHY, A. H., 1991, "Probabilities, odds, and forecasts of rare events", *Weather and Forecasting*, v. 6, n. 2 (Jun), pp. 302-307.
- MURPHY, A. H., EHRENDORFER, M., 1987, "On the relationship between the accuracy and value of forecasts in the cost-loss ratio situation", *Weather and Forecasting*, v. 2, n. 3 (Sep), pp. 243-251.
- 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.
- MURPHY, A. H., WINKLER, R. L., 1987, "A general framework for forecast verification", *Monthly Weather Review*, v. 115, n. 7 (Jul), pp. 1330-1337.
- MURPHY, A. H., YE, Q., 1990, "Optimal decision making and the value of information in a time-dependent version of the cost-loss ratio situation", *Monthly Weather Review*, v. 118, n. 4 (Apr), pp. 939-949.
- NASCIMENTO N., BAPTISTA, M., SILVA, A., *et al.*, 2006, "Flood-damage curves: methodological development for the brazilian context", *Water Practice & Technology*, v. 1, n. 1, pp. 22-30.
- NEWTON, P., 2004, *An introduction to system dynamics*. Disponível em <http://www.stewardshipmodeling.com>. Acesso em 07/07/04.
- 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.
- PIELKE JR., R. A., 1997, "Asking the right questions: atmospheric sciences research and societal needs", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 2 (Feb), pp. 255-264.
- PIELKE JR., R. A., CARBONE, R., 2002, "Weather impacts, forecasts, and policy: an integrated perspective", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n.12 (Mar), pp. 393-403.

PINTÉR, L., ZAHEDI, K., CRESSMAN, D. R., 2000, *Capacity building for integrated environmental assessment and reporting*. Winnipeg, Canada, International Institute for Sustainable Development.

PORTER, M. E., 1986, *Estratégia competitiva: técnicas para análise de indústrias e da concorrência*. Rio de Janeiro, Editora Campus.

QUEENSLAND Government, 2002, *Guidance on the assessment of tangible flood damages*, Department of Natural Resources and Mines. Disponível em http://www.nrw.qld.gov.au/water/use/pdf/tangible_flood_damages.pdf.

RAFAELI NETO, S. L., 2000, *Um modelo conceitual de sistema de apoio à decisão espacial para gestão de desastres por inundação*. Tese de D.Sc., Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

RICHARDS, D. J., ALLENBY, B. R., COMPTON, W. D. (eds), 2001, *Information systems and the environment*. Washington, National Academy Press.

RICHARDSON, D. S., 2000, "Skill and relative economic value of the ECMWF ensemble prediction system", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 126, n. 563 (Jan), p. 649, Part B.

RICHARDSON, D. S., 2001, "Measures of skill and value of ensemble prediction systems, their interrelationship and the effect of ensemble size", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 127, n. 577 (Oct), p. 2473, Part A.

ROSS, T. J., 1995, *Fuzzy logic with engineering applications*. New York, McGraw-Hill.

ROULSTON, M. S., SMITH, L. A., 2004, "The boy who cried wolf revisited: the impact of false alarm intolerance on cost-loss scenarios", *Weather and Forecasting*, v. 19, n. 2 (Apr), pp. 391-397.

SANTOS, T. C., CÂMARA, J. B. (orgs), 2002, *GEO Brasil 2002: perspectivas do meio ambiente no Brasil*. Brasília, Edições IBAMA.

SAYÃO, L. F., 2001, "Modelos teóricos em ciência da informação: abstração e método científico", *Ci. Inf.*, v. 30, n. 1 (Jan-Abr), pp. 82-91.

SHAPIRO C., VARIAN H. R., 2003, "The information economy". In: Hand, J., Lev, B. (eds), *Intangibles assets: values, measures and risks*, New York, Oxford University Press, pp. 48-62.

SIMON, H. A., 1977, *The new science of management decision*. Upper Saddle River, USA, Prentice Hall.

STERMAN, J. D., 2000, *Business dynamics: system thinking and modeling for a complex world*. New York, McGraw-Hill Higher Education.

STEWART, T. R., 1997a, "Forecast value: descriptive decision studies". In: Katz, R. W., Murphy, A. H., *Economic value of weather and climate forecasts*, chapter 5, Cambridge, Cambridge University Press.

STEWART, T. R., 1997b, "Descriptive decision studies of the societal impact of weather and climate information". In: *Workshop on the social and economic impacts of weather proceedings*, Boulder, USA, USWRP. Disponível em <http://sciencepolicy.colorado.edu/socasp/weather1/stewart.html>.

- STEWART, T. R., PIELKE JR., R., NATH, R., 2004, "Understanding user decision making and the value of improved precipitation forecasts: lessons from a case study", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, n. 2 (Feb), pp. 223-235.
- STUART, A., 1982, "On the economic value of probability of precipitation forecasts in Canada", *Journal of Applied Meteorology*, v. 21, n. 4 (Apr), pp. 495-497.
- TAY, A. S., WALLIS, K. F., 2000, "Density forecasting: a survey", *Journal of Forecasting*, v. 19, n. 4 (Jul), pp. 235-254.
- TEEGAVARAPU, R. S., SIMONOVIC, S. P., 1999, "Modeling uncertainty in reservoir loss functions using fuzzy sets", *Water Resources Research*, v. 35, n. 9 (Sep), pp. 2815-2823.
- THICKEN, A. H., MÜLLER, M., MERZ, H. K., 2005, "Flood damage and influencing factors: new insights from the August 2002 flood in Germany", *Water Resources Research*, v. 41, Dec, W12430.
- THOMPSON, M. L., ZUCCHINI, W., 1990, "Assessing the value of probability forecasts", *Monthly Weather Review*, v. 118, n. 12 (Dec), pp. 2696-2706.
- THORNGATE, W., 1995, "Measuring the effects of information on development". In: McConnell, P. (editor), *Making a difference: measuring the impact of information on development*, Ottawa, Canada, IDRC.
- TUCCI, C. E., 2005, *Gestão das inundações urbanas*, Global Water Partnership South América, Unesco.
- TUCCI, C. E., VILLANUEVA, A. O., 1997, *Controle de enchentes das cidades de União da Vitória e Porto União*, Comissão Regional Permanente de Prevenção contra Enchentes do Rio Iguaçu, CORPRERI.
- UPTON JR., W. S., 2001, *Special report: business and financial reporting, challenges from the new economy*. Norwalk, Financial Accounting Standards Board.
- USWRP, 1997, "Executive summary". *Workshop on the Social and Economic Impact of Weather*, Boulder, USA. April.
- VILJOEN, M. F., PLESSIS, L. A., BOOYSEN, H. J., 2001, "Extending flood damage assessment methodology to include sociological and environmental dimensions", *Water SA*, v. 27, n. 4 (Oct), pp. 517-521.
- WILKS, D. S., 1995, *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego, California, Academic Press.
- WIND, H. G., NIEROP, T. M., BLOIS, C. J., *et al.*, 1999, "Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods", *Water Resources Research*, v. 35, n. 11 (Nov), pp. 3459-3465.
- WMO, 1990a, *Economic and social benefits of meteorological and hydrological services: proceedings of the technical conference*, WMO n. 733, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- WMO, 1990b, *Cost-benefit assessment techniques and user requirements for hydrological data*, WMO n. 717, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

WMO, 2006, *Strategy and action plan for the enhancement of cooperation between national meteorological and hydrological services for improved flood forecasting*, Flood Forecasting Initiative, World Meteorological Organization. Disponível em <http://www.wmo.ch/pages/prog/hwrp/documents/FFInitiativePlan.pdf>.

WMO, 2007a, *Elements for life*. Geneva, Switzerland, Tudor Rose.

WMO, 2007b, "WMO statement on the scientific basis for, and limitations of weather and climate forecasting". In; WMO, 2007, *Elements for life*, Annexe 7, Geneva, Switzerland, Tudor Rose.

YEVJEVICH, V., 1974, "Determinism and stochasticity in hydrology", *Journal of Hydrology*, v. 22, pp. 225-237.

ZHU, Y., TOTH, Z., WOBUS, R., *et al.*, 2002, "The economic value of ensemble-based weather forecasts", *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, n. 1 (Jan), pp. 73-83.

ANEXO A

**MODELAGEM DE TIPOS DE PROBLEMAS DE VALOR DA INFORMAÇÃO POR
MEIO DA ABORDAGEM DINÂMICA DE SISTEMAS**

A.1 Modelo razão custo / perda

O primeiro tipo de problema modelado foi o clássico razão custo / perda, utilizando-se uma variável hidrometeorológica binária, representativa da ocorrência ou não de um evento de tempo, clima ou recursos hídricos. A representação esquemática dessa implementação realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM pode ser visualizada na Figura A.1. Cabe realçar que nesse tipo de modelo, cada variável, seja ela estoque, fluxo ou auxiliar, é definida por uma equação matemática (ou lógica), cujos argumentos são as suas variáveis causais (aquelas de onde as setas são originadas).

No esquema da Figura A.1, são identificados em amarelo os parâmetros do modelo: probabilidade climatológica do evento ($p=P[evento=1]$), utilizado na simulação da ocorrência do evento hidrometeorológico, representa a chance de sua ocorrência em cada unidade de tempo; probabilidade de detecção ($POD=P[previsão=1|evento=1]$) e probabilidade de falsa detecção ($POFD=P[previsão=1|evento=0]$), os quais determinam a qualidade do sistema de previsão; e os valores de custo e perda, que caracterizam o PTD.

A partir da atribuição de valores aos parâmetros do modelo, é possível simular o comportamento temporal de todas as variáveis, em especial o valor da informação VF , valor da informação perfeita VP e valor relativo da informação VR , medido em porcentagem do valor da informação perfeita ($VR=VF*100/VP$). A escolha da unidade de tempo deve ser compatível com os processos de simulação do evento, das previsões e da tomada de decisão. Considerou-se a Perda = 1, o que leva os resultados do valor da informação a corresponderem aos valores médios, computados

em unidades de perda por unidade de tempo. A Figura A.2 mostra o resultado de simulação para um caso hipotético de valores dos parâmetros: $p=0,3$; $POD=0,9$; $POFD=0,1$; e $Custo / Perda=0,2$.

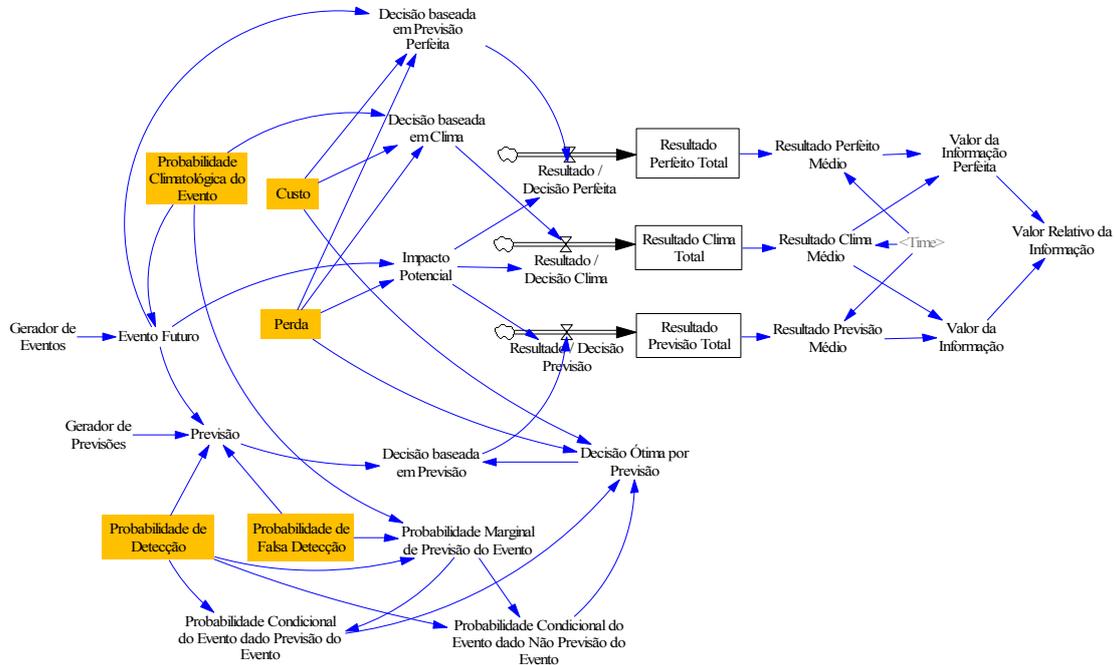


Figura A.1: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda

A Figura A.2 mostra a evolução nas 10.000 primeiras unidades de tempo do valor da informação e valor da informação perfeita, simuladas e teóricas, as últimas calculadas conforme expressão desenvolvida por MURPHY e EHRENDORFER (1987), apresentada no item 5.1. Os valores finais foram muito próximos para essa realização do processo de simulação: VF simulado=0,101; VF teórico=0,102; VP simulado=0,14; VP teórico=0,1398 up/ut. O valor relativo da informação VR , simulado ao final das 10.000 unidades de tempo, foi de 72,28 %. Isto significa, por exemplo, que se o PTD analisado refere-se ao alerta de tempestades severas para um centro de distribuição de energia, no qual as perdas evitáveis por evento são da ordem de R\$ 10.000,00, por exemplo, em redução do período de desligamento, o centro está sujeito a uma chance de 30 % de ocorrência do evento por dia, e o custo para evitá-las, por exemplo, com horas extras do pessoal alertado, da ordem de R\$ 2.000,00, o valor da informação de um sistema de previsão com as características de POD e $POFD$ acima é da ordem de R\$ 1.000,00 por dia.

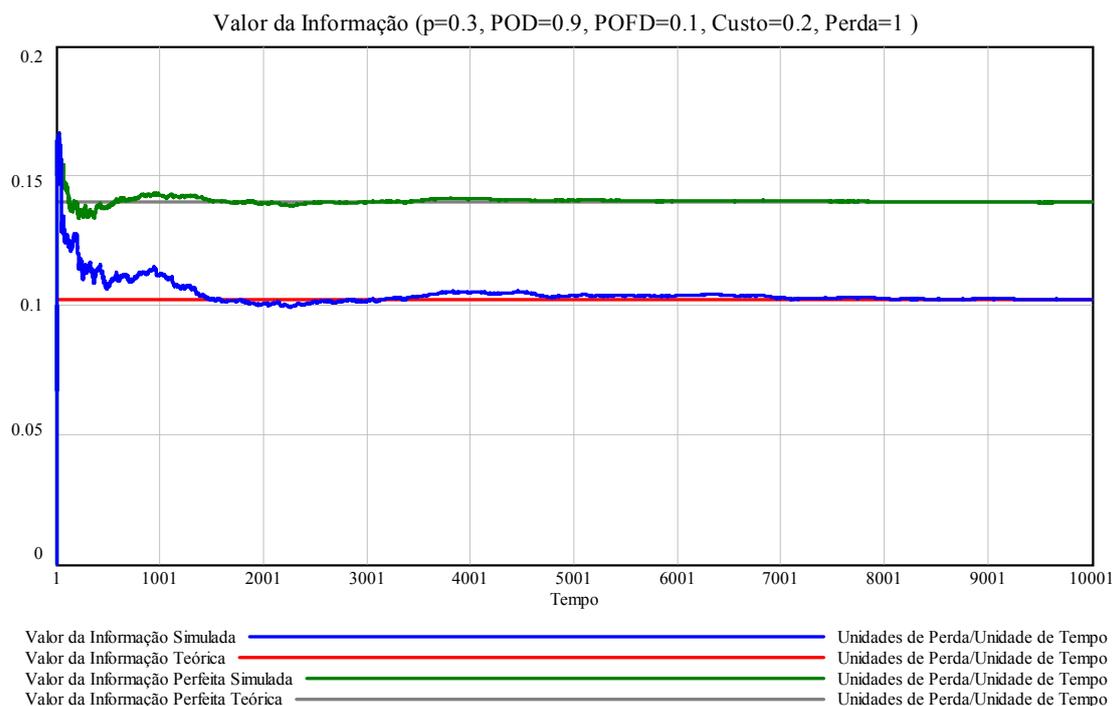


Figura A.2: Resultado de simulação do modelo razão custo / perda

O mérito da simulação do modelo razão custo/perda não advém do cálculo do valor da informação para um simples caso, que afinal possui solução determinística, mas das análises de sensibilidade que permite, da inclusão de perturbações subjetivas e, conforme comentado, da facilidade de comunicação sobre a dinâmica do problema com o usuário da informação.

