

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS

**PREVISÃO HIDROECONÔMICA DE CURTO PRAZO COM MODELO DE
REDES NEURAS ARTIFICIAS: APLICAÇÃO À BACIA DO RIO CAÍ**

Dissertação de Mestrado
Emanuel Duarte Silva

Porto Alegre, 12 de novembro de 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

PREVISÃO HIDROECONÔMICA DE CURTO PRAZO COM MODELO DE
REDES NEURAS ARTIFICIAS: APLICAÇÃO À BACIA DO RIO CAÍ

Emanuel Duarte Silva

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. PhD. Guilherme Fernandes Marques

Porto Alegre, novembro de 2019.

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Emanuel Duarte
PREVISÃO HIDROECONÔMICA DE CURTO PRAZO COM MODELO
DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS: APLICAÇÃO À BACIA DO RIO
CAÍ / Emanuel Duarte Silva. -- 2019.
131 f.
Orientador: Guilherme Fernandes Marques.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Previsão Hidrológica . 2. Mapas de inundação .
3. Danos e prejuízos . I. Marques, Guilherme
Fernandes, orient. II. Título.

EMANUEL DUARTE SILVA

PREVISÃO HIDROECONÔMICA DE CURTO PRAZO COM MODELO DE
REDES NEURAS ARTIFICIAS: APLICAÇÃO À BACIA DO RIO CAÍ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul como
requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em
Regulação e Gestão de Recursos Hídricos.

Aprovado em: Porto Alegre, 12 de novembro de 2019

Prof. PhD. Guilherme Fernandes Marques -UFRGS
Orientador

Prof. PhD. Cristiano Poletto - UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Régis Leandro Lopes da Silva –UFSM
Examinador

Pesquisador Dr. Artur José Soares Matos – SGB/CPRM
Examinador

APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul sob a orientação do Prof. Guilherme Fernandes Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Primeiramente dedico este trabalho ao meus pais Manoel e Maria, por todo o esforço, amor e carinho dedicados a mim que combinados proporcionaram a chegada até esse momento.

Agradeço a todos os professores que colaboraram com a minha formação ao longo da vida, em especial ao meu orientador e ao professor Olavo Pedrollo por toda dedicação e esforço em transmitirem os seus conhecimentos.

Aos amigos que fiz ao longo dessa jornada, que me apoiaram e me ajudaram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

RESUMO

A região hidrográfica do baixo Caí é marcada por cheias recorrentes que impactam diretamente cerca de 100.000 pessoas, diante desse cenário o Serviço Geológico do Brasil – CPRM implantou, em 2010, o Sistema de Alertas Hidrológicos da Bacia do Rio Caí (SAH-Caí), sendo responsável pela emissão de previsões fluviométricas para os municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro. A necessidade de aprimoramento do sistema motivou o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de gerar e integrar previsões fluviométricas, espacialização de áreas inundáveis e estimativas de prejuízos, entregando ao usuário final um prognóstico dos eventos hidrológicos extremos. O presente estudo foi desenvolvido tendo como base três eixos de pesquisa, desenvolvimento de um modelo de previsão fluviométrica, mapeamento de áreas inundáveis para diferentes níveis fluviométricos e estimativa de prejuízos associados a cada região atingida pela cheia. O modelo de previsão fluviométrica foi construído tendo como base os conceitos de aprendizado de máquina através de redes neurais artificiais, que contou com a aplicação de técnica de amostragem sistemática para composição das séries de dados de treinamento, além da aplicação de médias móveis com uso de ponderação temporal exponencial e gama sobre os dados de entrada. Como resultado foram obtidos dois modelos de previsão, com alcances de 20h e 24h, respectivamente, para os municípios de São Sebastião do Caí e de Montenegro, com coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) superiores a 0,9. O mapeamento das áreas inundáveis foi obtido através da compatibilização das referências de nível verticais de um MDT (Modelo Digital de Terreno), de alta resolução, e as seções linimétricas existentes no perímetro urbano desses municípios, resultando na obtenção de manchas de inundação com intervalos de nível de 0,5m, cobrindo uma faixa que vai da cota de início de inundação à cota associada a um TR de 100 anos. A quantificação de danos resultou em estimativas de prejuízos associados a cada nível de inundação e teve como base a adaptação da metodologia utilizada por Fadel (2015). Para a cidade de Montenegro os valores obtidos são da ordem de 12 milhões de reais associados a uma cota de 650 cm chegando a 81 milhões de reais associados a cota de 1000 cm, já para o município de São Sebastião do Caí os prejuízos estimados são da ordem de 7,5 milhões de reais associados a cota de 1100 cm chegando a 64,5 milhões de reais associados a cota 1500 cm. A integração dos dados coletados, nos três eixos de pesquisa, foi realizada no formato de boletim informativo de modo a fornecer um mecanismo de divulgação rápida e de fácil compreensão.

ABSTRACT

The hydrographic region of the lower Caí is marked by recurrent floods that directly impact around 100,000 people, in view of this scenario, the Geological Service of Brazil - CPRM implemented, in 2010, the Hydrological Alert System of the Rio Caí Basin (SAH-Caí), being responsible for issuing fluviometric forecasts for the municipalities of São Sebastião do Caí and Montenegro. The need to improve the system motivated the development of a tool capable of generating and integrating fluviometric forecasts, spatialization of flooded areas and damage estimates, delivering to the end user a prognosis of extreme hydrological events. The present study was developed based on three research axes, development of a fluviometric forecasting model, mapping of floodable areas for different fluviometric levels and estimating the losses associated with each region affected by the flood. The fluviometric forecasting model was built based on the concepts of machine learning through artificial neural networks, which relied on the application of systematic sampling techniques to compose the training data series, in addition to the application of moving averages using exponential and gamma weighting of input data. As a result, two forecast models were obtained, with ranges of 20h and 24h, respectively, for the municipalities of São Sebastião do Caí and Montenegro, with Nash-Sutcliffe (NS) coefficients greater than 0.9. The mapping of the floodable areas was obtained through the compatibility of the vertical level references of a high resolution MDT (Digital Terrain Model), and the linimetric sections existing in the urban perimeter of these municipalities, resulting in the obtainment of flood spots with intervals of 0.5m level, covering a range from the beginning of the flood to the level associated with a TR of 100 years. The damage quantification resulted in damage estimates associated with each flood level and was based on the adaptation of the methodology used by Fadel (2015). For the city of Montenegro the values obtained are of the order of 12 million reais associated with a quota of 650 cm reaching 81 million reais associated with the quota of 1000 cm, whereas for the municipality of São Sebastião do Caí the estimated losses are of 7.5 million reais associated with a quota of 1100 cm, reaching 64.5 million reais associated with a quota of 1500 cm. The integration of the collected data, in the three research axes, was carried out in the format of a newsletter in order to provide a quick and easy to understand dissemination mechanism.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS	5
1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1.1 Objetivos específicos	19
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1 Eventos Hidrológicos Extremos	20
3.1.1 Avaliação econômica de danos causados por inundações	22
3.1.1.1 Aplicação de técnicas de avaliação de perdas econômicas	25
3.2 Sistemas de Alerta Hidrológicos	26
3.3 Modelos Hidrológicos	30
3.3.1 Modelos de Previsão Hidrológica Baseados em Redes Neurais Artificiais	32
3.3.1.1 Considerações sobre o treinamento e aspectos do aprendizado	35
3.3.1.2 Avaliação de desempenho	38
3.3.1.4 Aplicação de RNA's em modelos hidrológicos	40
3.4 Mapas de inundação	41
4. METODOLOGIA	43
4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Caí	44
4.2 Modelo de previsão fluviométrica	47
4.2.1 Dados utilizados	47
4.2.2 Estudos preliminares	49
4.2.2.1 Aplicação de médias móveis	49
4.2.3 Aspectos do Treinamento	51
4.2.4 Avaliação do desempenho	55
4.3 Elaboração das manchas de inundação	55
4.3.1 Base de dados topográficos	56

4.3.2	Determinação de altitudes ortométricas para zeros das réguas	57
4.3.3	Cálculo dos tempos de retorno	58
4.3.4	Processamento do MNT e definição das áreas inundáveis	60
4.3.5	Validação dos mapas gerados	62
4.4	Estimativas de prejuízos	62
4.4.1	Quantificação dos danos	63
4.4.2	Prejuízo total da inundação	69
4.5	Integração de dados em formato de boletins	69
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1	Avaliação do modelo de previsão fluviométrica	72
5.2	Manchas de inundação por limiares de cotas	82
5.3	Prejuízo associado a cada limiar de inundação	85
5.4	Boletim informativo proposto	90
6.	CONCLUSÕES	96
7.	RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
8.	ANEXOS	105
8.1	Resultados das pesquisas preliminares	105
8.2	Resultados da pesquisa por número mínimo de registros utilizados no treinamento	114
8.3	Resultados na pesquisa de complexidade	116
8.4	Avaliação de desempenho dos modelos de previsão	120
8.5	Relatório do posicionamento por ponto preciso e monografia do marco posto 8717000 (Barca do Caí)	122
8.6	Relatório de posicionamento por ponto preciso e monografia do marco posto 87270000 (Passo Montenegro)	125
8.7	Tabela de referência para conteúdo do imóvel padrão	128
8.8	Mapa do Sistema de Alertas Hidrológicos da Bacia do Rio Caí	130

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Análise de frequência de valores de cota máxima anual posto 87170000 (Barca do Caí)	59
Gráfico 2: Análise de frequência de valores de cota máxima anual posto 87270000 (Passo Montenegro)	60
Gráfico 3: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Costa do Cadeia e Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	74
Gráfico 4: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Nova Palmira e Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	74
Gráfico 5: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Barca do Caí e Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	75
Gráfico 6: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	75
Gráfico 7: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Costa do Cadeia e Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	75
Gráfico 8: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Nova Palmira e Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	76
Gráfico 9: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	76
Gráfico 10: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Capão dos Coxos e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	76
Gráfico 11: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto São Vendelino e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.....	77
Gráfico 12: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Nova Palmira e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.....	77
Gráfico 13: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Costa do Rio Cadeia e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	77

Gráfico 14: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Capão dos Coxos e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	78
Gráfico 15: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto São Vendelino e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	78
Gráfico 16: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Nova Palmira e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	78
Gráfico 17: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Passo Montenegro e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.	79
Gráfico 18: Evolução da eficiência do modelo com o aumento do alcance de previsão.	81
Gráfico 19: Total prejuízos estimados para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.	86
Gráfico 20: Prejuízo médio por domicílios estimado para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.	87
Gráfico 21: Prejuízo médio por metro quadrado estimado para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.	87
Gráfico 22: Gráfico 19: Total prejuízos estimados para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.	88
Gráfico 23: Prejuízo médio por domicílios estimado para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.	88
Gráfico 24: Prejuízo médio por metro quadrado estimado para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 3: Curva de danos versus profundidade de submersão.	23
Figura 4: Comparação entre utilização de setores censitários e grade estatística para discretização de uma área.	25
Figura 5: Comparação entre utilização de setores censitários e grade estatística para discretização de dados populacionais uma área de interesse.	25
Figura 6: Esquema de um sistema de monitoramento e previsão.	27
Figura 7: Espacialização das estações do SAH-Caí.	30
Figura 8: Evolução do conceito de neurônio artificial.	33
Figura 9: Representação gráfica das principais funções de ativação.	35
Figura 10: Fluxograma de processo.	44
Figura 1: Bacia do Rio Caí localização espacial.	45
Figura 2: Hidrografia Bacia do Rio Caí.	46
Figura 11: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 14h, no modelo Barca do Caí.	53
Figura 12: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 14h, no modelo Passo Montenegro.	53
Figura 13: Manchas de inundação dispostas por variação de cotas posto Montenegro (87270000).	64
Figura 14: Manchas de inundação dispostas por tempo de retorno respectivamente posto Montenegro (87270000).	64
Figura 15: Manchas de inundação dispostas por variação de cotas posto Barca do Caí (87170000).	65
Figura 16: Manchas de inundação dispostas por tempo de retorno posto Barca do Caí (87170000).	65
Figura 17: fluxograma para determinação de um cenário base	70
Figura 18: delimitação das áreas de inundação por níveis linimétricas para o município de São Sebastião do Caí	83
Figura 19: delimitação das áreas de inundação por níveis linimétricas para o município de Montenegro	84
Figura 20: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 1, 2 e 3.	92
Figura 21: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 4 e 5.	93

Figura 22: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 4 e 5.....	94
Figura 23: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 4h, no modelo Barca do Caí.....	116
Figura 24: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 10h, no modelo Barca do Caí.....	117
Figura 25: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 16h, no modelo Barca do Caí.....	117
Figura 26: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 24h, no modelo Barca do Caí.....	118
Figura 25: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 4h, no modelo Passo Montenegro.....	118
Figura 26: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 10h, no modelo Passo Montenegro.....	119
Figura 27: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 16h, no modelo Passo Montenegro.....	119
Figura 28: : Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 24h, no modelo Passo Montenegro.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ilustração dos componentes de um sistema de alerta de cheias, previsão e resposta a emergências.	28
Tabela 2: Estações telemétricas integrantes do sistema de alertas hidrológico da bacia do rio Caí.....	29
Tabela 3: Postos de monitoramento utilizados na pesquisa.	48
Tabela 4: Valores obtidos pelas distribuições para o posto 87170000 (Barca do Caí) ..	59
Tabela 5: Valores obtidos pelas distribuições para o posto 87270000 (Passo Montenegro)	60
Tabela 6: Critério de divisão de classes socioeconômicas de acordo com a renda familiar.	66
Tabela 7: Características das residências padrão por classe socioeconômica.	66
Tabela 8: Custo unitário básico de construção para cada classe socioeconômica.....	67
Tabela 9: Percentual de dano à edificação dos imóveis padrão, conforma altura de submersão.	67
Tabela 10: Fator de multiplicação para as demais classes socioeconômicas.	68
Tabela 11: Tempo médio de limpeza conforme a profundidade de submersão.	68
Tabela 12: Análise de correlação entre os postos fluviométricos e as estações Barca do Caí e Passo Montenegro; def - defasagem (h), r – correlação.....	72
Tabela 13: Análise de correlação entre os postos pluviométricos e as estações Barca do Caí e Passo Montenegro; def - defasagem (h), r – correlação.....	73
Tabela 14: estatísticas de desempenho da RNA na previsão de níveis para o posto Barca do Caí; NS - Nash-Sutcliffe; E90 – erro no quantil E0,9, Mea – erro médio absoluto, nni- número de neurônios na camada intermediária, alc – alcance da previsão.	80
Tabela 15: estatísticas de desempenho da RNA na previsão de níveis para o posto Passo Montenegro; NS - Nash-Sutcliffe; E90 – erro no quantil E0,9, Mea – erro médio absoluto, nni- número de neurônios na camada intermediária, alc – alcance da previsão.....	80
Tabela 16: Comparação do desempenho, na série de verificação, entre o modelo desenvolvido em 2013 e o em 2018.	82
Tabela 19: Síntese das estatísticas de avaliação de desempenho modelo BC.....	120
Tabela 20: Síntese das estatísticas de avaliação de desempenho modelo PM.....	121

LISTA DE SIGLAS

ABEP – Associação brasileira de empresas de pesquisa;
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA – Agência Nacional de Águas
BC – Posto Barca do Caí
CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais
CENAD – Centro Nacional de Monitoramento de Risco e Desastres
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DATUM - modelo matemático teórico da representação da superfície da Terra ao nível do mar
DEAHRNA – Grupo de pesquisa em desenvolvimento e experimentações com aplicações hidroambientais utilizando redes neurais artificiais
FDP - função de densidade de probabilidade
FIDE - formulário de informações do desastre
GPS – Sistema global de posicionamento
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDT – Modelo Digital de Terreno
Me – Erro médio
Mea – Erro médio absoluto
METROPLAN - Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional
MME - Média móvel com ponderação com decaimento exponencial
MMG - Média móvel com ponderação gama
MMU - Média móvel com ponderação uniforme
NARX - Redes autorregressivas não-lineares com entradas exógenas
NUL - Transformação nula
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
NS - Nash–Sutcliffe
OMM - Organização Meteorológica Mundial
PM – Posto Passo Montenegro
PPP - Posicionamento por ponto preciso

RNA – Rede Neural Artificial

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SACE – Sistema de Alerta de Eventos Críticos

SAH – Sistema de Alertas Hidrológicos

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SIG – Sistema de informações geográficas

SQE - Erros médios quadráticos

TR – Tempo de Retorno

VANT – Veículo aéreo não tripulado

WA - Análises wavelet

1. INTRODUÇÃO

A história do desenvolvimento humano e a distribuição da população ao redor do planeta está marcada pela ocupação de áreas circunvizinhas a fontes e corpos de água. Este padrão de ocupação se dá devido a necessidade da utilização desse recurso, direta ou indiretamente, em praticamente todos os processos que norteiam a vida humana.

A ocupação dessas regiões de forma desordenada, ao longo do tempo, foi responsável pela geração de inúmeros problemas, entre eles as perdas de vidas e bens materiais decorrentes de enchentes, enxurradas e inundações. Dados do Banco Mundial (2012) revelam que apenas em 2010, 178 milhões de pessoas foram afetadas por inundações, com perdas totais que excederam \$40 bilhões. A ocorrência de eventos hidrológicos extremos, num contexto de mudanças climáticas, crescimento demográfico e urbanização, representa um desafio do ponto de vista gerencial requerendo soluções de gestão e gerenciamento de recursos hídricos eficientes e robustas.

De acordo com Tucci (1997), o controle de inundações pode ser abordado por dois conjuntos de medidas, as estruturais (diques, bacias de contenção, canais, barragens) e as não estruturais (sistemas de alerta, zoneamento, controle de ocupação e seguros). No Brasil as medidas estruturais de proteção contra inundações foram priorizadas ao longo de tempo, uma vez que representam soluções consolidadas no meio técnico e entregam resultados de forma imediata a sua conclusão, no entanto algumas desvantagens podem ser associadas a sua utilização, como os elevados custos para implementação e manutenção, que esbarram nas restrições orçamentarias de alguns governos, e o fato de terem um limiar de proteção inerente a qualquer projeto de engenharia, não eliminando, completamente, a possibilidade de ocorrência de inundações.

As medidas não estruturais têm ganhado mais espaço nas políticas públicas de prevenção aos danos decorrentes de eventos hidrológicos extremos, uma vez que requerem a alocação de menos recursos financeiros e implicam em ações que abrangem toda a bacia, minimizando os efeitos das inundações. Sobre outra vertente pretendem melhorar a convivência das populações diretamente atingidas por esses eventos, utilizando-se para isso de sistemas de alertas, mapeamento de áreas inundáveis e planos de evacuação.

Os sistemas de alerta e previsão de cheias são uma das formas recomendadas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para gerenciar ou reduzir os impactos decorrentes de inundações. Segundo Tucci (2007), consistem em sistemas integrados de

aquisição e transmissão de dados em tempo real, associados a modelos matemáticos de previsão em tempo atual e um plano de ações individuais ou coletivas, para reduzir perdas durante as enchentes.

Diante desse cenário, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, alinhado com as diretrizes presentes no Plano Nacional de Gestão de Risco e Resposta a Desastres Naturais e as metas impostas pela casa civil, deu início, em 2010, à expansão de seu programa de implantação e operação de sistemas de alertas hidrológicos, expandindo de três para 16 bacias dotadas de sistemas de monitoramento e previsão em tempo real.