Uma primeira análise de sensibilidade realizada foi da convergência do valor da informação com respeito a diferentes realizações do processo de simulação. Foram realizadas 120 simulações com diferentes combinações de seqüências de eventos e previsões e o resultado pode ser visualizado na Figura A.3.

Essa análise é realizada para verificar a velocidade de convergência da variável simulada ao seu valor teórico, o que permite avaliar não só o tamanho adequado do período de tempo que deve ser simulado, como também traduzir uma idéia da distribuição das potenciais evoluções de realização do valor da informação a partir do início de um serviço de informação hidrometeorológica. Para o caso analisado, para um valor teórico de 0,102, o valor da informação simulado variou: de 0,0821 a 0,1165 (média de $0,0995 \pm 0,0067$ up/ut) para o tempo de 1.000; de 0,0979 a 0,1051 (média de $0,1016 \pm 0,0013$ up/ut) para o tempo de 10.000; e 0,1010 a 0,1028 (média de $0,1020 \pm 0,0004$ up/ut) para o tempo de 100.000. De forma geral, considerando-se as incertezas envolvidas, a média dos valores simulados já era próxima ao valor teórico

no tempo de 1.000, mas foi adotado como período de tempo de simulação adequado 10.000 ut.

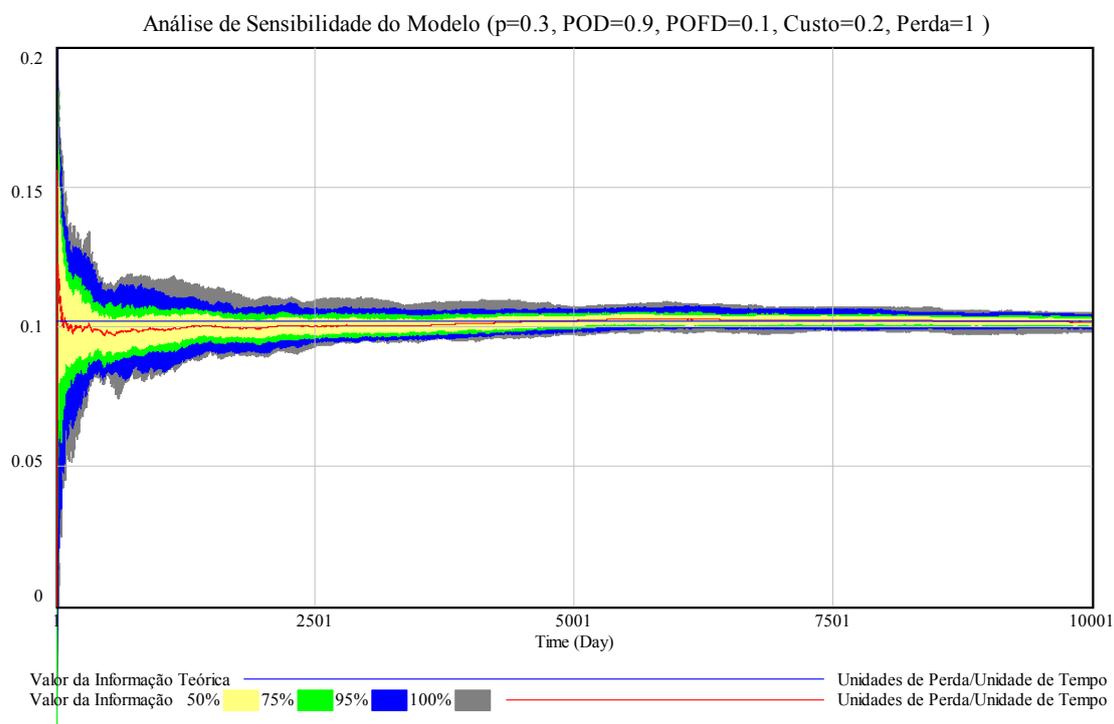


Figura A.3: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto a múltiplas realizações de simulação de eventos e previsões

Uma segunda análise de sensibilidade possível é aquela em relação ao custo (ou razão custo / perda, quando perda=1). Os resultados dessa análise são mostrados na Figura A.4. Conforme se pode observar, existe um único valor máximo do valor da informação, que ocorre quando a razão custo / perda = probabilidade climatológica da ocorrência do evento = 0,3 e seu valor torna-se nulo para valores extremos da razão custo / perda, nesse caso, menores que aproximadamente 0,04 ou maiores que aproximadamente 0,7. É possível demonstrar que esses valores limites correspondem às probabilidades condicionais da ocorrência do evento, dado as previsões, cujos valores teóricos são $p_{11}=0,7941$ e $p_{10}=0,0454$, derivados das seguintes equações:

$$p_{11} = P[\text{evento} = 1 | \text{previsão} = 1] = pPOD / (pPOD + POFD - pPOFD) \quad (A.1a)$$

$$p_{10} = P[\text{evento} = 1 | \text{previsão} = 0] = (p - pPOD) / (1 - pPOD - POFD + pPOFD) \quad (A.1b)$$

e o valor máximo da informação $VF=0,168$ é derivado da expressão:

$$VF = \pi_0(p - p_{10})L \quad (A.2)$$

onde $\pi_0 = P[\text{previsão} = 0]$. O valor da informação perfeita segue padrão similar ao da informação imperfeita, mas seu valor só se anula nos casos de custo=0 ou custo=perda=1. O valor relativo da informação também apresenta máximo coincidente com os demais, mas comportamento não linear em relação ao custo.

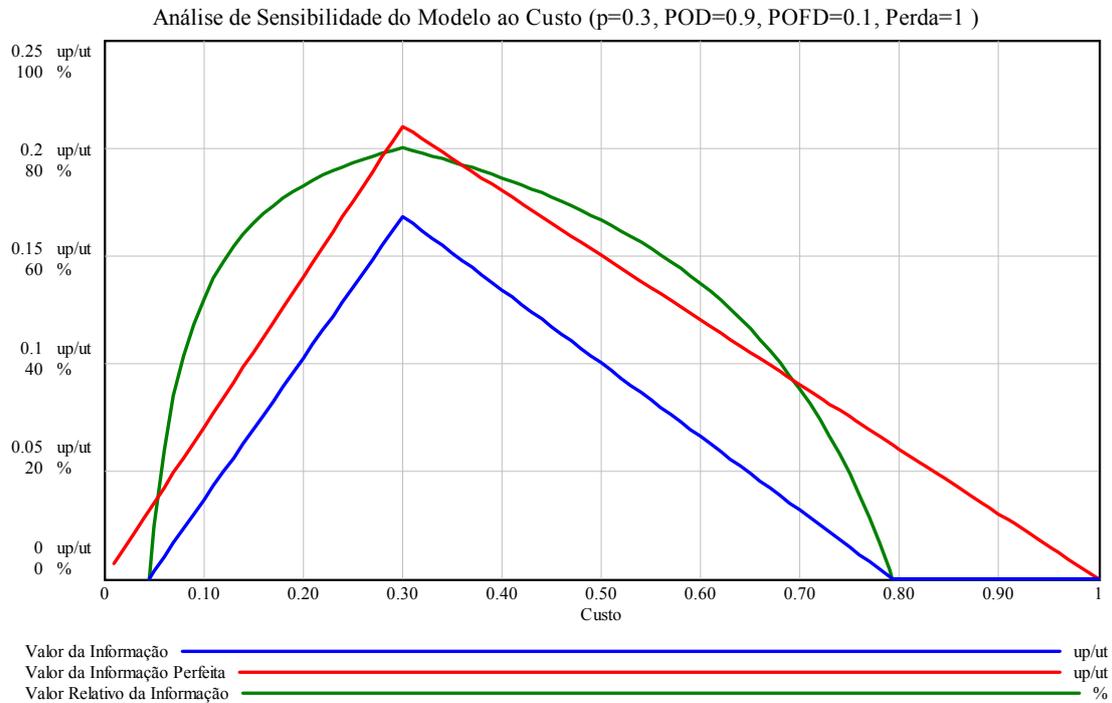


Figura A.4: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à variação no custo

É também interessante analisar a sensibilidade do valor da informação em relação à probabilidade climatológica de ocorrência do evento p . Os resultados dessa análise são mostrados na Figura A.5. Conforme se pode observar, existe também um único valor máximo do valor da informação, que ocorre quando a probabilidade climatológica é igual à razão custo/perda = 0,2 e seu valor torna-se nulo para valores extremos de probabilidade, nesse caso, menores que aproximadamente 0,02 ou maiores a aproximadamente 0,69. Esses limites teóricos da probabilidade climatológica do evento assumem os valores de $p=0,027$ e $p=0,6923$, sendo derivados da seguinte igualdade, que torna nulo o valor da informação:

$$\min(C/L, p) - (pPOD + POFD - pPOFD) \min[C/L, pPOD / (pPOD + POFD - pPOFD)] - (1 - pPOD - POFD + pPOFD) \min[C/L, (p - pPOD) / (1 - pPOD - POFD + pPOFD)] = 0 \quad (A.3)$$

para o caso de $p \leq C/L$, tem-se que:

$$p = \frac{POFDC/L}{POD + POFDC/L - PODC/L} \quad (A.4a)$$

para o caso de $p > C/L$:

$$p = \frac{POFDC/L - C/L}{POD + POFDC/L - PODC/L - 1} \quad (A.4b)$$

Como no caso anterior, o valor da informação imperfeita, o valor da informação perfeita e o seu valor relativo apresentam máximos coincidentes, sendo que o último apresenta comportamento não linear em relação à probabilidade climatológica do evento. O valor teórico máximo da informação nesse caso assume o valor de $VF=0,128$, fruto da seguinte expressão:

$$VF = C[POD - POFD + C/L(POFD - POD)] \quad (A.5)$$

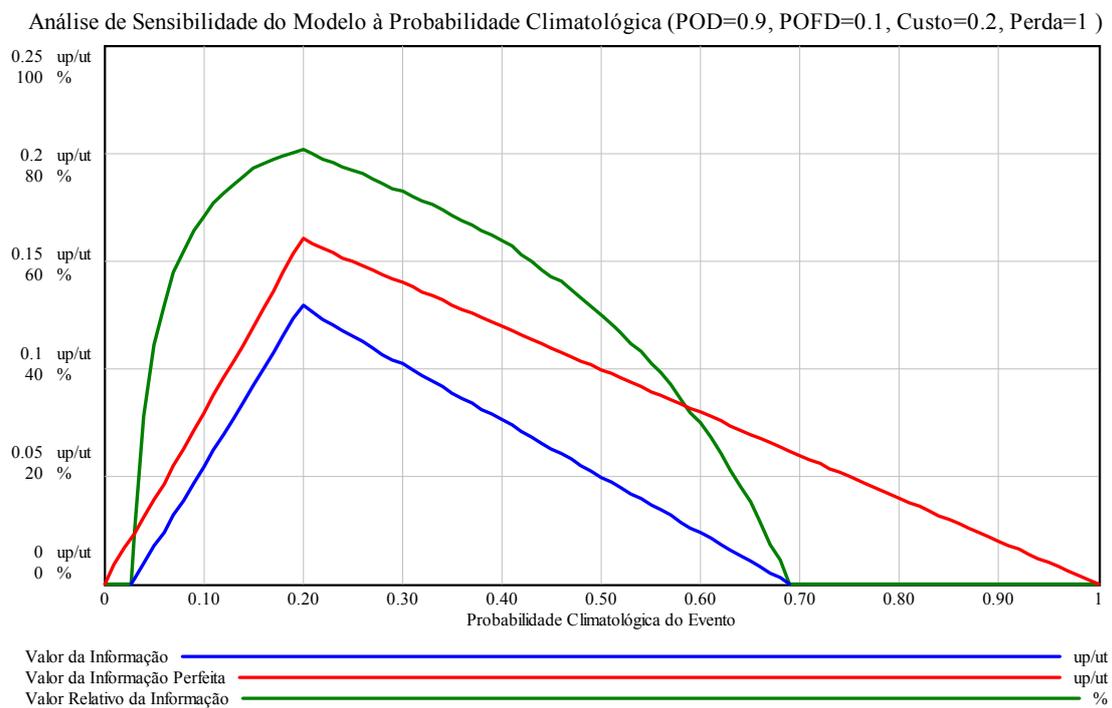


Figura A.5: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à variação na probabilidade climatológica do evento

Os resultados da análise conjunta do valor da informação em relação a esses dois parâmetros, custo (ou razão custo / perda) e probabilidade climatológica do evento são apresentados na Figura A.6. Conforme se pode observar na Figura A.6, é possível reconhecer uma região de valor da informação nulo (em branco) e outra de valor não nulo (em cores). A região de valor nulo está associada a altas razões de custo / perdas e baixas probabilidades climatológicas do evento, quando a decisão ótima é nunca empreender ação de proteção, ou a baixas razões de custo / perdas e altas probabilidades climatológicas do evento, quando a decisão ótima é sempre empreender ação de proteção, independentemente da previsão. Na região de valor não nulo, observa-se uma fase de crescimento e depois de decréscimo do valor da

informação, quando se varia, de forma crescente, somente um dos parâmetros. Conforme já apresentado, essas fases de crescimento e decréscimo são lineares e o máximo é obtido quando a razão custo / perda se iguala à probabilidade climatológica do evento.