A bacia do rio Caí no Rio Grande do Sul, foi uma das primeiras a integrar o processo de expansão, com cheias do tipo rápidas e duração de alguns dias, distribuídas ao longo de todo o ano, possuem recorrência acentuada, em São Sebastião do Caí, numa análise de 33 anos de dados, de 1984 a 2016, apenas em 2004 e 2006 o rio Caí não atingiu a cota de início de inundação (1000 cm), tendo ocorrido, neste período 91 eventos onde esta cota foi ultrapassada. Em Montenegro, num período de 26 anos, 1991 a 2016, a cota de início de inundação, 600cm, foi ultrapassada 64 vezes. Inicialmente foi implementado o projeto denominado “Aquisição e Operação de um Sistema de Alerta Hidrológico na Bacia do rio Caí”, cujo objetivo foi a instalação e a operação continuada de um sistema de acompanhamento e alerta hidrológico nessa bacia, com previsões de níveis para as cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro. O sistema é composto por oito estações telemétricas, que transmitem dados de chuva e nível, um modelo de previsão fluvial (baseado em redes neurais) e uma plataforma web (SACE) onde é possível visualizar os dados transmitidos e as previsões em tempo real.

Os desempenhos das previsões geradas por esse sistema se mostraram compatíveis tanto diante das estatísticas de verificação quanto em situações práticas de emergência. No entanto, a composição de uma série, consistente, com dados obtidos pela rede telemétrica, de alta resolução temporal, associados ao monitoramento, em tempo real, de eventos extremos ocorridos nos anos de 2015 e 2016, e o desenvolvimento de novas técnicas computacionais de inteligência artificial, possibilitam a reformulação do modelo, de modo a se obter ganhos no tempo de alcance das previsões e melhorias na precisão.

Ao longo da operação do sistema, foram identificadas novas necessidades, em consulta à defesa civil, entidade responsável pela efetiva implementação de medidas de proteção à população local. Foi constatado que a emissão, unicamente, da previsão fluvial, não era suficiente para subsidiar o processo de tomada de decisão, sendo

necessário a mensuração, com mais precisão, da área a ser atingida, bem como a quantificação dos danos causados e o prejuízo financeiro decorrente da inundação.

Com base nessas demandas, na geração de uma nova base de dados e novos recursos computacionais, desenvolvidos em conjunto com o grupo de pesquisa AHRNA (aplicações hidroambientais utilizando redes neurais artificiais), e o financiamento do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, foi proposto no estudo, a reformulação do modelo de operação do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí (SAH-Caí), através do desenvolvimento de um novo modelo de previsão fluvial, elaboração de mapas de inundação e estimativas de prejuízo financeiros para cada nível de inundação mapeado.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade de um modelo integrado de previsão, capaz de prever níveis, áreas atingidas e prejuízos econômicos decorrentes de inundações, para diversos períodos de antecedência, que auxilie na tomada de decisão da defesa civil, nas cidades de Montenegro-RS e de São Sebastião do Caí-RS.

2.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo do estudo, foram elaborados os objetivos específicos, descritos a seguir:

- Determinar uma arquitetura, arranjo de dados de entrada, método de treinamento, complexidade de rede e análises de eficiência, que possibilitem a constituição de uma rede neural artificial capaz de realizar previsões fluviométricas para os postos de monitoramento 87170000 (Barca do Caí) e 87270000 (Passo Montenegro), em diferentes períodos de antecedência;
- Elaborar mapas de inundações para diferentes níveis de cheia até as maiores cotas observadas;
- Realizar estimativas de prejuízo financeiro associado a cada limiar de inundação;
- Comparar o desempenho do modelo de previsão fluviométrica atual e o proposto;
- e,
- Propor modelo de entrega dos resultados para a defesa civil.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Eventos Hidrológicos Extremos

Os termos mais recorrentes para denominar eventos hidrológicos extremos ligados ao regime fluvial são enchentes, inundações e enxurradas. Segundo Tucci (2007) em situações de precipitação intensa o volume de água que atinge o corpo hídrico pode superar sua capacidade de drenagem, extrapolando a sua calha normal e inundando áreas ribeirinhas, a essa dinâmica denominamos enchentes, eventos de alta magnitude em áreas densamente povoadas podem acarretar em significativas perdas econômicas e sociais.

De acordo com Oliveira (2010) o termo inundação é comumente utilizado como sinônimo de enchentes, no entanto essa terminologia deve ser empregada para denominar o extravasamento do leito menor de um corpo hídrico para sua planície de inundação, caracterizando um evento de proporções maiores.

Goerl (2005) classifica as inundações em dois tipos, graduais (*flood*) e bruscas (*flash flood*), na primeira a elevação do nível do corpo hídrico e seu transbordamento acontecem de forma lenta enquanto na segunda a elevação do nível no corpo hídrico e o transbordamento na calha ocorrem repentinamente no tempo próximo ao momento da ocorrência do evento que as originou, estão geralmente associadas a regiões de relevo acidentado, algumas organizações como a NOAA (2009) e WMO (1994) estabelecem um limiar de tempo de concentração de aproximadamente 6h para diferenciação dos dois tipos de eventos, no entanto outros fatores (precipitação antecedente, uso e ocupação do solo, cobertura vegetal) devem ser levados em consideração para classificação em cada localidade. É importante destacar que a Defesa Civil Nacional possui um sistema de registro para cada tipo de inundação, sendo necessária à sua correta distinção, essas informações integraram o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres que é uma importante fonte de informação para ações governamentais e pesquisas científicas.

Castro (2003) classifica os desastres naturais relacionados ao incremento das precipitações hídricas e as inundações em função da sua evolução em quatro tipos, enchentes ou inundações graduais, enxurradas ou inundações bruscas, alagamentos e inundações litorâneas provocadas pela brusca invasão do mar. Nas inundações graduais as águas elavam-se de forma suave, mantendo-se em situação de cheia durante algum tempo e escoam gradualmente em seguida. As enxurradas ou inundações bruscas, geralmente são provocadas por chuvas intensas e concentradas, em regiões de relevo

acidentado, caracterizam-se por apresentarem elevações abruptas dos níveis dos rios, escoando de forma rápida e intensa, já os alagamentos são resultado de água acumulada nas vias urbanas em virtude de fortes precipitações associadas a um sistema de drenagem ineficiente.

Devemos entender os processos descritos acima como eventos de cunho natural, fazem parte da dinâmica ambiental de uma região, estando intimamente ligados aos ciclos biológicos de diversas espécies, bem como aos processos geomorfológicos e hidrológicos atuantes em uma bacia hidrográfica, são processos altamente complexos, pois envolvem uma infinidade de variáveis. A ocupação humana e o desenvolvimento de suas atividades (rural e urbana), tem consequências diretas na alteração dessa dinâmica ambiental, a impermeabilização do solo, retificação de canais, desmatamento, tem impacto direto no regime fluvial de uma bacia hidrográfica, para Tucci (2007) a perda da cobertura vegetal natural para uso agrícola tem produzido o aumento da frequência de inundações, uma vez que essa vegetação atua para interceptar parte da precipitação que gera escoamento e protege o solo contra erosão evitando o assoreamento dos corpos hídricos.

A expansão e o adensamento urbano realizados de forma desorganizada, vivenciados nas últimas décadas, propiciou a ocupação de áreas de risco, situadas no leito maior dos rios, regiões que naturalmente são inundadas em decorrência da dinâmica natural da drenagem da bacia na qual estão inseridas. No Brasil o efeito da expansão urbana acelerada associada a especulação imobiliária, desigualdade social e falta de memória das cheias (efeito decorrente da distribuição irregular dos episódios de cheia ao longo dos anos), propiciou a ocupação dessas áreas, dados do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013) revelam que entre os anos de 1991 a 2012 foram registrados 4.691 casos de inundações severas, representando 12% do total de ocorrências de desastres no Brasil.

Diversas medidas podem ser adotadas para minimização dos efeitos das inundações, sejam de caráter estrutural (obras de engenharia) ou não estruturais que perpassam por uma gestão eficiente do uso do solo nas regiões rurais, aumentando a retenção de água na bacia o que resultaria na diminuição da magnitude desses eventos, a restrição da ocupação das planícies de inundação, que resultaria na redução das perdas materiais, até a implementação de sistemas de alerta de inundações, com a finalidade de remoção de populações e bens, com antecedência suficiente para minimizar perdas de vidas e danos materiais.

3.1.1 Avaliação econômica de danos causados por inundações

As inundações em áreas urbanas provocam grandes impactos sociais e econômicos, demandando onerosos trabalhos de reconstrução da infraestrutura e a reposição de bens moveis e imóveis. Os impactos decorrentes desses eventos dependem do grau de ocupação da área de várzea, impermeabilização do solo, eficiência da rede de drenagem, bem como da vulnerabilidade das edificações.

Os danos causados podem ser classificados como tangíveis e intangíveis e em um segundo nível em diretos e indiretos, sendo os tangíveis passíveis de mensuração em termos monetários. Dentro dessa classificação pode-se considerar os danos resultantes do contato direto com a água como diretos (danos físicos a estruturas e equipamentos), enquanto que os decorrentes da interrupção de atividades sociais e econômicas (limpeza, perda de lucros) são denominados indiretos (JANOV, 2013). Segundo Cançado (2009) como a análise global dos danos envolve essas duas dimensões, estoques e fluxos, respectivamente diretos e indiretos, é comum termos sobreposições de valores e erros de cálculo.