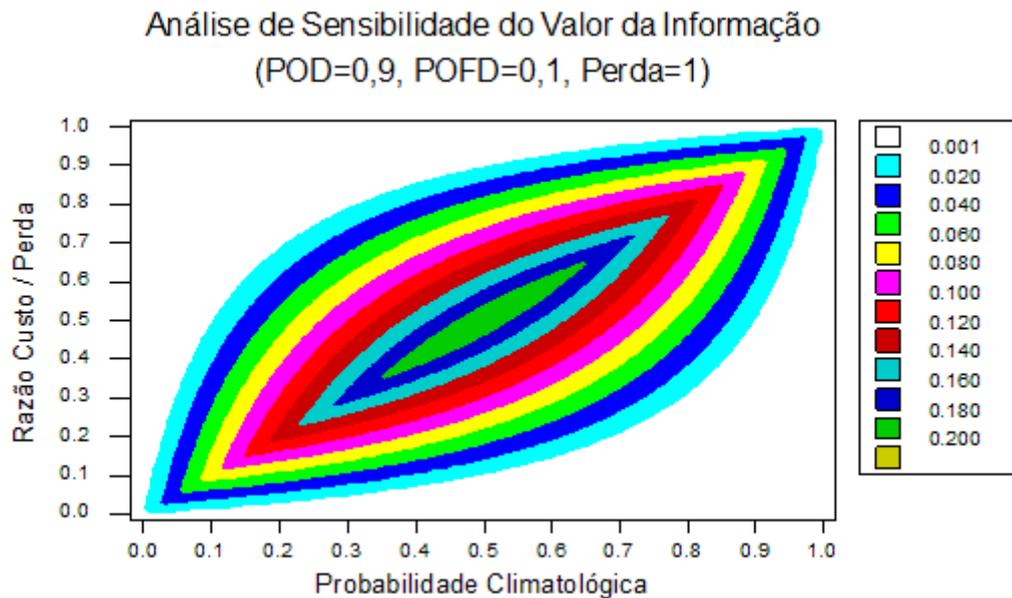


Figura A.6: Análise conjunta de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à probabilidade climatológica do evento e ao custo (ou razão custo / perda)

Outra análise de sensibilidade possível de ser realizada é aquela com respeito à qualidade do sistema de previsão. Nesse sentido, várias abordagens são possíveis, principalmente reconhecendo que, no caso geral, qualidade é um conceito que não pode ser completamente determinado através de uma única medida, pois apresenta caráter multidimensional. Assim, inicialmente, conforme os trabalhos de KATZ e MURPHY (1997b) apresentados no item 5.1, optou-se por submeter o sistema à condição de confiabilidade geral (*overall reliability*), onde $\pi_1=p$, $\pi_0=1-p$ e $p_{10}=(1-p_{11})p/(1-p)$ e a definir uma medida de qualidade da forma $q=(p_{11}-p)/(1-p)$. Os resultados dessa análise para a condição de $q \geq 0$ ($p_{11} \geq p$) são mostrados na Figura A.7, onde se pode verificar, para cada valor da razão custo / perda, a existência de um limite de qualidade abaixo do qual o valor da informação é nulo, bem como um crescimento linear após esse limite, o que configura uma forma convexa para a curva de valor. Nota-se também um comportamento não uniforme desse valor limite de qualidade conforme se varia o valor da razão custo / perda: para valores de $C/L \geq p = 0,3$, existe uma relação direta da razão custo / perdas com o valor limite de qualidade; para valores de $C/L < p = 0,3$, existe uma relação inversa. Esse fato é derivado da

expressão de cálculo do valor limite de qualidade, que para o primeiro caso, conforme análise de KATZ e MURPHY (1997b), assume a forma de $q^* = (C/L - p)/(1 - p)$. É possível demonstrar que, para o caso $p > C/L$, o valor da informação e o valor limite da qualidade podem ser assim calculados:

$$VF(q) = \begin{cases} (1-p)[C - pL(1-q)] & \text{para } q^* < q \leq 1 \\ 0 & \text{para } q \leq q^* \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

onde

$$q = (p_{11} - p)/(1 - p)$$

$$q^* = (p - C/L)/p$$

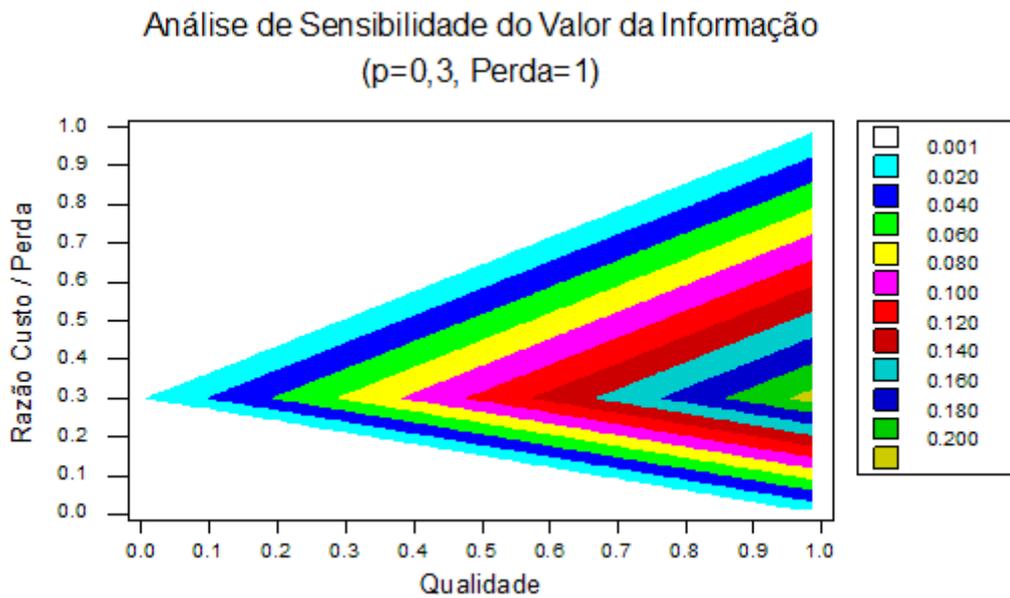


Figura A.7: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à qualidade do sistema de previsão (condição de confiabilidade geral)

Na seqüência da análise de sensibilidade do modelo em relação à qualidade da previsão, procedeu-se à investigação de um caso mais geral, no qual se permitiu a variação independente da probabilidade de detecção e da probabilidade de falsa detecção e, conforme as pesquisas de MURPHY e EHRENDORFER (1987), utilizou-se como medida de acurácia o índice esperado de Brier, assim definido:

$$BS = p(1 - p) - [\pi/(1 - \pi)](p_{11} - p)^2 \quad (\text{A.7})$$

onde:

- BS - índice esperado parcial de Brier;
- p - probabilidade climatológica do evento;
- π - probabilidade marginal de previsão do evento; e
- p_{11} - probabilidade condicional do evento, dado a previsão do evento.

O resultado dessa análise é apresentado na Figura A.8, na qual se observa a existência de uma região envelope que caracteriza uma relação multivalor em ambos os sentidos. Os resultados dessa análise são compatíveis com as pesquisas de MURPHY e EHRENDORFER (1987).

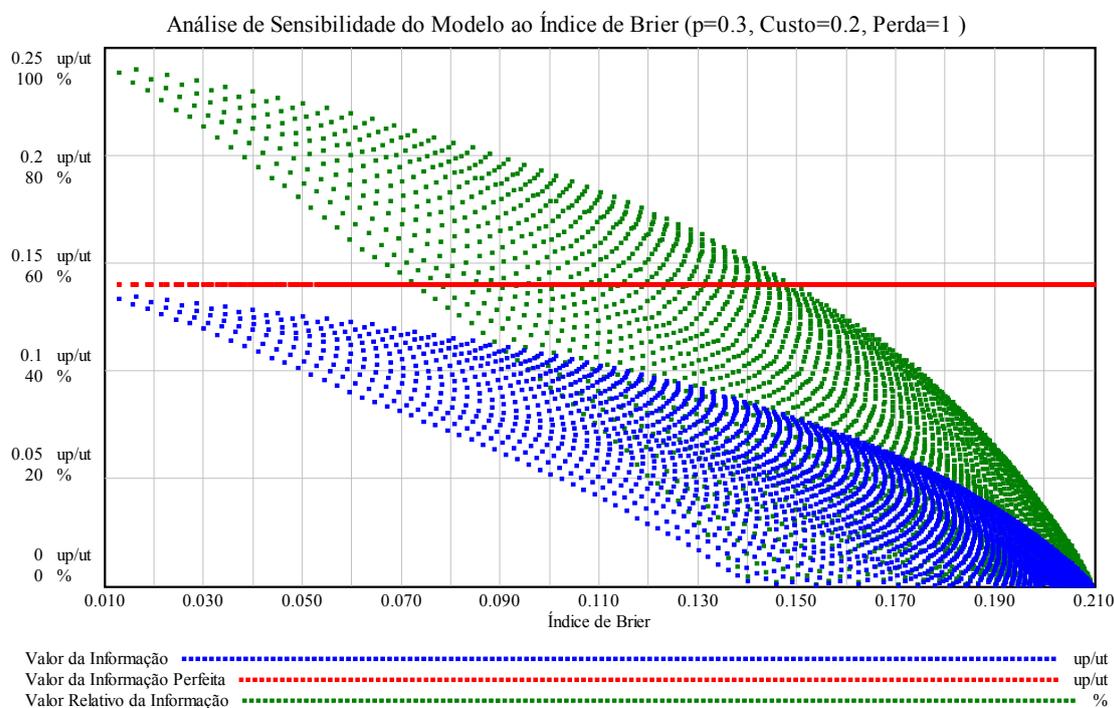


Figura A.8: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à qualidade do sistema de previsão, mensurada através do índice de Brier

Um instrumento de análise das oportunidades de melhoria do processo de geração das informações que se desenvolveu foi a constituição da chamada matriz de defasagem em relação à informação perfeita, Δ , que é determinada a partir da decomposição da diferença entre os valores da informação perfeita e imperfeita, em relação a cada par previsão – estado que lhe deu origem. A matriz de defasagem pode ser obtida pela multiplicação de cada elemento da matriz de probabilidade conjunta pelo elemento correspondente da matriz de diferença marginal dos resultados, DM . Essa última matriz tem seus elementos obtidos pela diferença entre a aplicação da decisão ótima associada à previsão sobre determinado estado e o resultado ótimo associado a esse estado. A decisão ótima associada à determinada previsão é aquela que minimiza o resultado esperado condicionado à ocorrência dessa previsão.

Assim, para o modelo razão custo / perda, no qual $0 < C < L$ e $p_{10} = P[\text{evento} = 1 | \text{previsão} = 0] < p_{11} = P[\text{evento} = 1 | \text{previsão} = 1]$, sob a condição de $p_{10} \leq C/L \leq p_{11}$, onde as decisões ótimas associadas às previsões são iguais às

decisões ótimas dos estados correspondentes, ou seja, a decisão ótima é tomar ação preventiva somente quando da previsão de evento, tem-se:

$$\mathbf{DM} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ L-C & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8a})$$

$$\Delta_{kj} = pc_{kj} DM_{kj} \quad (\text{A.8b})$$

$$D = VP - VF = EF - EP = \sum_k \sum_j \Delta_{kj} = pc_{10}C + pc_{01}(L - C) \quad (\text{A.8c})$$

$$\Delta \mathbf{R} = \frac{100}{D} \Delta \quad (\text{A.8d})$$

onde:

- DM** - matriz de diferenças marginais de resultados, onde cada elemento DM_{kj} relaciona uma previsão $k=1,0$ com o estado de ocorrência ou não do evento $j=1,0$;
- Δ** - matriz de defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita;
- $\Delta \mathbf{R}$** - matriz de defasagem relativa do valor da informação em relação à informação perfeita;
- pc_{kj} - probabilidade conjunta da previsão k e do estado de ocorrência do evento j ; e
- D** - diferença entre os valores da informação perfeita e da informação imperfeita.

Nos casos extremos, onde $C/L < p_{10}$ ou $C/L > p_{11}$, correspondentes respectivamente às decisões ótimas de sempre tomar ação preventiva ou nunca tomá-la, independentemente das previsões, as matrizes de defasagem são calculadas de forma similar e as de diferenças marginais de resultado assumem os seguintes valores:

$$\mathbf{DM} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & C \end{bmatrix} \quad \text{para } C/L < p_{10} \quad (\text{A.9a})$$

e

$$\mathbf{DM} = \begin{bmatrix} L-C & 0 \\ L-C & 0 \end{bmatrix} \quad \text{para } C/L > p_{11} \quad (\text{A.9b})$$

Para o caso simulado, $p_{10} \leq C/L \leq p_{11}$, $D=0,038 \text{ up/ut}$ e as matrizes de diferenças marginais de resultado **DM**, de probabilidades conjuntas **pc** e de defasagem **Δ** e **$\Delta \mathbf{R}$** , calculadas na implementação do modelo, assumem os valores:

$$\mathbf{DM} = \begin{bmatrix} 0 & 0,2 \\ 0,8 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{pc} = \begin{bmatrix} 0,27 & 0,07 \\ 0,03 & 0,63 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0,014 \\ 0,024 & 0 \end{bmatrix} \quad e \quad \Delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 36,8 \\ 63,2 & 0 \end{bmatrix}$$

A análise conjunta dessas matrizes pode orientar a busca de oportunidades de agregação de valor à informação. Ao avaliar a matriz de diferenças marginais de resultado, obtêm-se medidas potenciais de distanciamento do valor em relação à informação perfeita, para cada tipo de erro cometido. A estrutura atual de erros é dada pela matriz de probabilidades conjuntas. A aplicação dessa estrutura de erros sobre as diferenças marginais gera a defasagem do valor em relação à informação perfeita. A situação atual dessa defasagem, em termos absolutos (up/ut) ou relativos (%), é dada pelas matrizes de defasagem. Essas matrizes identificam as origens e contribuições relativas que compõem a defasagem e podem orientar intervenções no processo decisório, com mudanças em \mathbf{DM} , ou no sistema predictor, com alterações em \mathbf{pc} . No caso simulado, 63,2 % da defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita, correspondentes a 0,024 up/ut, advêm de erros de falta de alerta em situações de evento, enquanto que 36,8 %, correspondentes a 0,014 up/ut, advêm de erros de falso alerta em situações de não evento. Estratégias de redução do primeiro tipo de erro em relação ao segundo são mais eficazes, pois possuem diferença marginal de resultado maior (0,8 contra 0,2). Se, por exemplo, uma redução de 0,01 na probabilidade conjunta do primeiro tipo de erro for obtida via incremento de 0,03 na probabilidade conjunta do segundo tipo de erro, o resultado é satisfatório conforme refletido na nova matriz de defasagem, com $\Delta_{0I}=0,016$, $\Delta_{I0}=0,02$ e $D=0,036 < 0,037$.

A.2 Modelo razão custo / perda com incorporação de perturbações subjetivas

Essa linha de pesquisa visa determinar o valor descritivo da informação hidrometeorológica, em contraste com o valor normativo ou ótimo dos modelos prescritivos, a partir da incorporação de perturbações subjetivas ao modelo. Essas perturbações são modeladas com a inclusão de variáveis humanas e sociais, tais como confiança com respeito às informações, aprendizagem no uso da informação, memória quanto a sucessos e fracassos anteriores, tolerância a erros, propensões em evitar perdas futuras ou custos presentes, etc. Essa linha de pesquisa necessita incorporar resultados de estudos das ciências humanas e sociais, bem como pesquisas empíricas quanto ao comportamento do usuário frente às informações recebidas. Conforme comentado por STERMAN (2000) sobre a modelagem de PTDs, a estrutura de todos os modelos consiste de duas partes: suposições sobre o

ambiente físico e institucional de um lado e suposições sobre os processos decisórios dos agentes que operam essas estruturas de outro. Ele comenta sobre uma série de critérios para a modelagem de PTDs, a qual subsidia a incorporação da dimensão humana e a reprodução da realidade na qual esses sistemas operam.

Sobre a incorporação de perturbações subjetivas na modelagem do PTD, a pesquisa revelou a existência de muitos resultados qualitativos e uma carência de modelos quantitativos, viáveis de implementação imediata. Como exemplo do potencial de uso da abordagem Dinâmica de Sistemas no desenvolvimento desses modelos descritivos, foi incorporado ao modelo razão custo / perda duas características comumente não simultâneas do tomador de decisão, que afetam o resultado do PTD: propensão a evitar perdas futuras, *PEP*, medida pela probabilidade de tomar medidas de proteção quando não há previsão do evento; e a propensão a evitar custos presentes, *PEC*, medida pela probabilidade de não tomar medidas de proteção quando da previsão do evento. A primeira propensão pode ser motivada pela desconfiança quanto à capacidade de previsão do sistema de informações ou altas perdas associadas a eventos sem proteção; a segunda pode ser motivada pela alta taxa de falso alerta ou pressão por redução dos custos de proteção. Também foi considerado que o tomador de decisão desconsidera a estrutura de erros e acertos da previsão e, conseqüentemente, não avalia a priori as decisões ótimas por previsão recebida. Seu comportamento é o de tomar a melhor decisão para o valor de face da previsão, ou seja, para o estado indicado pela previsão, perturbado pelas propensões de evitar perdas ou custos. A representação esquemática dessa implementação realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM pode ser visualizada na Figura A.9.

Mantendo-se os parâmetros de geração de eventos, previsões e de custo e perda e simulando o modelo para duas situações hipotéticas: propensão a evitar perdas futuras, *PEP*=0,1 e propensão a evitar custos presentes, *PEC*=0,1, tem-se os resultados apresentados na Figura A.10.

Conforme se pode observar, considerando os parâmetros simulados, uma propensão a evitar perdas de 0,10, que gerou um acréscimo de aproximadamente 20 % no número de proteções, reduziu o valor da informação em aproximadamente 10 % (de 0,1010 para 0,0914 up/ut), enquanto que uma propensão a evitar custos de 0,10, que gerou uma redução de aproximadamente 10 % no número de proteções, reduziu o valor da informação em aproximadamente 20 % (de 0.1010 para 0.0804 up/ut).

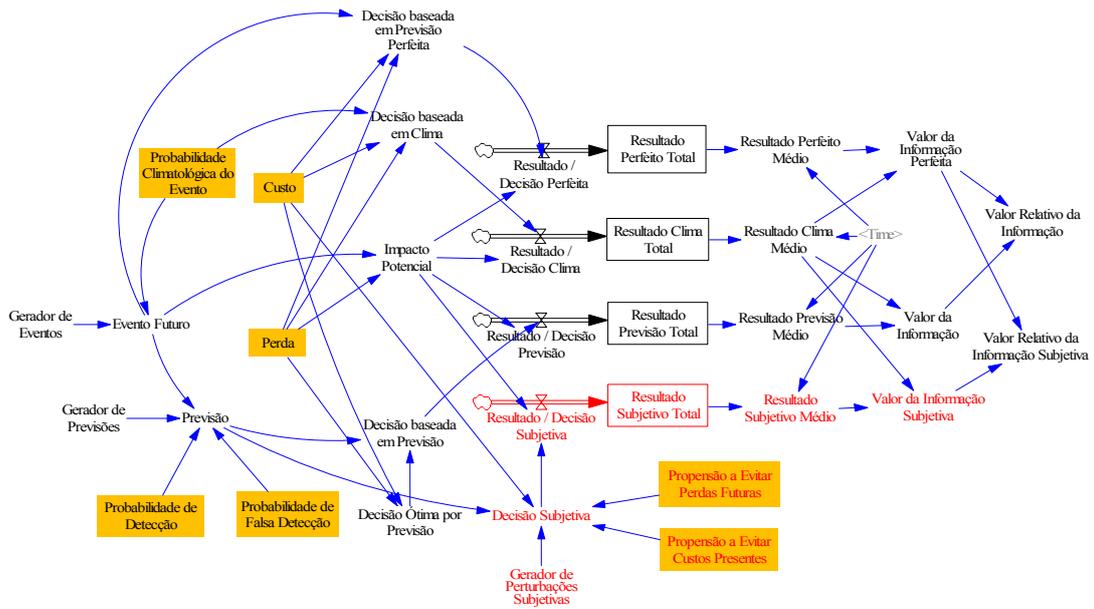


Figura A.9: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com a incorporação de perturbações subjetivas

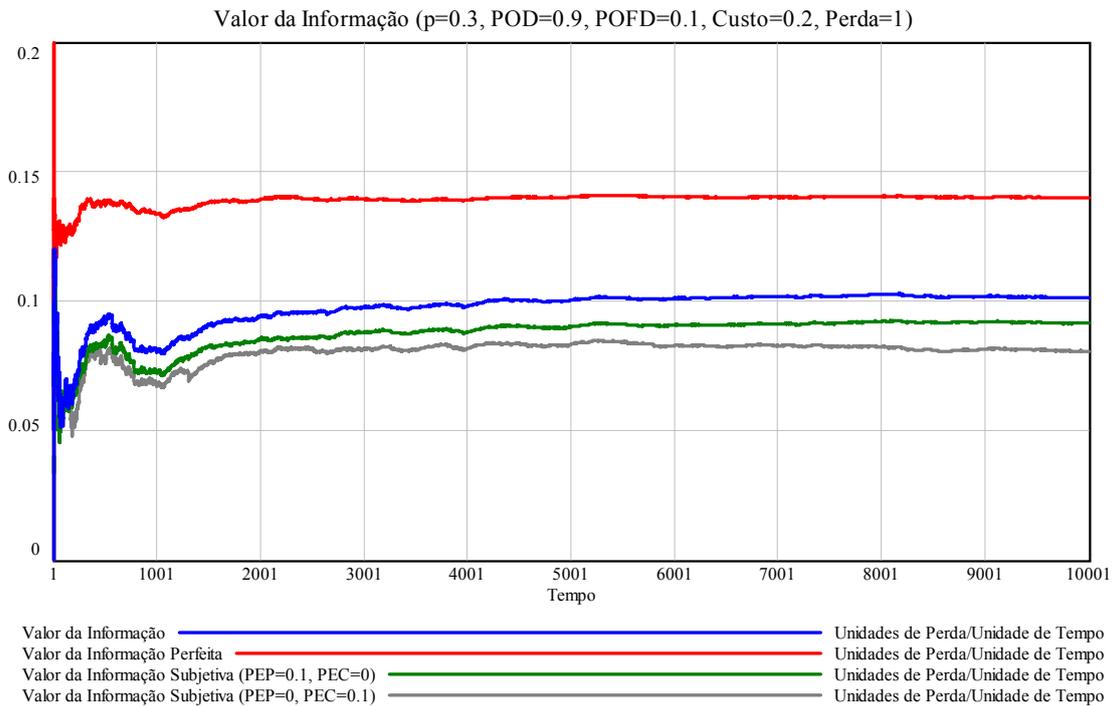


Figura A.10: Resultado da simulação do modelo razão custo / perda com incorporação de perturbações subjetivas

A análise de sensibilidade do valor da informação subjetiva quanto à propensão de evitar custos é apresentada na Figura A.11, que mostra casos de valores negativos e positivos e, para cada razão custo / perda, uma redução linear do valor da

informação subjetiva conforme se aumenta o valor de PEC . Esse comportamento não se sustenta para altos valores da razão custo / perda ($C/L > p_{11}$), onde a existência da propensão a reduzir custos evita decisões de proteção em uma região onde a decisão ótima devido à qualidade da previsão é nunca empreender ações de proteção.

A análise teórica do valor da informação, condicionada pela existência de PEP e PEC , permite a modificação da expressão de MURPHY e EHRENDORFER (1987) da seguinte maneira:

$$V\tilde{F} = \min(C, pL) - (\pi_1 C + \pi_0 p_{10} L) \quad (A.10a)$$

$$VS = V\tilde{F} + PEC\pi_1[C - p_{11}L] + PEP\pi_0[p_{10}L - C] \quad (A.10b)$$

onde:

- $V\tilde{F}$ - valor da informação com o uso direto do valor de face da previsão;
- VS - valor da informação subjetiva;
- PEC - propensão a evitar custos presentes; e
- PEP - propensão a evitar perdas futuras.

Análise de Sensibilidade do Valor da Informação Subjetiva
 ($p=0,3$, $POD=0,9$, $POFD=0,1$, $Perda=1$)

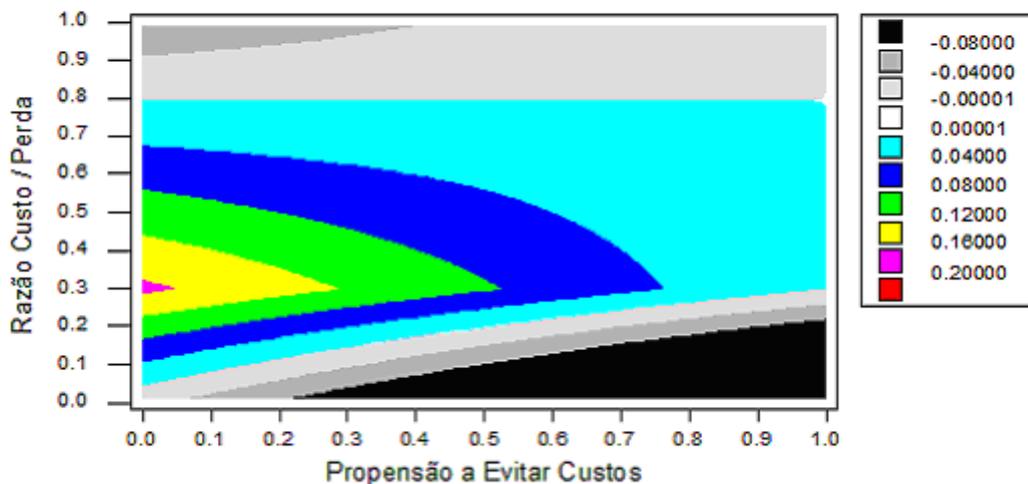


Figura A.11: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto à propensão do tomador de decisão em evitar custos presentes

A investigação da estratégia de sempre tomar a decisão de acordo com o valor de fase da previsão em um modelo decisório do tipo razão custo / perda, mesmo não se considerando a introdução das propensões a evitar custos ou perdas ($PEP=PEC=0$), mostra a possibilidade de introdução de valores negativos para a informação. É possível demonstrar que esse valor da informação $V\tilde{F}$ pode ser negativo nas

situações de $C/L < p_{10}$ e $C/L > p_{11}$, e é sempre menor ou igual ao valor da informação derivado da decisão bayesiana VF , se a informação de referência considerada é a climatológica.

A diferença entre os valores da informação $VF - \tilde{VF}$ traduz uma medida da perda de valor da informação pela falta de incorporação no PTD das incertezas das previsões, o que acontece quando o usuário não condiciona sua decisão à qualidade da previsão, que nesse modelo é representada pelos valores de POD e $POFD$. Uma análise de sensibilidade dessa diferença entre valores da informação, em relação a variações da razão custo / perda e da probabilidade climatológica do evento, é mostrada na Figura A.12. Essa análise mostra perdas crescentes em direção aos extremos, quando a razão custo / perdas é alta e a probabilidade climatológica do evento é baixa e vice-versa. A região central, na qual a razão custo / perdas está entre as probabilidades condicionais do evento, dado as previsões, os valores da informação VF e \tilde{VF} se igualam e não existe perda de valor pela falta de incorporação das incertezas da previsão no PTD.

Análise de Sensibilidade da Diferença entre os Valores da Informação
($POD=0,9$, $POFD=0,1$, $Perda=1$)

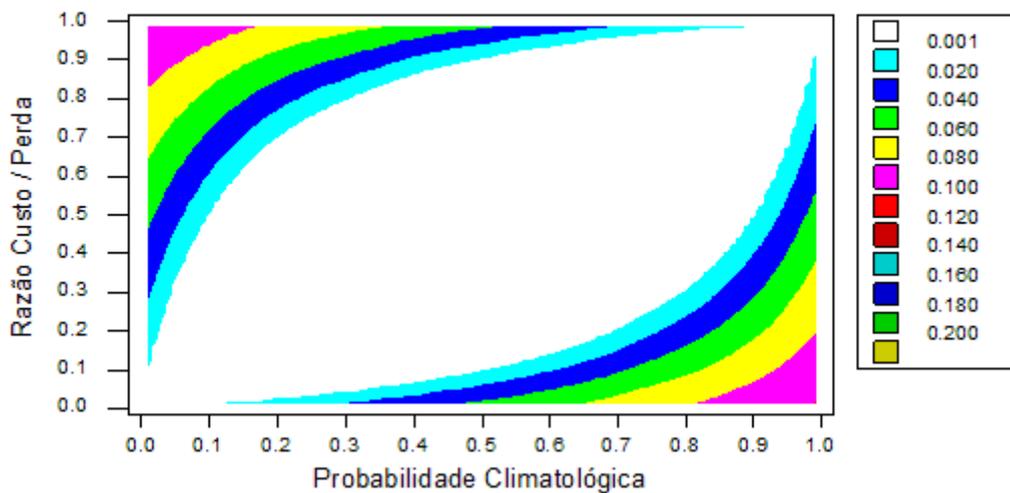


Figura A.12: Análise de sensibilidade da diferença entre os valores de informação derivados da decisão bayesiana e do uso do valor de face das previsões, quanto à probabilidade climatológica do evento e ao custo (ou razão custo / perda)

Apesar da carência de modelos teóricos descritivos quantitativos para estimativa do valor da informação, outras perturbações subjetivas são sugeridas para implementação, como o uso de probabilidades subjetivas dinâmicas de tomada de decisão, corrigidas conforme o desempenho do sistema, modelos de representação da

confiança, intolerância a falhas de previsão e modelagem de processos decisórios sujeitos a metas dinâmicas, conforme trabalhos de CECEZ-KECMANOVIC (1983), ROULSTON e SMITH (2004), DOSWELL III (2004) e STERMAN (2000).

A.3 Modelo razão custo / perda com incorporação de variáveis *fuzzy*

O desafio na utilização dos modelos de valor da informação baseados na teoria de decisão encontra-se comumente na estimativa dos parâmetros de custo e perda, que possam ser atribuídos aos PTDs sensíveis à informação hidrometeorológica. A incerteza envolvida na estimativa desses parâmetros é grande e essa incerteza normalmente tem origem na carência de dados e informações a respeito do problema. Como forma de incorporar essas incertezas no modelo razão custo / perda, foi desenvolvida uma implementação desse modelo que considera os parâmetros de custo e perda como variáveis *fuzzy*, sendo descritas através de uma função de pertinência normal e convexa sobre o conjunto dos números reais. Esse procedimento abre a possibilidade de uso de diversos métodos para a atribuição de valores a esses parâmetros *fuzzy*, conforme discussão realizada por ROSS (1995). A representação esquemática dessa implementação realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM pode ser visualizada na Figura A.13.

Na incorporação de variáveis *fuzzy*, o modelo é simulado extensivamente através da combinação de múltiplos valores de custo e perda, cuja pertinência resultante é calculada por meio do princípio de extensão de Zadeh, apresentado em ROSS (1995), que em sua forma discreta pode ser assim definido:

$$\underline{B} = f(\underline{A}_1, \underline{A}_2, \dots, \underline{A}_n) \quad (\text{A.11a})$$

$$\mu_{\underline{B}}(y) = \max_{y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \{ \min[\mu_{\underline{A}_1}(x_1), \mu_{\underline{A}_2}(x_2), \dots, \mu_{\underline{A}_n}(x_n)] \} \quad (\text{A.11b})$$

onde:

- $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \dots, \underline{A}_n$ - conjuntos *fuzzy* definidos no universo X_1, X_2, \dots, X_n ;
- \underline{B} - conjunto *fuzzy* imagem do mapeamento f em $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \dots, \underline{A}_n$;
- $\mu_{\underline{B}}(y)$ - função pertinência do conjunto *fuzzy* \underline{B} ; e
- $\mu_{\underline{A}_i}(x_i)$ - função pertinência dos conjuntos *fuzzy* $\underline{A}_1, \underline{A}_2, \dots, \underline{A}_n$.

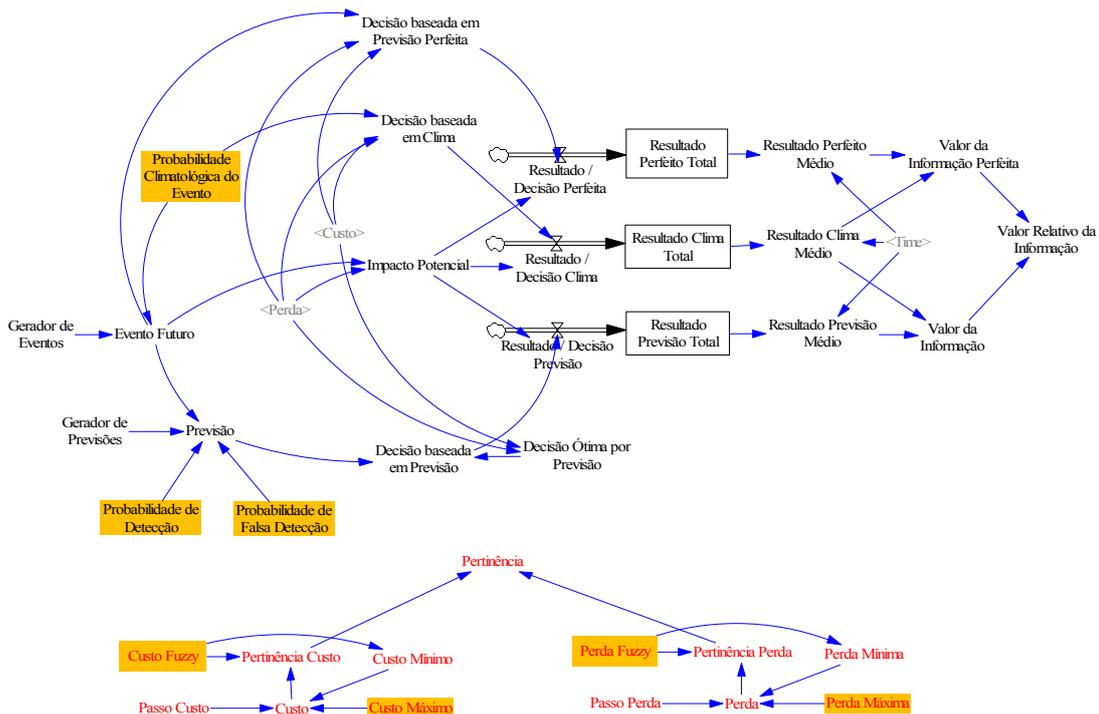


Figura A.13: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com a incorporação de variáveis fuzzy

Os resultados da simulação de três casos hipotéticos são mostrados na Figura A.14, nos quais foram consideradas as seguintes condições: Caso A, custo=0,2, perda fuzzy triangular variando de 0,4 a 1,6; Caso B, custo fuzzy trapezoidal variando de 0,1 a 0,3, perda=1; e Caso C, ambos considerados como conjuntos fuzzy. Os três casos simulados mantiveram simetria em relação aos valores iniciais: custo=0,2 e perda=1.