Segundo Fadel (2015), para se quantificar os danos decorrentes de uma inundação é necessário realizar, previamente, um inventário dos possíveis danos na região e seu prejuízo associado, para que posteriormente se possa relacionar os prejuízos inventariados a um determinado evento, consistindo em uma das fases da pesquisa que demanda mais esforço. Para Machado (2005) e Cançado (2009) a avaliação de impactos sócio-econômicos de inundações pode ser realizado por alguns procedimentos metodológicos distintos, métodos microeconômicos baseados em mercados reais (método dos preços hedônicos ou método de valor esperado) ou hipotéticos (método da valoração contingente), sendo os mais comumente utilizados para análise de danos decorrentes de inundações, ambos tem como princípio a premissa de que o mercado é capaz de incorporar o risco das inundações, sendo a análise hedônica (método conceitual) baseada na disponibilidade que um mercado real tem a pagar sobre os danos decorrentes de uma inundação em determinados setores (custos de manutenção, recuperação e reposição do espaço construído e de seu conteúdo), sinteticamente a diferença de valores entre imóveis, similares, situados em regiões inundáveis ou não, poderia ser considerado como o custo de uma inundação, esse método apresenta a desvantagem das incertezas em se atribuir as diferenças de valores de mercado de bens imóveis a causas relacionadas a prejuízos com inundações.

No método da valoração contingente (método conceitual), a disponibilidade a pagar por medidas de proteção contra inundações em um cenário hipotético por uma população poderia ser considerada o custo da inundação. Ambos os métodos, supracitados, estão atrelados à memória da população diretamente afetada pelos eventos hidrológicos extremos na região o que pode ocasionar distorções na avaliação.

Dentro do conceito de mercados reais, o método de valor esperado (avaliação direta) pode ser descrito como a relação entre as características de um evento extremo (profundidade de submersão, duração e velocidade de escoamento) e seus respectivos danos, essa correlação pode ser realizada através da realização de inventários contendo uma descrição detalhada dos impactos gerados por uma inundação em uma zona sinistrada (avaliação *a posteriori*) ou construindo cenário de danos a partir do levantamento de um conjunto de patologias decorrentes de inundações (MACHADO, 2005).

Ainda segundo Machado *et al.* (2005), a relação de danos com as variáveis hidráulicas associadas à inundação, como a profundidade, pode ser explicitada na forma de uma curva de danos versus profundidade sendo a sua construção trabalhosa em virtude da variabilidade dos danos expostos (Figura 3). A sua construção pode-se dar a partir de dados reais obtidos em zonas sinistradas (*a posteriori*) ou a partir de estimativas hipotéticas (*a priori*).

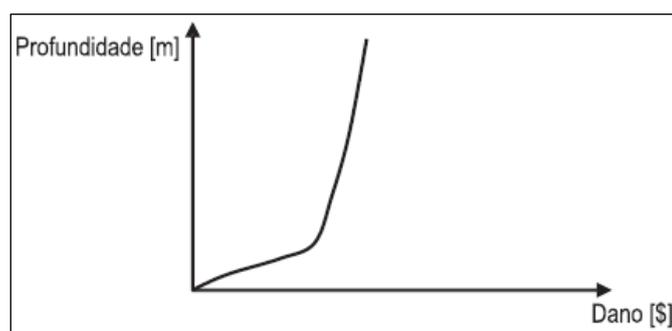


Figura 1: Curva de danos versus profundidade de submersão.
Fonte: Machado (2007)

Fadel (2015) relaciona os danos por inundação a quatro fatores: qualidade da edificação, área construída, estado de conservação da edificação e conteúdo das áreas atingidas, bem como relaciona as características desses fatores ao poder aquisitivo dos moradores os subdividindo em cinco classes socioeconômicas segundo o Critério Brasil (ABEP, 2015). Para fins de realização desse estudo esses critérios foram atualizados conforme a última publicação da ABEP para o ano de 2016. Ainda segundo Fadel (2015)

os prejuízos as edificações podem ser estimados através dos custos de reforma de imóveis atingidos por inundações para quatro padrões construtivos (alto, normal, baixo e proletário) que se subdividem em mais nove itens (revestimento das paredes internas e externas, cozinha e banheiros, os pisos e acessórios para a cozinha e os banheiros e o material predominante de portas e janelas), com relação ao detalhamento dos danos ao conteúdo, pode ser realizado pela quantidade, tipo, qualidade e idade de bens duráveis atingidos e a profundidade a que foram expostos, relacionados, por sua vez, à classe socioeconômica da unidade familiar determinada pelo Critério Brasil.

Diante da complexidade de se realizar um inventário de danos a edificações e conteúdo de forma detalhada para cada imóvel atingido, Tachini (2010) propôs uma abordagem sintética, onde se considerou um imóvel padrão (unifamiliar e de um pavimento) como unidade padrão para a base de cálculo.

A quantificação da população atingida é proporcional à área inundada e os danos, por sua vez, proporcionais a essa população. Desse modo, é de suma importância a discretização da região em estudo, levando-se em consideração a disponibilidade de dados e o nível de detalhamento que se quer obter. Fadel (2015) e Tachini (2010) utilizaram como unidade padrão para discretização de suas áreas de estudo o setor censitário estipulado pelo IBGE. No entanto, segundo Brasil (2016), dificilmente haverá coincidência entre unidades para as quais existem divulgação de dados populacionais (unidades político-administrativas ou setores censitários) e uma região específica de estudo, sendo recomendável a utilização da grade estatística (matriz de dados composta de células de 1 km x 1 km na área rural e de 200m x 200m na área urbana, contendo dados de população residente, sexo e número de domicílios), para fins de quantificação populacional e número de residências em uma área de estudo. Algumas vantagens para a utilização desse método para a discretização de uma área de estudo podem ser elencadas:

- a) A grade estatística se mantém estável e fixa no espaço e no tempo, já que é uma unidade artificial, enquanto as unidades tradicionalmente utilizadas para disseminação dos dados do censo podem se alterar ao longo do tempo, facilitando a realização de estudos comparativos temporais;
- b) Adaptação a quaisquer recortes físicos devido às suas pequenas dimensões, facilitando a integração com dados físicos e geográficos;
- c) As células podem ser agregadas para formar células maiores e se adequar a estudos em diferentes escalas;

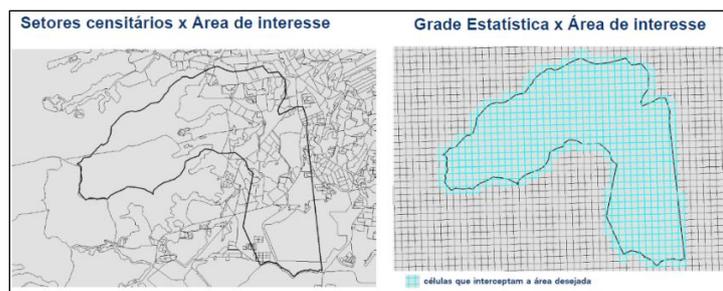


Figura 2: Comparação entre utilização de setores censitários e grade estatística para discretização de uma área.

Fonte: Adaptado de IBGE (2016).

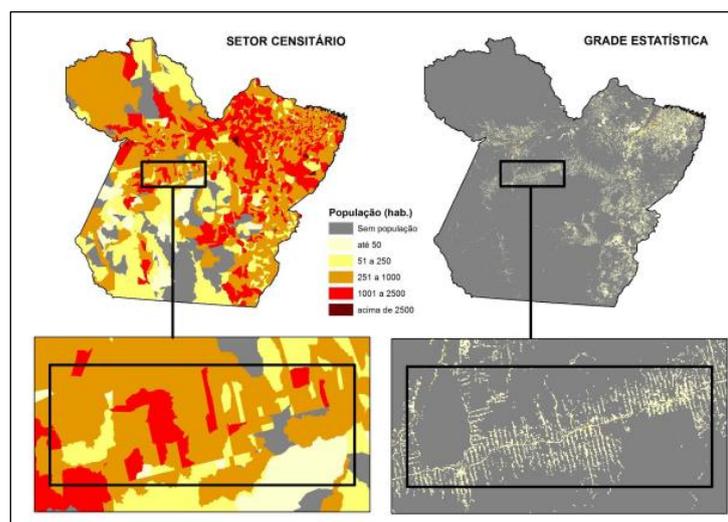


Figura 3: Comparação entre utilização de setores censitários e grade estatística para discretização de dados populacionais uma área de interesse.

Fonte: Adaptado de IBGE (2016).

3.1.1.1 Aplicação de técnicas de avaliação de perdas econômicas

Diversos pesquisadores têm desenvolvido metodologias para a avaliação de danos econômicos decorrentes de inundações e outros eventos naturais críticos. Os métodos empregados, comumente, apresentam uma mescla de outras técnicas e campos de pesquisa, como a modelagem hidrológica, hidráulica, mapeamento em ambiente SIG, valoração econômica, entre outras.

Jamali et al. (2018) utilizou um modelo de inundação pluvial urbana (RUFIDAM), para estimar a extensão, profundidade e danos de inundações em Melbourne, para tanto foram utilizados dados topográficos com resolução de 1 metro como entrada, com a finalidade de identificação das áreas potencialmente atingidas, utilizando posteriormente o método da curva de profundidade x dano, previamente calibradas, para estimativa dos danos associados.

Costache (2015) utilizou integração de técnicas de SIG e modelagem hidráulica, para simular uma inundação e sua área de extensão, sendo possível identificar o número de edifícios e estradas afetadas e quantificar os danos a infraestrutura, com base em um valor médio unitário para edificações e por km de rodovia afetada, previamente calculado pelo Ministério da Água e Meio Ambiente da Romênia.

Kreibich e Thielen (2008), observando que a quantificação de prejuízos decorrentes de inundações na Austrália, é estimada tendo como base, comumente, o tipo de edificação e a profundidade a que são submetidos, propôs a interação como outros fatores, como, velocidade do fluxo, contaminação da água e medidas de precaução previamente adotadas, utilizando um modelo híbrido baseado em árvore de decisão e inteligência artificial para integração e análise dados.

Na pesquisa desenvolvida por Jeon, Eem e Park (2018) foram estabelecidos cenários, para quantificação de danos gerados por inundações costeiras, em diferentes níveis de submersão. Para tanto, utilizou-se um ambiente e ferramentas SIG para determinação da extensão e profundidade da maior inundação já registrada pela Agência Hidrográfica e Oceanográfica da Coreia do Sul. A estimativa de perdas foi realizada através da integração dos dados cartográficos com o modelo de análise multidimensional de danos causados pelas inundações (MD-FDA).

3.2 Sistemas de Alerta Hidrológicos

Os sistemas de alerta contra inundações são uma maneira consolidada para redução dos riscos à vida humana, além de permitirem que comunidades e serviços de emergência se preparem para esses eventos protegendo bens e propriedades. Os sistemas informais de alerta contra inundações existem desde que as pessoas começaram a viver e trabalhar perto de rios e costas. Chuvas fortes, níveis elevados de rios, estados do mar incomuns e outras pistas, como o som de água corrente, fornecem informações úteis sobre inundações iminentes, para métodos tradicionais de alertas que incluem o boca-a-boca, mensageiros e o levantar de bandeiras para sinalizar tempestades. Estas abordagens ainda têm um papel valioso a desempenhar, particularmente onde as inundações se desenvolvem rapidamente, e as comunidades devem confiar em seus próprios recursos para a resposta inicial (SENE, 2008).

Segundo Pedrollo (2011), um sistema de previsão e alerta tem como objetivo central a antecipação da ocorrência da inundação, possibilitando que as autoridades competentes e a população tomem decisões e realizem ações que propiciem a redução dos prejuízos decorrentes de eventos extremos, sendo composto por três fases: (1) coleta e transmissão de informações; (2) recepção e processamento de informações; (3) divulgação e emissão de alerta às autoridades envolvidas no gerenciamento de situações de risco.

A composição é ilustrada na figura 06:

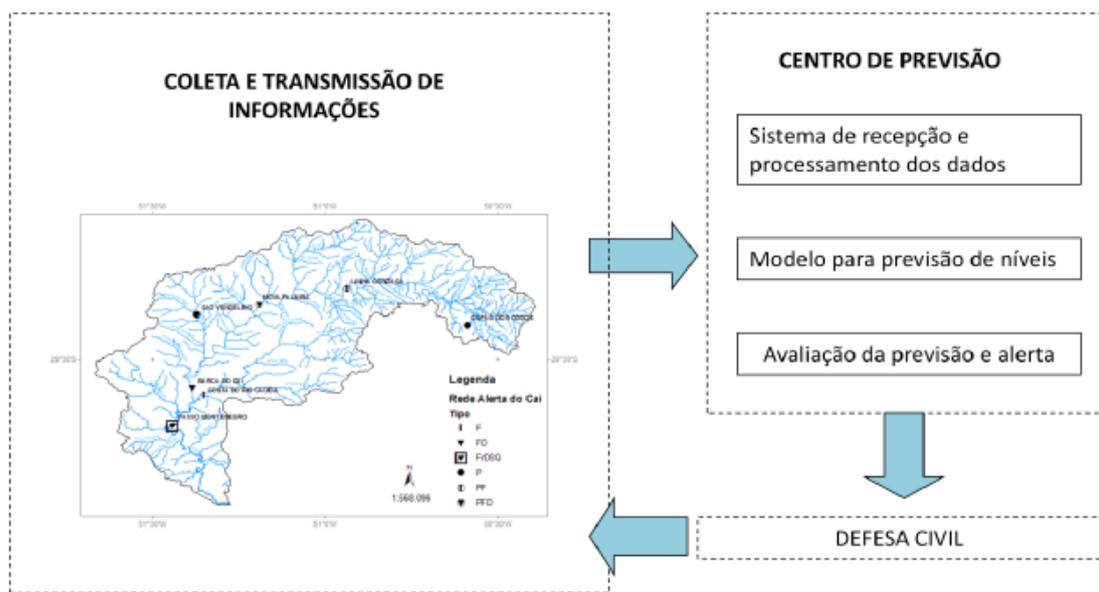
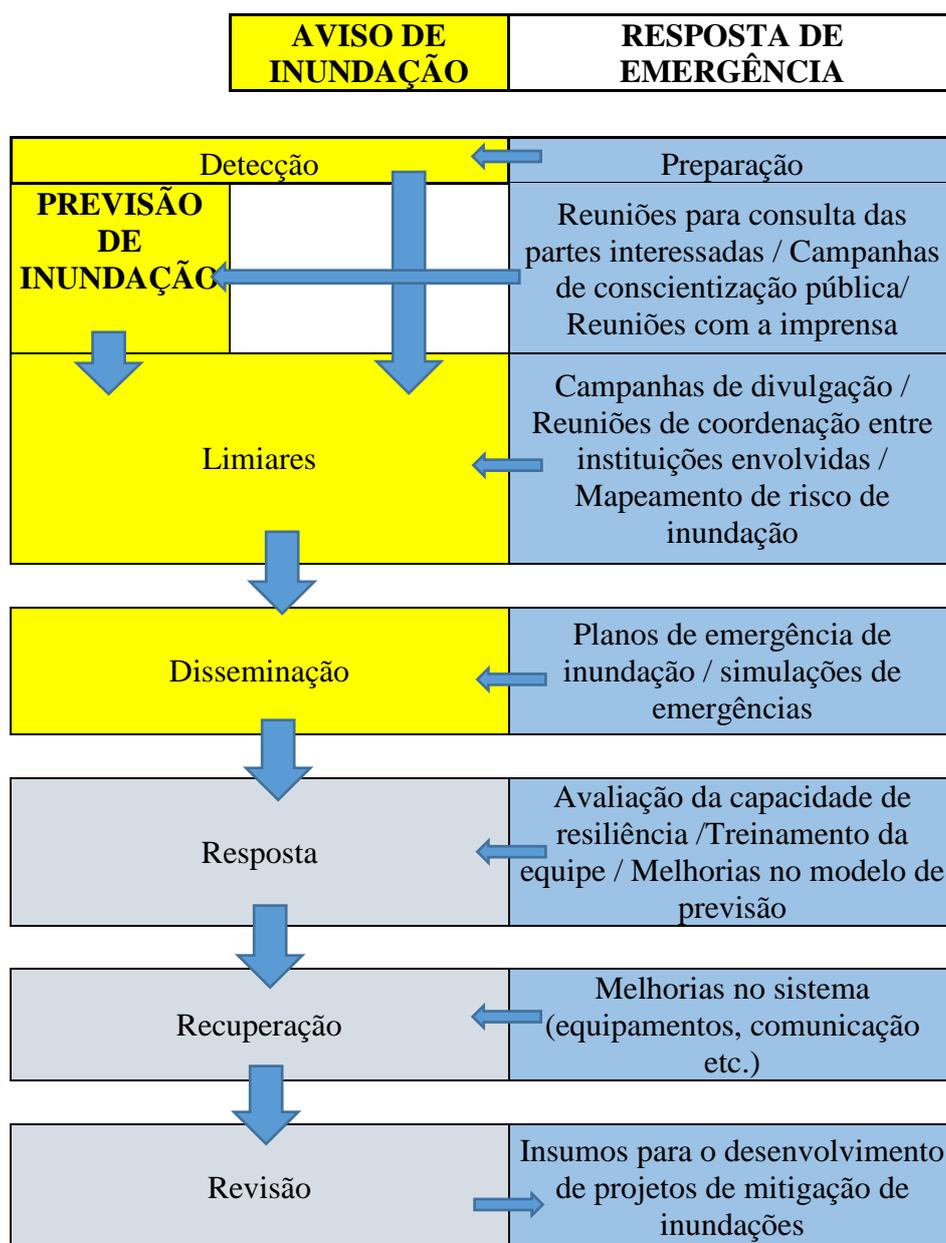


Figura 4: Esquema de um sistema de monitoramento e previsão.
Fonte: Pedrollo (2011).

Sene (2008) subdividiu, de forma geral, as fases e os componentes de um sistema de alertas de cheias e as atividades de resposta à emergência, associados a cada etapa, conforme descrito na tabela 01.

Tabela 1: Ilustração dos componentes de um sistema de alerta, previsão e resposta a emergências de inundações.



Fonte: Adaptado de Sense (2008).

Para Oliveira (2010) a implementação e o aperfeiçoamento de sistemas de previsão de inundações se configuram nas medidas não-estruturais mais importantes para minimização dos prejuízos decorrentes de eventos hidrológicos extremos, uma vez que reduzem drasticamente as perdas de vidas e os danos materiais, ainda que não solucione o conflito existente da ocupação humana de áreas ribeirinhas (de risco) onde o processo de inundação é natural.

Ainda segundo Pedrollo (2011) a implantação de um sistema de monitoramento e previsão de inundações constitui-se das seguintes etapas:

- a) Definição dos pontos de monitoramento;
- b) Aquisição de equipamentos de coleta e transmissão de dados;
- c) Instalação da infraestrutura dos equipamentos e central de aquisição e processamento de dados;
- d) Elaboração de modelos para a previsão de níveis;
- e) Acompanhamento contínuo da situação e dos resultados do modelo.

Adicionalmente a essas etapas podemos incluir o mapeamento de áreas inundáveis e a manutenção sistemática dos equipamentos de aquisição de dados.

Apesar de ainda não serem amplamente utilizados no País, diversos sistemas de alertas hidrológicos se encontram em operação ou em fase de implementação. Podemos destacar os 16 sistemas operados pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, sendo 14 em fase de operação plena e dois em fase de testes, abrangendo bacias com diferentes características fisiográficas e múltiplas soluções de monitoramento e previsão.