Além das funções resultantes de pertinência do valor da informação e do valor relativo da informação, são calculados os valores mais representativos dessas funções através de um método de conversão de conjuntos fuzzy para valores reais (*defuzzification method*), conhecido por centróide, conforme apresentado em ROSS (1995). Esse método, considerado o mais usual e de apelo físico, calcula o centro de área ou centro de gravidade da função de pertinência, conforme a seguinte expressão algébrica:

$$z^* = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_A(z) z dz}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_A(z) dz} \quad (A.12)$$

onde z^* é o valor representativo da função de pertinência $\mu_A(z)$.

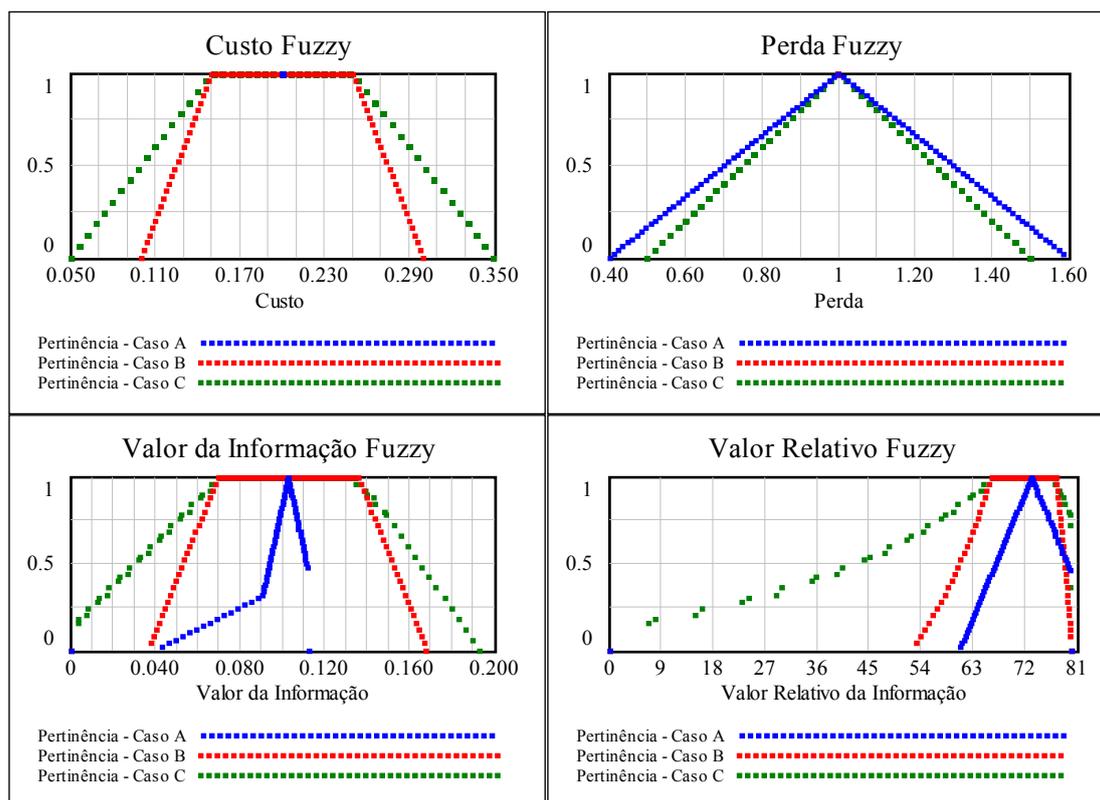


Figura A.14: Resultado da simulação do modelo razão custo / perda com incorporação de variáveis *fuzzy*

Conforme se pode observar, apesar do valor da informação apresentar diferentes funções de pertinência, seu valor mais representativo é aproximadamente 0,1 para os três casos simulados, sendo coerente com o valor teórico calculado. Essas funções apresentam limites máximos e mínimos bastante distintos: caso A, de 0,04 a 0,11; caso B, de 0,03 a 0,17; e caso C, de 0,0 a 0,19. Comportamento similar foi apresentado pelo valor relativo da informação, que manteve seu valor mais representativo na ordem de 72,3 % e apresentou distintos limites máximos e mínimos.

Os valores representados pelas funções de pertinência agregam informação a respeito da incerteza dos resultados, dos limites potenciais desses valores e de sua significância e podem favorecer a decisão em cenários de poucos dados e informações confiáveis, como é o caso dos problemas que envolvem a estimativa do valor da informação.

A.4 Modelo razão custo / perda condicionada pela curva de características operacionais

A investigação dos impactos das características operacionais do processo de geração das informações hidrometeorológicas nos PTDs que as utilizam pode revelar

oportunidades de ajustamento desses processos para otimizar a agregação de valor. Essa linha de investigação foi abordada por BROOKS (2004), que a partir de uma perspectiva advinda da teoria de detecção de sinais, levantou as curvas de características operacionais (*Relative Operating Characteristic – ROC*) associadas ao processo de emissão de alertas de tornados nos EUA, no período de 1986 a 2002. Da análise dos trabalhos de BROOKS (2004), HARVEY JR. *et al.* (1992) e JOLLIFFE e STEPHENSON (2003), dentro da perspectiva de modelagem do valor da informação, é possível reconhecer duas abordagens complementares para a agregação de valor ao PTD, denominadas de ajustamento operacional e ajustamento tecnológico, conforme discussão empreendida no item 6.2.3.

Segundo BROOKS (2004), que considera o problema binário de emissão ou não do alerta de evento severo, é possível associar uma curva de características operacionais à condição presente do processo de previsão, definida no espaço $POD \times POFD$ (Probabilidade de Detecção \times 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 BROOKS (2004), 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 do sistema de alerta. Outro procedimento para levantamento da curva ROC, conforme discutido por HARVEY JR. *et al.* (1992), é partir 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.

Com base nessas idéias, se pode modelar o problema do valor da informação e estudar sua sensibilidade tanto ao ajustamento operacional quanto ao ajustamento tecnológico. Como ilustrativo dessa possibilidade, foi desenvolvida uma

implementação do modelo binário custo / perda, cujo processo de geração de informações é condicionado por sua curva de características operacionais. Uma representação esquemática dessa implementação, realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM, pode ser visualizada na Figura A.15. Nessa implementação, dado um discriminante de qualidade, é determinada a curva de características operacionais, em relação à qual se assume os pressupostos de normalidade e mesma variância da distribuição de probabilidade dos estados de evento e não evento. Também, dada a probabilidade de detecção, é determinada a probabilidade de falsa detecção, o que define a qualidade das previsões geradas.

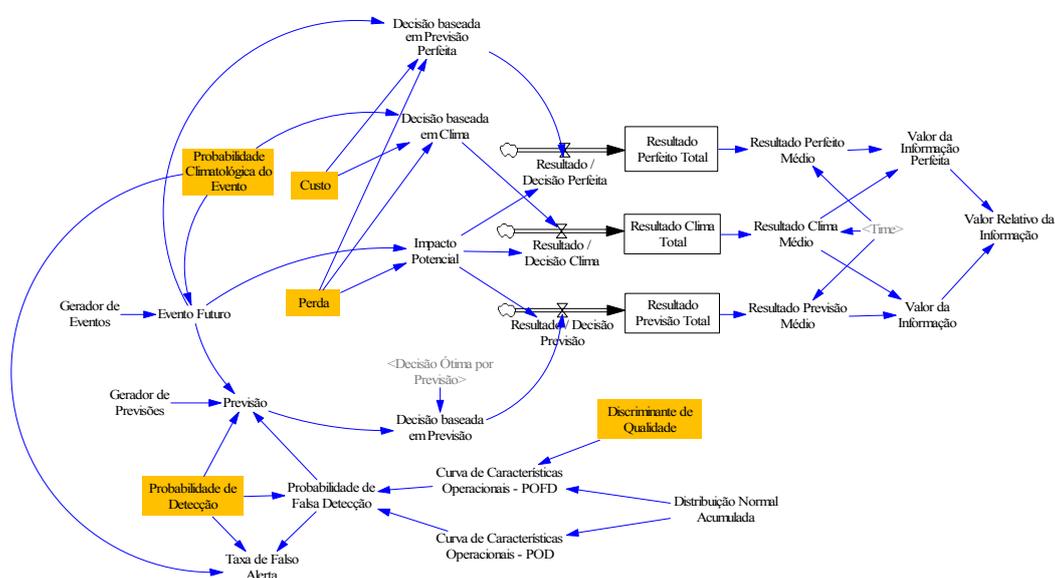


Figura A.15: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com ajustamento operacional e tecnológico

Com base nessa implementação é possível simular diferentes combinações de custo, perda, probabilidade climatológica do evento, probabilidade de detecção e discriminante de qualidade. Também é possível avaliar a sensibilidade conjunta do modelo aos ajustamentos operacional e tecnológico comentados. Para as curvas de características operacionais apresentadas na Figura A.16, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo considerando variações na probabilidade de detecção. Os resultados podem ser observados na Figura A.17, onde se considerou como parâmetros do modelo: $p=0,1$; $Custo=0,2$; e $Perda=1$.

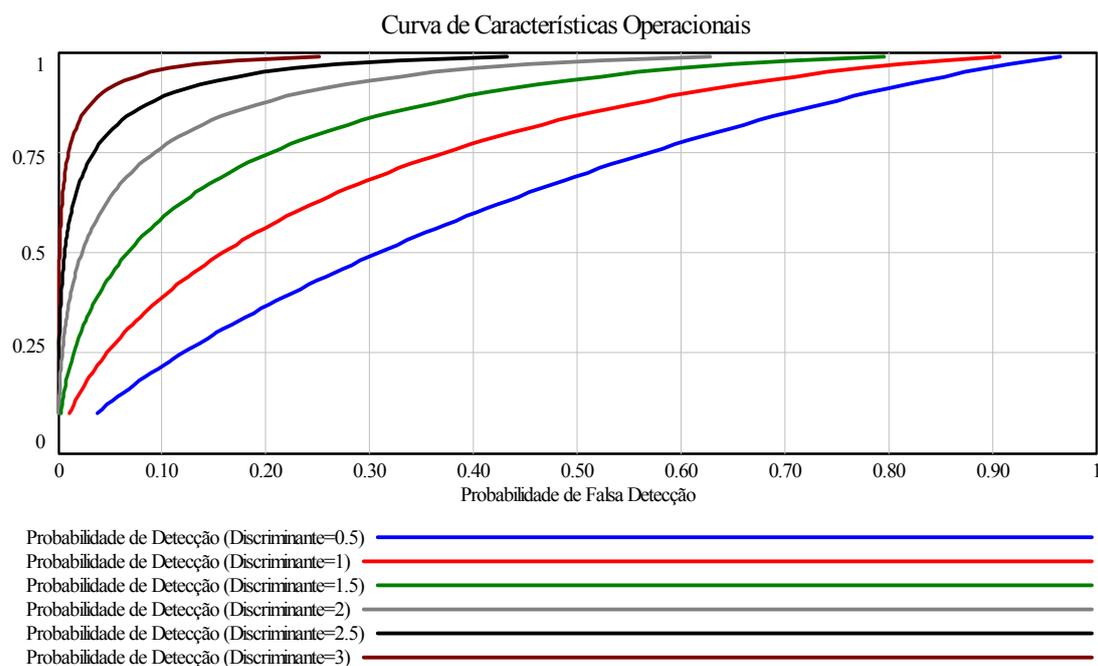


Figura A.16: Curvas de características operacionais (ROC) considerando diversos discriminantes de qualidade

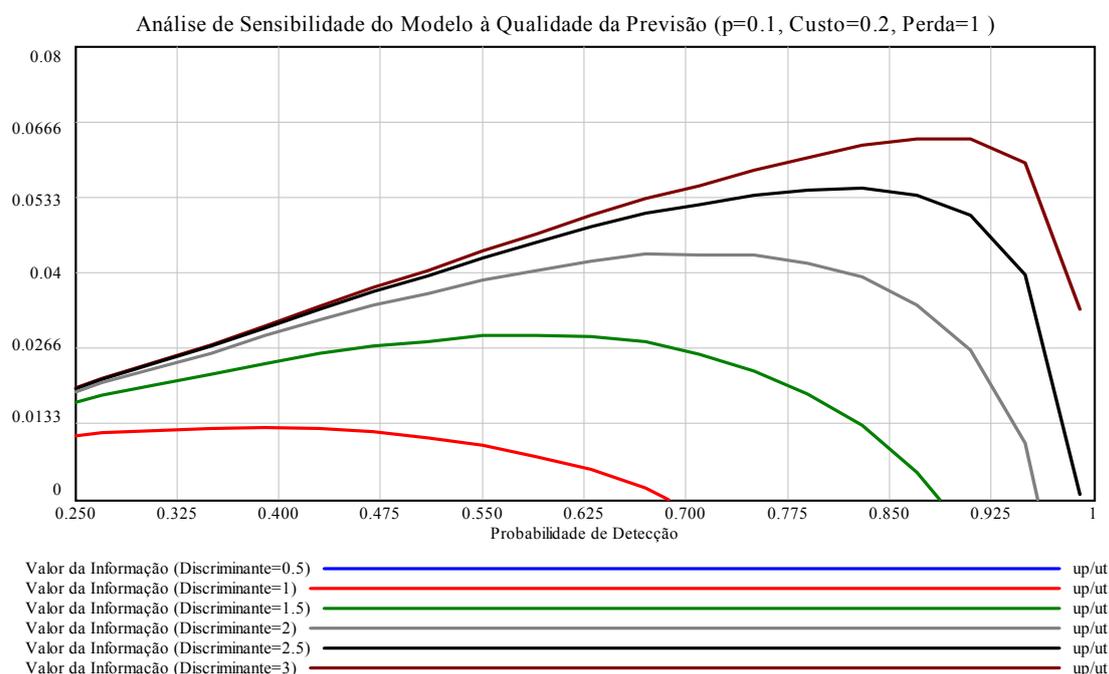


Figura A.17: Análise de sensibilidade do modelo razão custo / perda quanto a variações na probabilidade de detecção e na curva de características operacionais

Conforme se pode notar na Figura A.17, o valor máximo da informação encontra-se associado à determinada combinação de probabilidades de detecção e de falsa

detecção, regulada pela curva ROC considerada. Esse valor máximo cresce conforme se aumenta o discriminante de qualidade, ao mesmo tempo em que muda sua associação com a combinação de probabilidades. Para o caso simulado, o valor máximo da informação foi nulo para discriminante=0,5 e, por exemplo, igual a 0,013 para o discriminante=1, o que corresponde às probabilidades $POD=0,39$ e $POFD=0,10$ (Taxa de Falso Alerta, $FAR = POFD(1-p)/[PODp + POFD(1-p)] = 0,699$), e igual a 0,043 para o discriminante=2, o que corresponde às probabilidades $POD=0,71$ e $POFD=0,07$ ($FAR=0,485$).

A partir da equação de cálculo da diferença D entre valor da informação perfeita e valor da informação para o modelo razão custo / perda já discutido, é possível encontrar uma forma analítica dessa diferença expressa em relação à POD :

$$D = VP - VF = pc_{10}C + p_{01}(L - C) \quad (A.13a)$$

$$D = POFD(1 - p)C + p(L - C) - PODp(L - C) \quad (A.13b)$$

$$POFD = F(F^{-1}(POD) - d) \quad (A.13c)$$

$$D = F(F^{-1}(POD) - d)(1 - p)C + p(L - C) - PODp(L - C) \quad (A.13d)$$

onde:

- D - diferença entre valor da informação perfeita e valor da informação;
- pc_{kj} - probabilidade conjunta da previsão k e do estado de ocorrência do evento j ;
- d - discriminante de qualidade do sistema predictor; e
- $F(.)$ - função acumulada da probabilidade normal padronizada.

A minimização da diferença D conduz ao valor máximo da informação:

$$D^* = \min_{POD} D, \quad POD^* = POD | D = D^* \quad (A.14a)$$

$$VF^* = VP - D^* \quad (A.14b)$$

onde:

- D^* - diferença mínima entre valor da informação perfeita e valor da informação quando da variação de POD ;
- POD^* - valor da probabilidade de detecção que minimiza a diferença D ; e
- VF^* - valor máximo da informação.

Com a utilização de um método numérico simples de busca de extremos em uma planilha eletrônica programado para minimizar a expressão da diferença, foi possível encontrar valores máximos da informação e seus correspondentes POD muito próximos aos simulados na implementação (para $d=1$, $VF^*=0,013$ e $POD^*=0,38$; para $d=2$, $VF^*=0,044$ e $POD^*=0,72$).

Essa abordagem de análise do processo de produção da informação, que busca identificar o posicionamento atual e ótimo de operação na curva válida de características operacionais visando agregação de valor a determinado PTD, possui potencial para ajustamentos particulares conforme a demanda diferenciada do usuário, o que pode agregar valor a partir de baixos custos de implementação. Por outro lado, a análise de múltiplas curvas de características operacionais de maior discriminante de qualidade, que possam ser projetadas e perseguidas, traduz estimativas de onde se pode chegar em termos de valor da informação, o que se constitui em instrumento de planejamento da inovação tecnológica na área hidrometeorológica, favorecendo os estudos de viabilidade econômica dos investimentos vinculados.

A.5 Modelo razão custo / perda com o uso de previsões probabilísticas

De acordo com a discussão realizada no item 5.4, as previsões probabilísticas, que incorporam e explicitam as incertezas sempre presentes nas previsões hidrometeorológicas, possuem, entre outras, as vantagens de desvincular o processo de previsão do processo de tomada de decisão subsequente e de garantir o máximo valor derivado do seu uso em processos decisórios bayesianos, quando devidamente calibradas. Como ilustrativo dessas características, foi desenvolvida uma implementação do modelo binário custo / perda, cujo processo de geração das previsões probabilísticas é baseado na curva de características operacionais, ROC, conforme apresentado no item A.4. Uma representação esquemática dessa implementação, realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM, pode ser visualizada na Figura A.18. Nessa implementação, dado um discriminante de qualidade, é determinada a curva de características operacionais, em relação à qual se assume os pressupostos de normalidade e mesma variância da distribuição de probabilidade dos estados de evento e não evento. Também, dado um número de classes de previsão probabilística considerado factível de discriminação, são determinadas as probabilidades de detecção e falsa detecção associadas, o que define a qualidade das previsões geradas.

Com base nessa implementação, é possível simular diferentes combinações de custo e perda, que definem o processo de tomada de decisão, de probabilidade climatológica do evento, que define a geração de eventos, de discriminante de qualidade e número de classes de previsão, que definem a geração das previsões probabilísticas, e de probabilidade de detecção, que define a geração das previsões determinísticas binárias, vinculadas à mesma curva ROC.

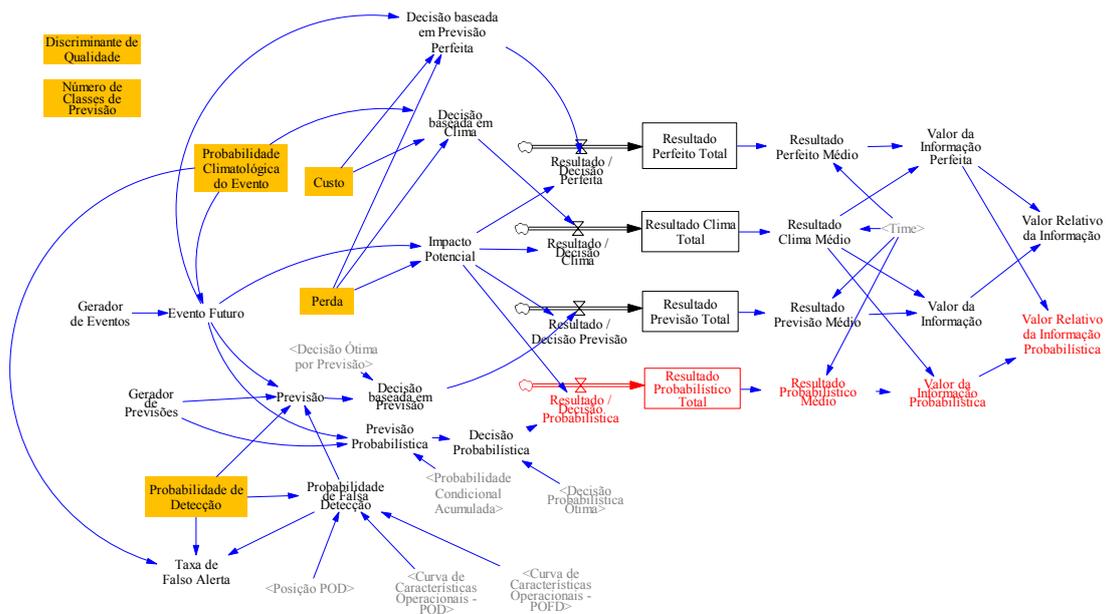


Figura A.18: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo razão custo / perda, com o uso das previsões probabilísticas

Com o intuito de investigar o ganho relativo associado ao uso das previsões probabilísticas em relação às determinísticas, em um contexto de decisão bayesiano, foi definida a seguinte medida, expressa em porcentagem:

$$GRP = VRP - VR = \frac{(VFP - VF)}{VP} 100 \quad (A.15)$$

onde:

- GRP - ganho relativo associado à previsão probabilística em relação à previsão determinística binária;
- VRP e VR - valores relativos da previsão probabilística e da previsão determinística binária; e
- VFP , VF e VP - valores da previsão probabilística, da previsão determinística binária e da previsão perfeita.

Uma primeira análise de sensibilidade foi realizada para investigar o comportamento do ganho relativo GRP em relação a variações da probabilidade de detecção POD , que determina as previsões determinísticas binárias, e do custo das medidas de proteção (ou da razão custo / perda, considerando a $Perda=1$). Nessa análise apresentada na Figura A.19, a curva ROC foi mantida constante, com discriminante de qualidade $d=2$, e foram considerados, como parâmetros do modelo, os valores da probabilidade climatológica do evento $p=0,1$, $Perda=1$ e do número de classes de previsão igual a 100. Isto significa que foram geradas previsões probabilísticas correspondentes aos valores de 0,01, 0,02, 0,03 até 1, com

probabilidades de detecção de mesmo valor e probabilidades de falsa detecção obtidas através da curva ROC. Esses valores de *POD* e *POFD* correspondem, respectivamente, às probabilidades condicionais da previsão, dado o estado de evento e de não evento, das previsões probabilísticas.

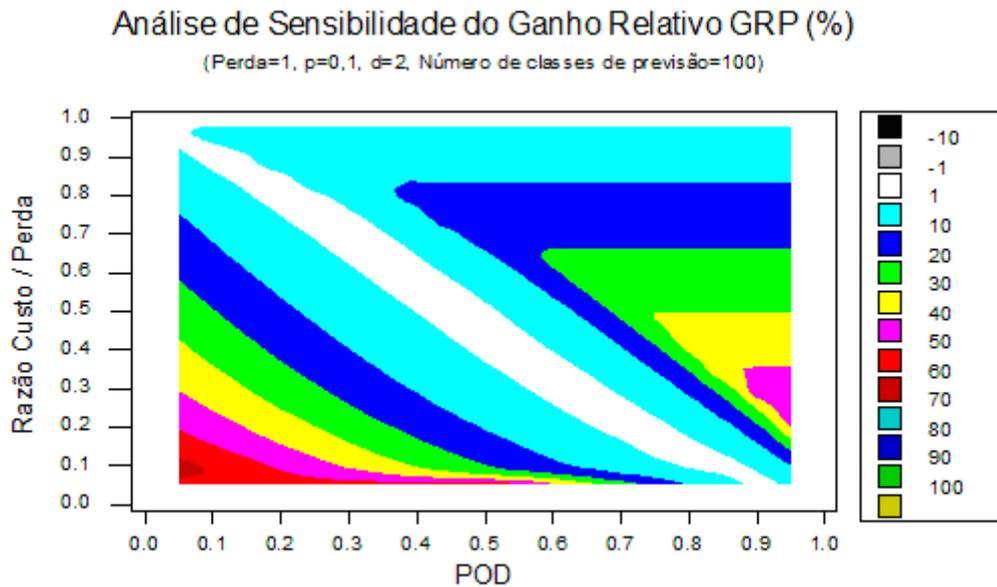


Figura A.19: Análise de sensibilidade do ganho relativo associado à previsão probabilística em relação à previsão determinística binária, para o modelo razão custo / perda, considerando variações na probabilidade de detecção *POD* e na razão custo / perda

Conforme se pode observar na Figura A.19, as áreas coloridas referem-se às situações de ganho das previsões probabilísticas em relação às determinísticas, que no caso simulado podem alcançar valores maiores que 60 %. Esses ganhos são maiores, quanto mais desajustadas são as previsões determinísticas binárias. As áreas em branco correspondem às situações de muito pequeno ganho ou perda, associadas à geração de previsões determinísticas binárias com ajuste operacional, ou casos de valores da informação muito baixos, tanto para a previsão probabilística quanto para a determinística (custos de proteção muito altos). As situações de ganho prevalecem para as diferentes combinações da razão custo / perda e *POD*, as quais se mantêm em análises similares, para diferentes probabilidades climatológicas do evento. Como a razão custo / perda caracteriza o processo decisório do usuário da informação nesse tipo de modelo e ambas as previsões são derivadas da mesma curva ROC, pode-se confirmar a supremacia das previsões probabilísticas sobre as determinísticas, as quais independem do ajuste operacional realizado para cada

usuário específico, situação exigida na previsão determinística para a equivalência do valor entre os dois tipos de previsões.

Essa supremacia das previsões probabilísticas também se mantém quando se varia a qualidade das previsões, via alteração no discriminante da qualidade que caracteriza a curva ROC. Essa análise de sensibilidade mostrada na Figura A.20 foi realizada considerando-se como parâmetros do modelo os valores de Custo=0,2; Perda=1; $p=0,1$ e número de classes de previsão igual a 100.

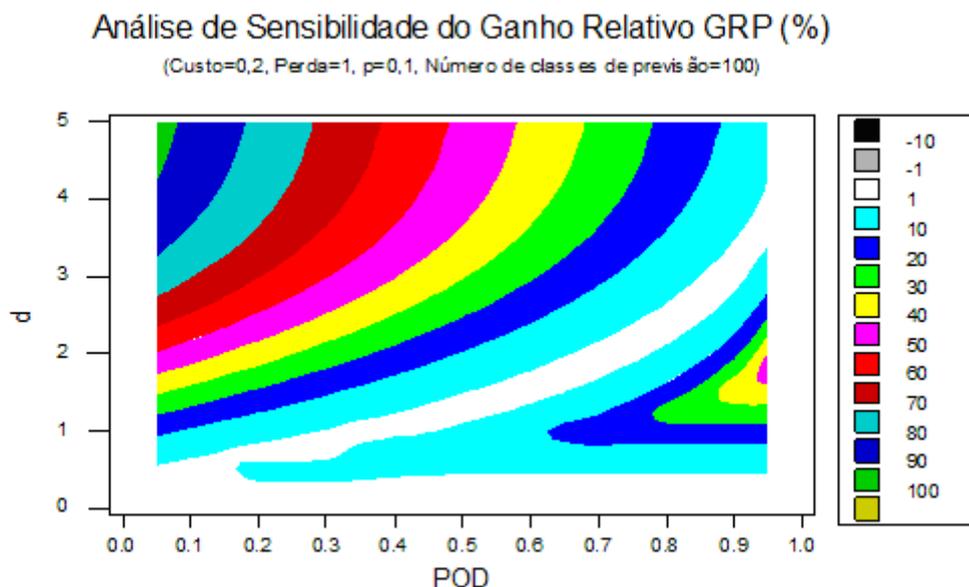


Figura A.20: Análise de sensibilidade do ganho relativo associado à previsão probabilística em relação à previsão determinística binária, para o modelo razão custo / perda, considerando variações na probabilidade de detecção POD e no discriminante de qualidade das previsões d

Conforme se pode observar na Figura A.20, para o caso simulado, as situações de ganhos prevalecem e contemplam valores que podem exceder 90 % em casos de altos discriminantes de qualidade da curva ROC e máximo desajuste das previsões determinísticas. Mesmo se considerando variação na qualidade de ambas as informações geradas, as previsões determinísticas mantêm valores menores que as probabilísticas, só se equivalendo às segundas quando geradas com o valor de POD correspondente ao seu ajuste operacional para o usuário específico. Considerando também outras combinações da razão custo / perda e da probabilidade climatológica do evento, esse tipo de modelo de PTD, com variável binária, demonstrou maiores ganhos para as previsões probabilísticas, quando se simulou situações de maior qualidade das previsões.

A supremacia observada da previsão probabilística pode ser comprometida quando se reduz sua qualidade via diminuição do número de classes de previsão. Apesar da resiliência do valor da informação probabilística em relação à redução desse parâmetro, observada em diversas simulações realizadas, para os casos em que esse número é muito baixo (inferior a 10), a análise revela situações de perda de valor em relação às previsões determinísticas ajustadas operacionalmente, situação que se agrava quando os limites de classe considerados estão distantes dos valores de *POD* determinados nos ajustes. JOLLIFFE e STEPHENSON (2003) analisam as relações entre número e limites de classe considerados e valor das informações probabilísticas derivadas e propõem medidas baseadas na curva ROC que refletem o valor geral desses sistemas de previsão. Conforme o caso, esforço deve ser desenvolvido para refinamento na determinação das classes, de forma compatível com as demandas dos PTDs usuários dessas previsões probabilísticas, de maneira a torná-las de maior valor ou equivalentes às determinísticas ajustadas e, principalmente, independentes de ajustes específicos por grupos de usuários, que podem apresentar diferentes relações entre custos e perdas.

A.6 Modelo generalizado de custos e perda por categoria

No sentido de expandir a aplicabilidade do conceito envolvido nos PTDs do tipo razão custo / perda, foi desenvolvida uma implementação baseada em múltiplas categorias do estado do tempo, clima ou recurso hídrico, representadas por um vetor de probabilidades climatológicas de ocorrência, a partir do qual se simula esses estados, e uma matriz de probabilidades condicionais de previsão dado esses estados, a partir da qual se simula a geração das previsões. Também a perda potencial associada a cada estado e o custo de cada ação de proteção foram representados por vetores, considerando-se que cada ação possui determinado fator de redução de perda, representativo de sua eficácia em relação àquela categoria de estado. Assim:

$$R_{ij} = C_i + (1 - r_{ij})L_j \quad \text{onde } 0 \leq r_{ij} \leq 1 \quad (\text{A.16})$$

onde:

- R_{ij} - resultado da ação de proteção i quando da ocorrência da categoria de estado j ;
- C_i - custo da ação de proteção i ;
- L_j - perda potencial associada à categoria de estado j ; e
- r_{ij} - fator de redução da ação i quando da ocorrência da categoria de estado j .