Outro sistema em operação, há mais de uma década, no Brasil, é o de alerta de cheias da bacia do Itajaí, de responsabilidade do CEOPS - Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Itajaí, realizando previsões de nível para a cidade de Blumenau-SC.

O sistema de alerta hidrológico da bacia do rio Caí, Figura 07, objeto deste trabalho, teve estudos, para implementação, iniciados em 2009. As instalações físicas e o desenvolvimento do modelo de previsão ocorreram ao longo dos anos de 2010 e 2011, tendo a emissão de boletins de alerta iniciado em 2012. Desde então, o sistema continua operando sem interrupções, tendo sido responsável pelo monitoramento e a emissão de alertas para dois dos maiores eventos de inundações que se tem registro na história dessa bacia, ocorridos em 2015 e 2016 respectivamente. É composto, atualmente, por oito estações automáticas, com transmissão de dados via satélite, sendo seis de monitoramento fluviométrico e pluviométrico e duas de monitoramento exclusivamente pluviométrico, conforme tabela 02. Apenas no ano de 2018 foram emitidos 51 boletins de alertas. Em 2015 esse número chegou a 98.

Tabela 2: Estações telemétricas integrantes do sistema de alertas hidrológico da bacia do rio Caí

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	MUNICÍPIO	Coordenadas Geográfica	TIPO
87270000	PASSO MONTENEGRO	Montenegro - RS	29°42'3.97"S / 51°26'24.68"O	PFT
87170000	BARCA DO CAÍ	São Sebastião do Caí - RS	29°35'24.35"S / 51°23'0.80"O	PFDQT
87230000	COSTA DO RIO CADEIA	São Sebastião do Caí - RS	29°35'23.88"S / 51°18'49.15"O	PFDQT

87168000	SÃO VENDELINO	São Vendelino - RS	29°22'58.92"S / 51°22'7.46"O	PFDQT
87160000	NOVA PALMIRA	Caxias do Sul - RS	29°20'7.31"S / 51°11'20.50"O	PFDQT
87150000	LINHA GONZAGA	Caxias do Sul - RS	29°18'26.71"S / 50°59'46.32"O	PFDQT
02950045	CAPÃO DOS COXOS	São Francisco de Paula - RS	29°24'31.82"S / 50°35'3.75"O	PT
02951142	MORRO REUTER	Morro Reuter - RS	29°31'44.47"S / 51° 2'12.13"O	PT

O tipo de estação obedece à seguinte codificação:

P – Pluviométrica;

F – Fluviométrica;

D – Com medição de descarga líquida;

Q – Com determinação de parâmetros de qualidade da água;

T – Transmissora de dados.

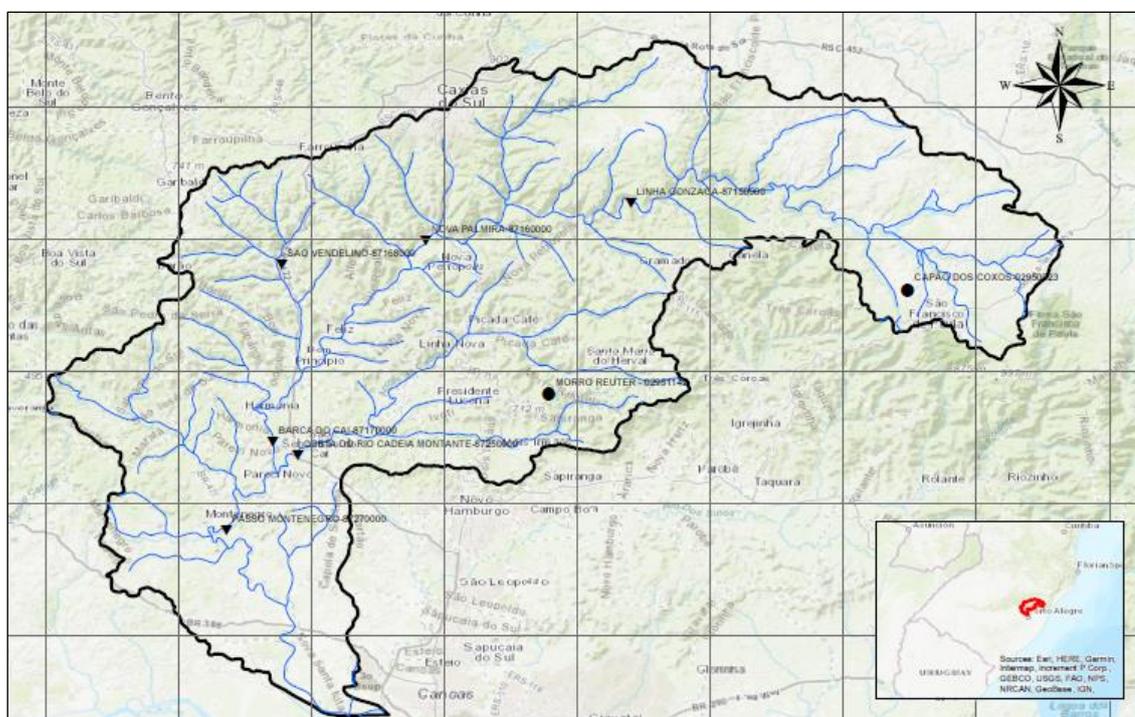


Figura 5: Espacialização das estações do SAH-Caí.
Fonte: Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2019).

3.3 Modelos Hidrológicos

Previsões de níveis fluviais confiáveis são essenciais para o gerenciamento de situações de risco relacionadas a inundações, seja para o desenvolvimento de ações preventivas, como a remoção e realocação de populações e bens, bem como

dimensionamento de equipes de limpeza e reparos. Essas previsões podem ser obtidas através do modelamento do comportamento da bacia ou de um corpo hídrico específico.

O modelo hidrológico é a representação de um sistema (bacia hidrográfica), em uma linguagem acessível, haja vista a complexidade dos fenômenos naturais envolvidos na sua dinâmica, para melhor representar o seu comportamento e prever condições não compreendidas entre as observadas, podendo ser utilizado para se antecipar a eventos específicos como as inundações (TUCCI, 2005).

Os modelos podem ser classificados de acordo com as suas variadas características, sendo que, de forma geral, a literatura os costuma classificar em empíricos e conceituais (KAMPF, 2007; TUCCI, 2005; XU, 2002).

Nos modelos conceituais os processos físicos são levados em consideração durante a sua elaboração. Alguns autores os subdividem em duas categorias: semi-conceituais e físicos. Os primeiros aproximam os mecanismos físicos gerais que governam os processos hidrológicos, mas mantêm um grau de empirismos nos parâmetros das equações envolvidas. O segundo grupo tem como premissa a resolução das equações que expressam a conservação de massa, momento e energia e, portanto, requerem uma quantidade significativa de dados (KAMPF E BURGESS, 2007). Já os modelos empíricos utilizam funções, comumente sem relação com os processos físicos envolvidos, com a finalidade de ajustar os valores calculados aos dados observados.

Quando levamos em consideração a discretização espacial, os modelos hidrológicos podem ser subdivididos em concentrados e distribuídos. Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial, ao passo que é classificado como distribuído quando as suas variáveis e parâmetros dependem do espaço. Na prática não existem modelos puramente distribuídos, uma vez que são necessárias discretizações de um fenômeno, para sua representação, mesmo que em pequenas escalas.

De forma geral, tanto os modelos conceituais e quanto os empíricos podem ser classificados em estocásticos e em determinísticos. Se o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo esse é considerado estocástico, ao passo que se o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades o modelo é dito ~~como~~ determinístico.

O gerenciamento de situações de risco é um campo multidisciplinar, envolvendo diversas instituições e profissionais. O processo de tomada de decisão nessas ocasiões é complexo, uma vez que é necessário levar em consideração um grande número de variáveis, cenários e alternativas, a constituição de um modelo que possibilite antever

esses cenários, como modelos de previsão de níveis associados a mapas de inundação e estimativas de danos, se configuram como importantes ferramentas de gerenciamento, para que sejam tomadas as decisões que melhor atendam aos anseios da sociedade.

3.3.1 Modelos de Previsão Hidrológica Baseados em Redes Neurais Artificiais

Como explanado anteriormente, é possível separar os modelos de previsão hidrológica em dois tipos básicos, os modelos de base física e os modelos puramente empíricos. Redes neurais artificiais são modelos empíricos, estruturados de forma a reproduzir o funcionamento esquemático dos sistemas nervosos biológicos, sendo capazes de aprendizado quando submetidos a treinamento, memorização e resposta a estímulos (Pedrollo, 2013).

As redes neurais artificiais vem sendo empregadas na solução de inúmeros problemas de engenharia e ciências, devido à sua alta capacidade de modelagem de processos de difícil obtenção por técnicas convencionais. Nesse espectro se enquadram os sistemas de previsão, onde seu objetivo consiste em mapear o relacionamento funcional entre as variáveis de um sistema, a partir de um conjunto previamente conhecido de valores representativos, a fim de se estimar valores futuros (SILVA, 2016).

McCullosh e Pitts (1943) desenvolveram o primeiro modelo matemático inspirado no neurônio biológico, introduzindo o conceito de neurônio artificial, que pode ser representado pela soma ponderada de entradas (estímulos), submetida a uma função que tem como finalidade modificar o resultado, para que corresponda à resposta desejada, à medida que parâmetros (pesos sinápticos) associados às entradas sejam alterados. Hebb (1949) desenvolveu o primeiro método de treinamento para redes neurais artificiais, denominado de regra de aprendizado de Hebb. A primeira aplicação prática desses conceitos foi o desenvolvimento do primeiro neurocomputador, capaz de reconhecer padrões simples, denominado Mark I – *Perceptron*, idealizando o modelo básico do *Perceptron*, por Rosenblatt (1958).