A representação esquemática dessa implementação realizada no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM pode ser visualizada na Figura A.21.

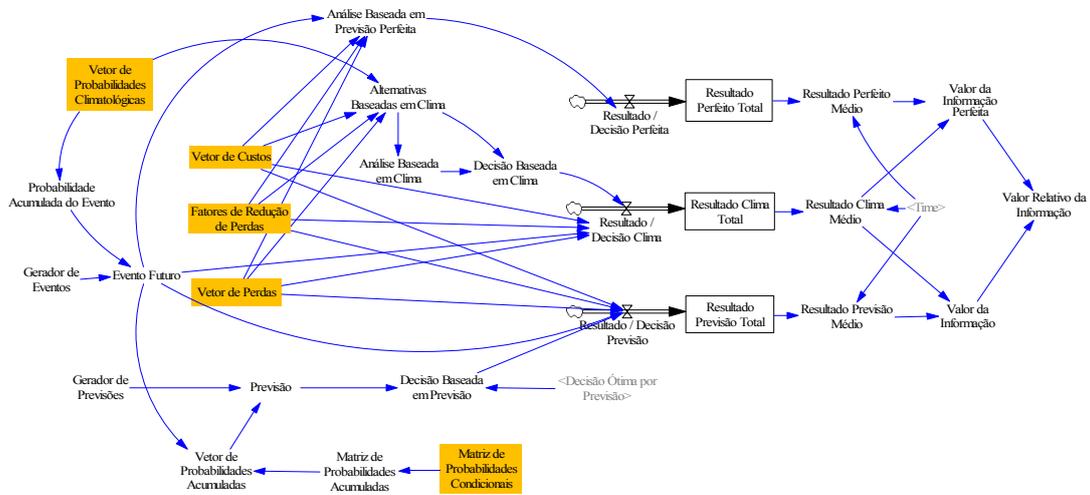


Figura A.21: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo generalizado de custos e perdas por categorias

A Figura A.22 mostra o resultado de simulação para um caso hipotético de valores dos parâmetros, onde foram considerados cinco estados possíveis e cinco ações disponíveis de proteção:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p} &= [0,6 \quad 0,2 \quad 0,1 \quad 0,07 \quad 0,03], & \mathbf{L} &= [0 \quad 0,1 \quad 0,25 \quad 0,5 \quad 1] \\
 \mathbf{C} &= [0 \quad 0,05 \quad 0,1 \quad 0,15 \quad 0,2], \\
 \mathbf{r} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0,5 & 0,2 & 0,1 \\ 1 & 1 & 1 & 0,5 & 0,2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0,5 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} e & \mathbf{PCP} &= \begin{bmatrix} 0,8 & 0,1 & 0,03 & 0,005 & 0,005 \\ 0,1 & 0,8 & 0,06 & 0,015 & 0,015 \\ 0,05 & 0,05 & 0,8 & 0,03 & 0,03 \\ 0,04 & 0,04 & 0,08 & 0,8 & 0,15 \\ 0,01 & 0,01 & 0,03 & 0,15 & 0,8 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

onde:

- p** - vetor de probabilidades climatológicas das categorias representativas dos estados de tempo, clima e recursos hídricos;
- L** - vetor das perdas potenciais associadas a cada categoria de estado j ;
- C** - vetor dos custos das ações de proteção disponíveis;
- r** - matriz dos fatores de redução de cada ação i sobre as perdas associadas a cada categoria de estado j ; e
- PCP** - matriz de probabilidades condicionais das previsões k , dado a categoria de estado j .

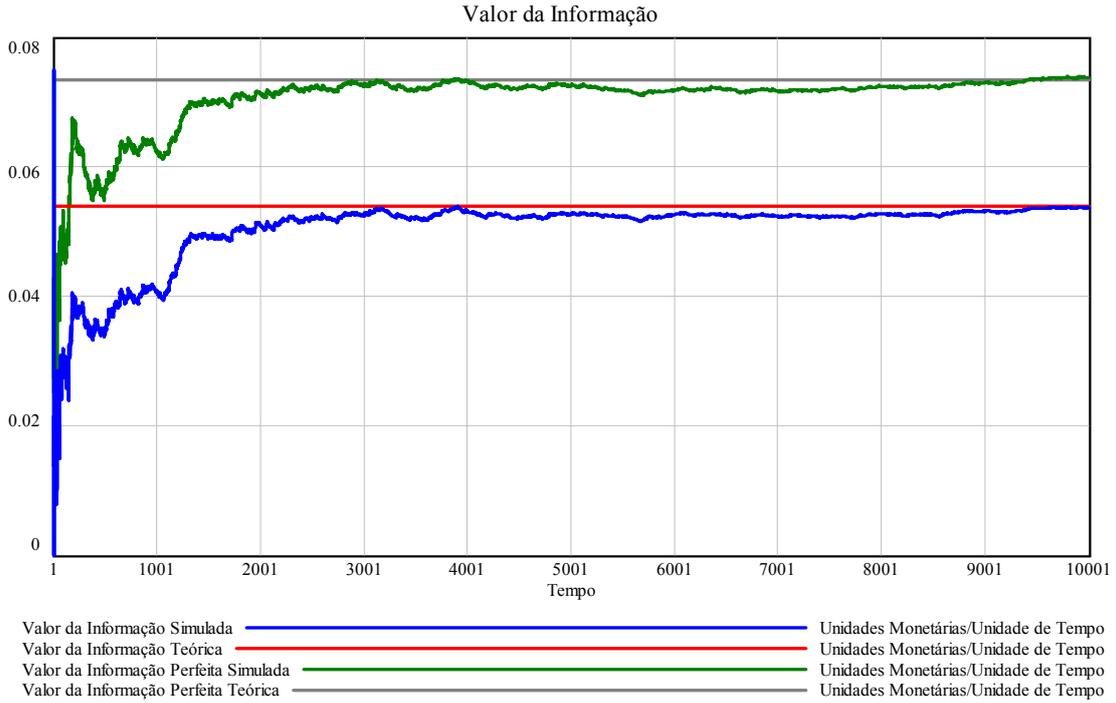


Figura A.22: Resultado da simulação do modelo generalizado de custos e perdas por categoria

Para o caso simulado, o valor da informação foi de 0,054 um/ut e o valor da informação perfeita foi de 0,074 um/ut, valores muito próximos aos valores teóricos calculados. Passou-se a utilizar unidades monetárias/unidades de tempo (um/ut) na medida do valor da informação, porque a perda deixou de ser unitária. O modelo apresentou baixa dispersão quando simulado a partir de diversas seqüências de eventos e previsões, no qual o valor da informação variou de 0,053 a 0,056 (média de $0,054 \pm 0,001$ um/ut) para o tempo de 10.000.

O valor teórico da informação advém da aplicação da teoria bayesiana sobre o resultado R_{ij} . Os valores esperados do resultado com o uso da informação climatológica EC , da previsão EF , e da informação perfeita EP , são dados pelas seguintes equações:

$$EC = \min_i \sum_j R_{ij} p_j = \min_i \sum_j [C_i + (1 - r_{ij}) L_j] p_j \quad (\text{A.17a})$$

$$\begin{aligned} EF &= \sum_k \pi_k \left[\min_i \left(\sum_j R_{ij} PCE_{kj} \right) \right] = \sum_k \pi_k \left[\sum_j R_{i_k^* j} PCE_{kj} \right] \\ &= \sum_k \pi_k \left[\sum_j [C_{i_k^*} + (1 - r_{i_k^* j}) L_j] PCE_{kj} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.17b})$$

$$EP = \sum_j R_{i_j^* j} p_j = \sum_j [C_{i_j^*} + (1 - r_{i_j^* j}) L_j] p_j \quad (\text{A.17c})$$

onde:

- R_{ij} - resultado da ação de proteção i quando da ocorrência da categoria de estado j ;
- i_k^* - ação que minimiza o resultado esperado associado à previsão k
- i_j^* - ação que minimiza o resultado quando da ocorrência do estado j ;
- p_j - probabilidade climatológica de ocorrência do estado de categoria j ;
- π_k - probabilidade marginal de ocorrência da previsão k ;
- PCP_{kj} - probabilidade condicional da previsão k dado o estado de categoria j ;
- e
- PCE_{kj} - probabilidade condicional do estado de categoria j dado a previsão k
 $(PCE_{kj} = PCP_{kj} p_j / \pi_k)$.

Os valores da informação de previsão VF e da informação perfeita VP são obtidos pela diferença entre os seguintes resultados esperados:

$$VF = EC - EF \quad (A.18a)$$

$$VP = EC - EP \quad (A.18b)$$

Diversas análises de sensibilidade são possíveis no modelo de custos e perdas por categoria, conforme se modifica os vetores representativos da probabilidade climatológica, dos custos e fatores de redução das ações de proteção, das perdas vinculadas às categorias de eventos ou da matriz de probabilidades condicionais das previsões.

Para o caso do modelo generalizado de custos e perdas por categoria, as matrizes de diferença marginal dos resultados, \mathbf{DM} , e de defasagem absoluta e relativa em relação à informação perfeita, $\mathbf{\Delta}$ e $\mathbf{\Delta R}$, podem ser assim obtidas:

$$DM_{kj} = R_{i_k^* j} - R_{i_j^* j} \quad (A.19a)$$

$$\Delta_{kj} = pc_{kj} DM_{kj} \quad (A.19b)$$

$$D = VP - VF = EF - EP = \sum_k \sum_j \Delta_{kj} \quad (A.19c)$$

$$\mathbf{\Delta R} = \frac{100}{D} \mathbf{\Delta} \quad (A.19d)$$

onde:

- $R_{i_k^* j}$ - resultado da ação de proteção que minimiza o resultado esperado associado à previsão k , quando da ocorrência do estado j ;
- $R_{i_j^* j}$ - resultado da ação de proteção que minimiza o estado j , quando da ocorrência do estado j ;

pc_{kj} - probabilidade conjunta da previsão k e do estado de ocorrência do evento j ; e

D - diferença entre os valores da informação perfeita e da informação imperfeita.

Para o caso simulado, as decisões ótimas de ação de proteção associadas às previsões são iguais às decisões associadas aos estados correspondentes, $D= 0,0195$ up/ut e as matrizes de diferenças marginais de resultado **DM**, probabilidades conjuntas **pc** e de defasagem Δ e ΔR , calculadas a partir do modelo, assumem os valores:

$$\mathbf{DM} = \begin{bmatrix} 0 & 0,05 & 0,15 & 0,35 & 0,8 \\ 0,05 & 0 & 0,08 & 0,3 & 0,75 \\ 0,1 & 0,05 & 0 & 0,2 & 0,7 \\ 0,15 & 0,1 & 0,05 & 0 & 0,45 \\ 0,2 & 0,15 & 0,1 & 0,05 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{pc} = \begin{bmatrix} 0,48 & 0,02 & 0,003 & 0,00035 & 0,0002 \\ 0,06 & 0,16 & 0,006 & 0,00105 & 0,0005 \\ 0,03 & 0,01 & 0,08 & 0,0021 & 0,0009 \\ 0,024 & 0,008 & 0,008 & 0,056 & 0,0045 \\ 0,006 & 0,002 & 0,003 & 0,0105 & 0,024 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0,001 & 0,00045 & 0,00012 & 0,00012 \\ 0,003 & 0 & 0,00045 & 0,00032 & 0,00034 \\ 0,003 & 0,0005 & 0 & 0,00042 & 0,00063 \\ 0,0036 & 0,0008 & 0,0004 & 0 & 0,00203 \\ 0,0012 & 0,0003 & 0,0003 & 0,00053 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } \Delta R = \begin{bmatrix} 0 & 5,1 & 2,3 & 0,6 & 0,6 \\ 15,4 & 0 & 2,3 & 1,6 & 1,7 \\ 15,4 & 2,6 & 0 & 2,2 & 3,2 \\ 18,5 & 4,1 & 2,1 & 0 & 10,4 \\ 6,2 & 1,5 & 1,5 & 2,7 & 0 \end{bmatrix}$$

A análise da matriz de defasagem relativa revela facilmente os tipos de erros com maior responsabilidade na redução do valor da informação em comparação com o valor da informação perfeita: previsão da categoria de estado 4, 3 e 2, quando da ocorrência da categoria 1. Os valores associados de probabilidade conjunta são relativamente altos e possivelmente exista espaço para otimização. Ao contrário, as probabilidades conjuntas associadas aos maiores valores das diferenças marginais de resultado já são muito baixas e sua redução terá pequeno impacto na redução da defasagem. Devido à igualdade das decisões ótimas entre previsões e estados correspondentes, as matrizes de defasagem e diferenças marginais possuem todos os elementos da diagonal principal iguais a zero.

A.7 Modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas

O conceito desenvolvido anteriormente de PTD, que envolve um conjunto finito de ações, aplicada sobre um conjunto finito de categorias representativas do estado do tempo, clima ou recursos hídricos, onde cada ação possui custo e eficácia determinados sobre cada categoria, foi utilizado para um caso mais geral, no qual a variável hidrometeorológica é de natureza quantitativa, podendo ser contínua ou discreta. Nesse caso, as categorias foram substituídas por classes da variável

hidrometeorológica e o vetor perda substituído por uma função perda, dependente dessa variável. Na construção desse modelo foi considerada, inicialmente, que a decisão sobre a ação de proteção a ser tomada em cada unidade de tempo é aquela que minimiza o resultado correspondente ao estado indicado pela informação disponível (de previsão ou referência). Essa estratégia de decisão, baseada no valor de face da informação, não garante o resultado ótimo da decisão, mas corresponde ao comportamento usual quando o tomador de decisão não conhece a estrutura de erros da previsão. Como ilustrativo dessa categoria de modelos, foi desenvolvida uma implementação no ambiente de simulação de Dinâmica de Sistemas VENSIM, cuja representação esquemática pode ser visualizada na Figura A.23.

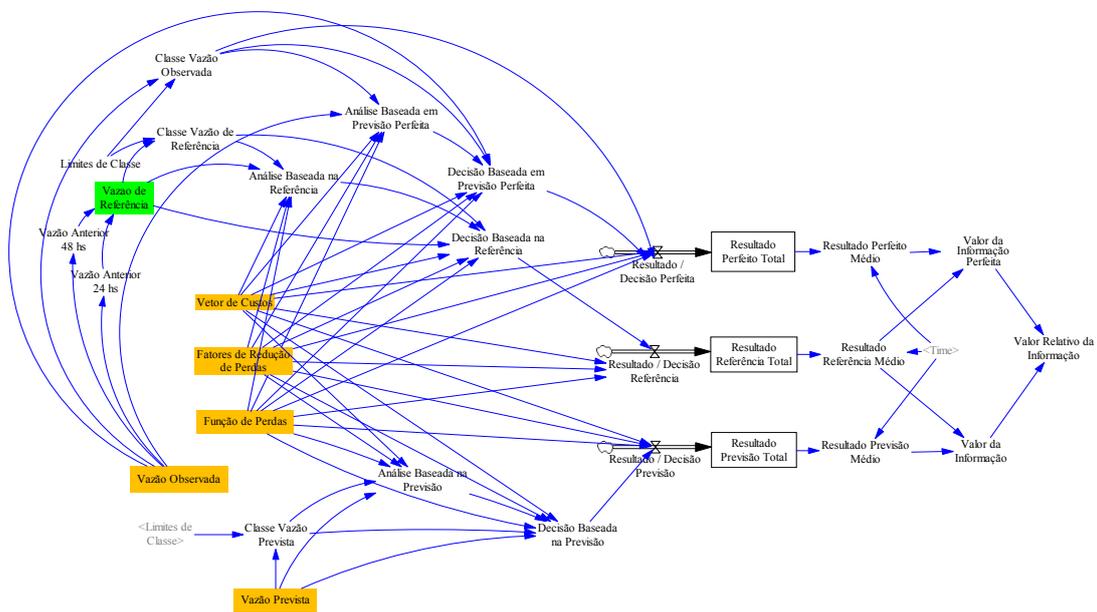


Figura A.23: Representação esquemática da implementação em Dinâmica de Sistemas do modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas

Nessa implementação, a variável hidrometeorológica considerada foi a vazão horária e a simulação foi realizada com os dados históricos de cinco anos (1998 a 2002) em União da Vitória, Bacia do Rio Iguaçu, no Paraná. Para a geração das previsões, foram considerados os resultados simulados de previsões de 24 h de um modelo ARIMA do tipo 7,1,3 (7 termos auto-regressivos, 1 diferenciação e 3 termos de média móvel). Para a geração de previsões de referência, foi considerada uma heurística simples, segundo a qual a previsão das próximas 24 h é igual a vazão do momento mais a diferença das últimas 24 h. Em casos de estudos específicos, deveria ser considerada como informação de previsão aquela que é foco da estimativa de valor e como informação de referência, aquela anteriormente disponível, em uso, ou

considerada uma alternativa viável pelo usuário. Os custos de incorporação de ambas as alternativas podem ser incluídos no modelo. Os demais parâmetros considerados foram os seguintes: definição de cinco classes de vazão, significativas para a seleção da ação de proteção (abaixo de 1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500 e maiores de 2500 m³/s); cinco ações de proteção disponíveis representadas pelo mesmo vetor de custos e matriz de fatores de redução de perda considerados no caso anterior; e uma função composta por segmentos de reta, representativa da perda unitária potencial horária associada à ocorrência de cada valor de vazão. Essa função pode ser visualizada na Figura A.24.

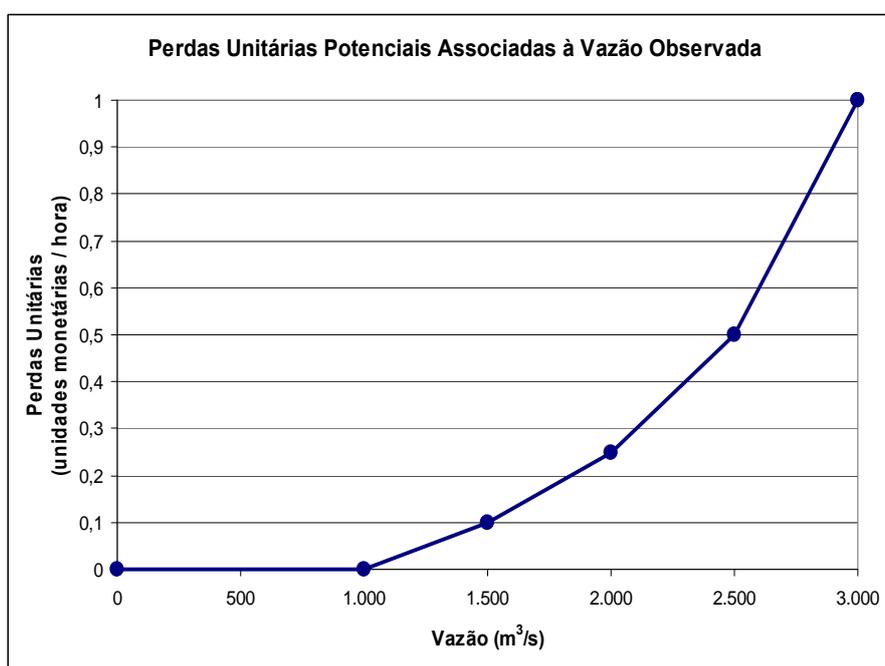


Figura A.24: Função gráfica representativa das perdas unitárias potenciais (em unidades monetárias / hora) associadas a cada valor de vazão

Os resultados da simulação com os parâmetros descritos podem ser visualizados na Figura A.25. Conforme se pode observar, o valor da informação para o caso analisado, em relação à informação de referência considerada, foi da ordem de 0,12E-3 um/hora (1,05 um/ano), enquanto o valor da informação perfeita foi de 0,45E-3 um/hora, o que rendeu um valor relativo da ordem de 27 %. O valor da informação representa cerca de 1 % do resultado médio horário da referência, que foi obtido a partir de uma redução de 24 % na raiz do erro médio quadrático da previsão. Por sua vez, o valor da informação perfeita representa 4 % do resultado médio horário da referência. Esse último valor é o limite de redução do resultado e sua avaliação pode calibrar nossas expectativas quanto às melhorias possíveis dos resultados esperados.

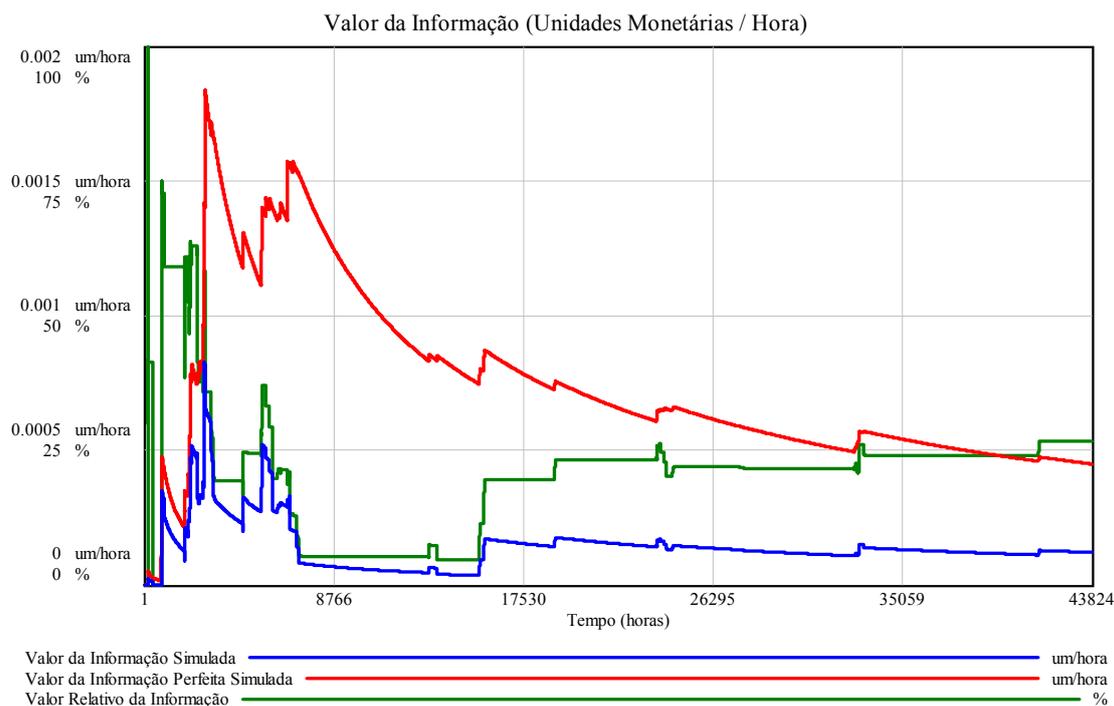


Figura A.25: Resultado da simulação do modelo generalizado de custos e perdas para variáveis quantitativas

Outra questão que merece análise é o número de decisões horárias, associadas à previsão e à referência, diferentes daquelas associadas à informação perfeita: 492 para a previsão e 561 para a referência, o que representa cerca de 1 % das horas simuladas. Mais que um resultado hipotético específico, essa situação é comum nos PTDs que utilizam informações hidrometeorológicas, sendo usual os tomadores de decisão possuir um conjunto discreto de alternativas de ação e poder alterar suas decisões somente em momentos determinados, onde o sistema de informações precisa fazer toda a diferença.

Considerando-se além da estratégia de decisões baseada no valor de face das previsões, a investigação das decisões ótimas, dentro da perspectiva bayesiana, para o caso das variáveis quantitativas, envolve processos de otimização capazes de minimizar o valor esperado condicionado às previsões e referências e de reconhecer as classes correspondentes às decisões ótimas identificadas. A realização dessa investigação exige o acesso e a incorporação da estrutura de erros da informação hidrometeorológica nos processos decisórios que a utilizam. Uma abordagem possível de investigação das decisões ótimas é o desenvolvimento de um modelo de representação da função de probabilidade conjunta da previsão e estado e das funções condicional e marginal associadas, onde a relação entre ações e resultados esperados pode ser avaliada a partir da integração numérica da seguinte expressão:

$$\bar{R} = \int_{-\infty}^{\infty} p(y) \left[\min_i \int_{-\infty}^{\infty} R_i(x) \cdot p_{x|y}(x, y) dx \right] dy = \int_{-\infty}^{\infty} p(y) \left[\min_i \bar{R}_i(y) \right] dy \quad (\text{A.20a})$$

$$R_i(x) = C_i + (1 - r_{ij})L(x) \quad (\text{A.20b})$$

onde:

- \bar{R} - resultado esperado ótimo associado ao sistema predictor de variáveis quantitativas;
- $\bar{R}_i(y)$ - resultado esperado associado à ação de proteção i , quando da ocorrência da previsão y ;
- $R_i(x)$ - resultado associado à ação de proteção i , quando da ocorrência da variável de estado x ;
- C_i - custo da ação de proteção i ;
- r_{ij} - fator de redução da perda associado à ação de proteção i , quando da ocorrência da classe j , correspondente à variável de estado x ;
- $L(x)$ - função de perda associada à ocorrência da variável de estado x ;
- $p(y)$ - probabilidade marginal de ocorrência da previsão y ; e
- $p_{x|y}(x, y)$ - probabilidade condicional de ocorrência da variável de estado x , dado a previsão y .

No caso em análise, foi ajustada uma distribuição log-normal para a vazão observada e prevista, o que possibilitou a consideração de uma distribuição normal bivariada para a distribuição conjunta das variáveis transformadas $z = \ln(x)$ e $w = \ln(y)$. A partir dessa consideração, conforme discutido por LAWRENCE (1999), utilizou-se como probabilidade condicional uma aproximação de distribuição normal, com os seguintes parâmetros:

$$p_{z|w}(z, w) \approx N(\bar{z} + \rho\sigma_z[w - \bar{w}] / \sigma_w, \sigma_z^2[1 - \rho^2]) \quad (\text{A.21})$$

onde:

- $p_{z|w}(z, w)$ - probabilidade condicional de ocorrência da variável z , dado a ocorrência da variável w , considerando que ambas apresentam distribuição conjunta normal bivariada;
- \bar{z} e \bar{w} - valores médios das variáveis z e w ;
- σ_z e σ_w - desvios padrão das variáveis z e w ; e
- ρ - coeficiente de correlação entre as variáveis z e w .

Essa abordagem foi implementada em Dinâmica de Sistemas no modelo de custos e perdas para variáveis quantitativas, cuja simulação, para o caso em análise, mostrada na Figura A.26, revela os resultados esperados para cada decisão de ação

de proteção em função da vazão prevista. A implementação também calcula os limites de classe associados a cada decisão ótima que minimiza o resultado esperado.

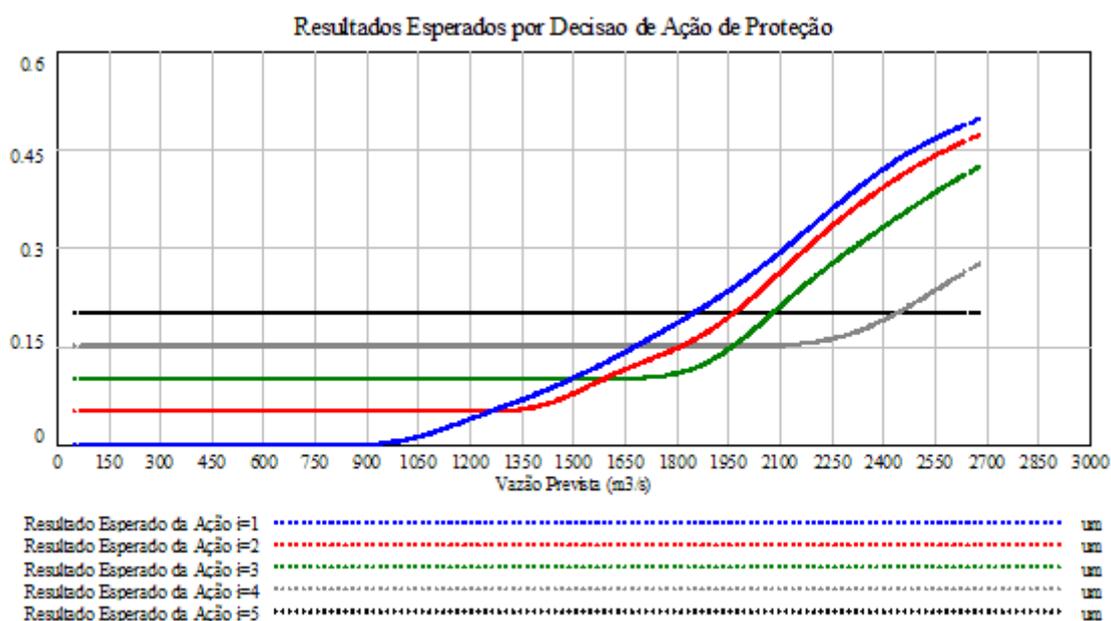


Figura A.26: Resultados esperados para cada decisão de ação de proteção em função da previsão para o modelo de custos e perdas para variáveis quantitativas

Os resultados da investigação das decisões ótimas permitiram uma revisão de alguns limites de classe associados às previsões e às informações de referência e uma nova simulação do modelo com esses parâmetros reduziram o valor do resultado esperado da previsão e da referência em, respectivamente, 0,5 % e 0,4 %, o que resultou em um acréscimo de 4,5 % no valor da informação. O valor relativo da informação evoluiu de 27 % para 31 %. Como os resultados esperados associados às previsões e às informações de referência são independentes e o valor da informação deriva da diferença entre esses resultados, uma investigação das decisões ótimas, que busca reduzir os resultados esperados, pode alterar ou não o valor da informação em qualquer sentido. Assim, a decisão ótima bayesiana, que garante o melhor resultado esperado pode, em certas circunstâncias, levar a uma diminuição no valor da informação, quando comparada com a adoção de outra estratégia de decisão. Esse fato pode ocorrer quando ambos os resultados, oriundos do uso da previsão e de referência, são simultaneamente afetados pela estratégia de decisão adotada.

Uma abordagem analítica possível para a análise da defasagem do valor da informação em relação à informação perfeita, para esse tipo de problema, passa por um conjunto de etapas que permita discretizar a função de perda e tratar esse modelo de variáveis quantitativas de forma similar ao problema por categorias. Esse processo de discretização deve compreender a identificação de novas classes da variável de

estado, associadas às mudanças de decisão e relevantes para o PTD em análise, o levantamento das matrizes de probabilidades conjuntas e condicionais, conforme as classes identificadas, e o cálculo da matriz de perdas médias, considerando independentemente cada par previsão – classe de estado. Com a implementação desses procedimentos e a realização de cálculos similares aos adotados no caso das variáveis categóricas, é possível desenvolver a análise de defasagem conforme apresentada no item A.6.

Ao concluir, é importante não perder a perspectiva de que a estimativa de valor tem como base a informação de referência e sua escolha precisa refletir as alternativas viáveis disponíveis ao usuário. Além disso, a investigação das decisões ótimas permite maximizar o uso da informação disponível e a análise da defasagem em relação à informação perfeita permite o planejamento do processo de melhoria das previsões, com o objetivo de agregar valor. Assim considerado, a construção e análise de modelos desse tipo, que reflitam o PTD envolvido no uso da previsão hidrometeorológica, podem subsidiar o desenvolvimento de sistemas de informação mais eficazes, bem como permitir a análise de novos investimentos focados na alavancagem de valor das informações hidrometeorológicas.