Widrow e Hoff (1960) desenvolveram um tipo de rede denominada *Adaline* (*ADaptive LINear Element*), posteriormente introduzindo a *Madaline* que é uma rede, *Adaline* múltipla, com aprendizado baseado no algoritmo LMS (*lest mean square*), mais conhecido como regra Delta. A partir dos anos 80, as pesquisas nessa área ganharam reforço com o desenvolvimento de computadores com maior poder de processamento e as novas descobertas sobre o sistema nervoso biológico, bem como o desenvolvimento

de um algoritmo que permitia ajustar pesos em uma rede com mais de uma camada por Rumelhart et al. (1986), intitulado método retropropagativo. Ainda nessa década, Hecht-Nielsen (1987) introduz um teorema que estabelece que, para qualquer relação contínua com n entradas e m saídas, existe sempre uma rede neural progressiva com apenas uma camada interna de $2n+1$ neurônios, capaz de aproximá-la.

O neurônio artificial adotado atualmente é uma evolução do proposto por McCulloch e Pitts (1943), podendo-se o descrever de forma sintética, segundo Haykin (1994), em três conjuntos de elementos básicos (figura 08):

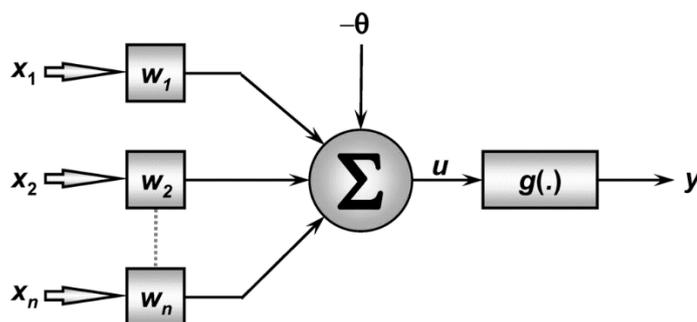


Figura 6: Evolução do conceito de neurônio artificial.
Fonte: Adaptado de Silva (2016).

1. Conjunto de sinapses (sinais de entrada (x_1, x_2, \dots, x_n) e pesos sinápticos (w_1, w_2, \dots, w_n) – Os sinais ou medidas advindas do meio externo e que representam os valores assumidos pelas variáveis de uma aplicação específica. Os sinais de entrada são usualmente normalizados visando incrementar a eficiência computacional de algoritmos de aprendizagem. Os pesos sinápticos podem assumir valores positivos ou negativos e servirão para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede, permitindo-se quantificar as suas relevâncias em relação à funcionalidade do respectivo neurônio. São obtidos a partir de um processo de treinamento, feito a partir de amostragem.
2. Combinador linear $\Sigma = (x_1 * w_1 + x_2 * w_2 + \dots + x_n * w_n)$ – Sua função é agregar todos os sinais de entrada que foram ponderados pelos respectivos pesos sinápticos a fim de produzir um valor de entrada líquida.
3. Função de ativação ou transferência (g) e Saídas (y) – A finalidade da função de ativação é alterar a saída de um neurônio a partir de transformações não lineares dotando à rede da capacidade de simular inúmeros fenômenos. As saídas consistem de valores produzido pelo neurônio em relação a um determinado conjunto de sinais de entrada, podendo serem também utilizado

por outros neurônios que estão sequencialmente interligados. Os valores das saídas estão, geralmente, limitados a intervalos fechados de $[0,1]$ ou $[-1,1]$.

As duas expressões seguintes sintetizam os elementos apresentados:

$$u = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i - \theta$$

$$y = g(u)$$

Desta forma, segundo Silva (2016), podemos sintetizar o funcionamento de um neurônio artificial da seguinte forma:

- a) Apresentação de um conjunto de valores que representam as variáveis de entrada;
- b) Multiplicação de cada entrada pelo seu respectivo peso sináptico;
- c) Obtenção do potencial de ativação produzido pela soma ponderada dos sinais de entrada;
- d) Aplicação de uma função de ativação apropriada, tendo-se como objetivo limitar a saída do neurônio;
- e) Compilação da saída a partir da aplicação da função de ativação.

As principais funções de ativação são descritas por Kasabov (1996), como sendo:

1. Limiares ou também conhecidas como degrau - Resultam em saídas 0 ou 1;
2. Funções lineares – Utilizam transformações lineares que produzem resultados de saída idênticos aos valores do potencial de ativação;
3. Funções sigmoidais (tangente hiperbólica e logística) - O resultado pode assumir valores entre 0 e 1 (logística ou bipolar) e -1 e 1 (tangente hiperbólica ou bipolar). São as principais funções de ativação utilizadas nas RNA's, se caracterizando por serem não lineares.

Também é utilizada a função gaussiana, onde a saída do neurônio produzirá resultados iguais para aqueles valores de potencial de ativação que estejam posicionados a uma mesma distância de seu centro.

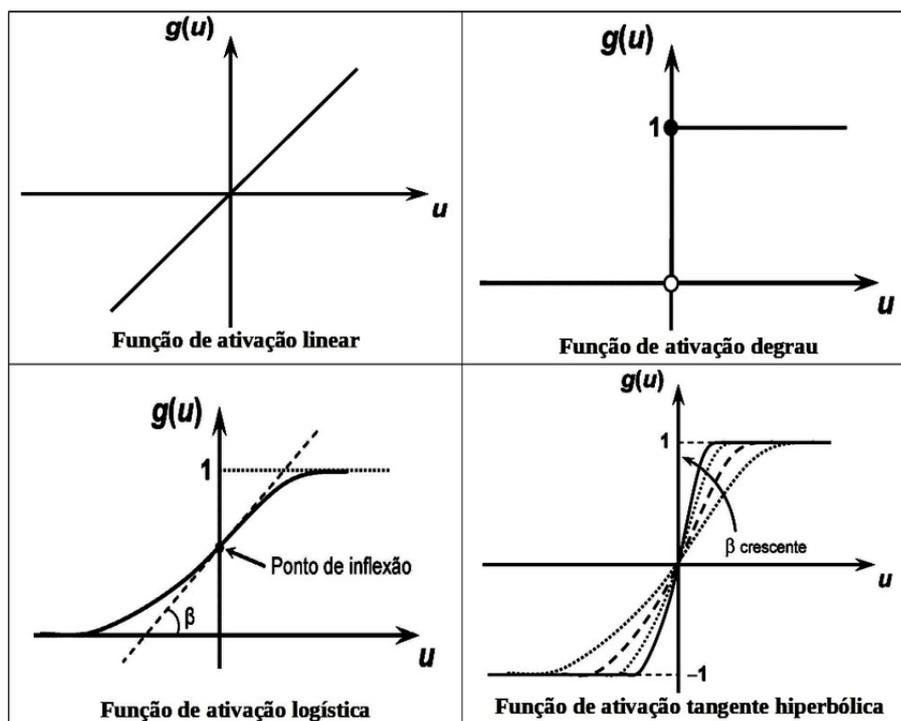


Figura 7: Representação gráfica das principais funções de ativação.

3.3.1.1 Considerações sobre o treinamento e aspectos do aprendizado

O aspecto mais importante quando tratamos da aplicação de RNA's em modelos preditivos é a capacidade de aprender a partir do relacionamento de um conjunto de amostras, de entrada e saída, que representam o comportamento de um sistema. Após este aprendizado a RNA é capaz de generalizar soluções a partir de quaisquer sinais inseridos em suas entradas. Sob esse conceito básico podemos fazer algumas considerações a respeito de métodos de treinamento e aspectos indesejados do processo.

Segundo Silva (2016) normalmente o conjunto de amostras disponíveis é subdividido em dois grupos, o subconjunto treinamento, contendo de 60 a 90% das amostras totais, que é utilizado para o processo de treinamento e o subconjunto teste, contendo de 10 a 40% das amostras restantes, utilizado para verificar se a generalização das soluções do modelo estão em patamares aceitáveis. Veremos adiante que para esse estudo foram utilizadas proporções diferentes do convencionalmente adotado.

De modo geral é necessário realizar o escalonamento das series de dados a serem utilizadas durante o treinamento, principalmente quando da utilização de series temporais diferentes, evitando que séries com variáveis de maior magnitude gerem tendências não desejadas durante o processo.

O treinamento supervisionado é uma técnica amplamente utilizada no aprendizado de máquina, consistindo na comparação, em tempo real, das saídas produzidas, durante o treinamento (calculadas), a dados observados (reais), desse modo os pesos sinápticos podem ser ajustados durante o processo, de forma a minimizar os erros gerados. Para esse tipo de treinamento podemos utilizar a regra delta, proposta por Windrow e Hoff (1960), que, sinteticamente, consiste em atribuir, inicialmente, valores aleatórios aos pesos sinápticos, procedendo com o cálculo do erro do valor apresentado na saída da RNA. O procedimento é refeito até que o erro obtido possa ser considerado aceitável, podendo o processo ser descrito conforme a Equação 01.

$$W_{k+1} = W_k + (\tau \rho_s \delta_k \omega_k) \quad (1)$$

Onde:

W : são os pesos sinápticos;

τ : é a taxa de aprendizado;

ρ_s : erros das saídas;

δ_k : derivada das funções de ativação;

ω_k : entradas na própria camada;

Um marco para a disseminação da utilização de RNA's foi a publicação do livro *Parallel Distributed Processing* por Rumelhart et. al. (1986), no qual foi apresentado o algoritmo de aprendizagem retropropagativo que pode ser estruturado em duas fases, na primeira uma amostra do conjunto de treinamento é utilizada para se propagar camada por camada produzindo uma saída, sem que os pesos sinápticos, inicialmente atribuídos, sejam alterados, enquanto que, em uma segunda etapa, os sinais de saída são comparados aos resultados esperados, resultando em valores de erros. Na etapa seguinte, os erros obtidos são utilizados para ajustar os pesos sinápticos de forma retropropagativa (equação 03) de acordo com a regra delta (Windrow e Hoff, 1960), inicialmente proposta para redes neurais de uma camada (Equação 02).

$$W_{k+1} = W_k + (\tau e_k \delta_k P_k) \quad (2)$$

Onde:

W_k = pesos sinápticos atuais;

τ = taxa de aprendizado;

e_k = erros das saídas da camada;

δ_k = derivada das funções ativação;

P_k = entradas na própria camada.

Considerando um ciclo K, sendo cada ciclo uma aplicação do algoritmo para o conjunto de registros utilizados:

O processo de retropropagação por ser descrito através da Equação 03 (RUMELHART ET. AL. 1986), consistindo no cálculo do erro em uma camada com base em informações da posterior.

$$e_h = \sum (W_s e_s \delta_s)$$

Onde:

e_h = erro na camada interna;

W_s = pesos sinápticos na camada posterior;

e_s = erros na camada posterior;

δ_s = derivadas da função de ativação na camada posterior.

O processo inicia com a geração de pesos sinápticos, de forma aleatória, e a aplicação sucessiva a RNA, com conseqüente cálculo dos erros na camada de saída e nas camadas anteriores. Procede-se, então, com a atualização dos pesos sinápticos, de acordo com as equações anteriores. O processo é repetido até que o erro obtido nas saídas seja considerado tolerável, podendo ser necessários milhares de ciclos, em virtude da complexidade do sistema a ser modelado.

O critério para interrupção dos ciclos de treinamento, como mencionado, é a obtenção de um erro considerado tolerável, para tanto necessitamos utilizar indicadores como erros (erro máximo, erro médio, erro padrão etc.) ou estatísticas de desempenho (erro quadrático, erro absoluto médio, coeficiente de Nash-Sutcliffe). Também se faz necessário um critério de parada em casos de não convergência dos indicadores, que pode ser um número máximo de ciclos.

É importante destacar que, nos últimos dez anos, ferramentas de computação na nuvem e o desenvolvimento de processadores compactos poderosos, permitiriam que até computadores portáteis fossem capazes de realizar treinamentos de redes complexas, com

bancos de treinamento com milhares de entradas, em tempos razoáveis, no entanto a aplicação do método retropropagativo, em algumas aplicações, pode se mostrar pouco eficiente, visto a necessidade de um grande número de ciclos para convergência de resultados. Diante dessa carência, Vogl et al. (1988) implementou melhorias no algoritmo retropropagativo, ao utilizar uma taxa heurísticamente variada para o treinamento, combinada com o termo de momento, apresentado por Rumelhart et al. (1986), para acelerar o treinamento. O método da taxa heurísticamente variável consiste em, quando o erro em um ciclo de treinamento sofrer redução, aumentar a taxa no próximo ciclo, e, em contrapartida, quando os erros aumentam, a taxa de aprendizado é reduzida, sendo os fatores de redução e aumento, recomendados, respectivamente 0,5 e 1,1.

Um dos problemas comumente identificado nos processos de treinamento é o superajustamento, que prejudica a capacidade de generalização de uma RNA. Segundo Pedrollo (2013) nessas ocasiões o treinamento é capaz de replicar o comportamento individual das amostras de treinamento, incluindo erros e aleatoriedade. O superajustamento pode ser evitado com a interrupção antecipada do treinamento. Para tanto podemos utilizar uma técnica denominada de validação cruzada (Hecht-Nielsen, 1990), que consiste na utilização de uma série adicional à de treinamento e verificação, a fim de se determinar um ponto de parada ótimo, evitando a perda da capacidade de generalização. Este ponto de parada é o ciclo a partir do qual a redução dos erros da série de validação é interrompida, enquanto os erros da série de treinamento continuam diminuindo. Esse ciclo é então definido como o ponto de interrupção do treinamento, pois, a partir deste, a rede passará a ser superajustada.

Outro problema identificado no treinamento é sua dependência quanto às condições de inicialização, uma vez que a atribuições de pesos sinápticos aleatórios pode acarretar no estacionamento em uma região de mínimo local. Este problema pode ser amenizado com a utilização de algumas repetições do processo de treinamento, utilizando, para isso cada uma, inicializações aleatórias de pesos sinápticos.

3.3.1.2 Avaliação de desempenho

Avaliações de desempenho são aplicadas nas diferentes etapas de elaboração de um modelo baseado em RNA's, seja na avaliação da eficiência do processo de aprendizagem (treinamento) ou do processo de teste (verificação). Onde, no último, a eficiência é

calculada através da comparação dos resultados obtidos pelo modelo às situações reais não contempladas durante o processo de treinamento. Para isso algumas métricas de avaliação podem ser utilizadas, entre elas destaca-se a aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), que representa a proporção da variância que é explicada pelo modelo em relação à variância total dos dados observados (Equação 03), o coeficiente pode variar de negativo infinito à 1, sendo esse o valor resultante para um ajuste perfeito.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qo_i - Qp_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qo_i - Qo')^2} \quad (03)$$

Onde:

Qp_i é o valor estimado pelo modelo;

Qo_i é o valor observado;

Qo' é o valor médio dos valores observados no período de verificação;

N é o número de valores do conjunto de verificação.

Além da avaliação supracitada podem ser empregados o erro médio (Me), o erro médio absoluto (Mea), os quantis $E_{0,9}$, $E_{0,75}$, $E_{0,5}$, $E_{0,25}$ e $E_{0,1}$, que correspondem aos valores que não foram ultrapassados pelos erros em 90%, 75%, 50%, 25% e 10% das previsões respectivamente. Adicionalmente os resultados obtidos, pelo modelo, poderão ser comparados a os advindos de simulações realizadas tendo como base o coeficiente de persistência (Equação 04) e o de eficiência relativa à extrapolação linear (Equação 05), como proposto por Kitanidis (1978). Assim é possível traçar um panorama do real ganho na utilização do modelo desenvolvido em detrimento a soluções menos complexas.

$$P(j) = 1 - \frac{\sum (Q_o(i) - Q_p(i))^2}{\sum (Q_o(i) - Q_o(i-j))^2} \quad (04)$$

Onde:

Q_o = Valor observado no tempo i ;

Q_p = Valor previsto no tempo i ;

j = Janela de previsão.

P = Ganho da previsão, onde 1 corresponde ao desempenho perfeito.

$$L(j) = 1 - \frac{\sum(Q_o(i) - Q_p(i))^2}{\sum(Q_o(i) - Q_l(i))^2} \quad (05)$$

Onde:

Q_o = Valor observado no tempo i ;

Q_p = Valor previsto no tempo i ;

Q_l = Previsão correspondente à linha reta ajustada aos dois valores mais recentes observados;

L = Ganho da previsão, onde 1 corresponde ao desempenho perfeito.

3.3.1.4 Aplicação de RNA's em modelos hidrológicos

A utilização da capacidade de aprendizado de máquina para inúmeras aplicações no campo das ciências, varia da modelagem astronômica à previsão do comportamento humano, dentre essas aplicações a utilização no campo da hidrologia cresceu exponencialmente, com estudos e aplicações sendo desenvolvidos em todo o mundo, alguns exemplos são descritos a seguir.

Pedrollo (2017) utilizou uma combinação de redes neurais artificiais, do tipo perceptron de múltiplas camadas, de forma a representar os possíveis cenários de degeneração da rede de monitoramento responsável por fornecer os dados de entrada de um modelo de previsão fluvial de curto prazo. Os resultados obtidos revelam que é possível utilizar combinações de RNA's para produzir modelos de previsão capazes de lidar com diferentes disponibilidades de dados de entrada, sem afetar, demasiadamente, a qualidade das previsões geradas. O que se configura uma ferramenta relevante na operação de sistemas de alertas de cheias, que enfrentam, costumeiramente, instabilidades em sua rede de monitoramento durante a ocorrência de eventos hidrológicos extremos.

Humphrey *et al.* (2016) utilizou uma RNA Bayesiana para prever vazões mensais com horizonte de um mês no sudoeste da Austrália, a técnica se somou a um modelo conceitual

de simulação de umidade no solo que fornecia as variáveis de entrada, compondo um modelo híbrido, o que melhorou sensivelmente o resultado final, quando comparado com previsões baseados exclusivamente em modelos de base climatológica.

Veintimilla-reyes *et al.* (2016) compararam a eficiência da aplicação do algoritmo de retropropagação e um modelo híbrido, onde foi adicionado o algoritmo OWO-HWO na rotina de treinamento da RNA, na geração de previsões de vazões no rio Tomebamba. Foram utilizados dados de precipitação e vazão provenientes de estações distribuídas ao longo do rio. Os resultados obtidos evidenciaram a melhor performance da utilização do algoritmo de retropropagação de forma isolada, além de fornecerem previsões capazes de auxiliar na gestão de inundações, com antecedência de três dias, para a cidade de Cuenca no Equador.

Adamowski e Sun (2010) demonstraram que os modelos de redes neurais acoplados a análises wavelet (WA) resultam em previsões de vazões mais precisas, para horizontes de previsão de até três dias em dois rios intermitentes localizados em Chipre, quando comparados a aplicação de modelos de redes neurais convencionais. Os resultados indicam que o modelo acoplado (WA-RNA) é um método promissor para previsão de vazões em rios intermitentes de bacias hidrográficas semiáridas.

Wunsch *et al.* (2018) aplicaram redes autorregressivas não-lineares com entradas exógenas (NARX) para obter previsões do nível do lençol freático em poços no sudoeste da Alemanha em um horizonte de até meio ano. Foram utilizadas series de dados pluviométricos e de temperatura para o treinamento do modelo. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de adequação do NARX no desenvolvimento de modelos preditivos de níveis freáticos de curto e médio prazo, mesmo com quantidades restritas de dados para treinamento, em comparação a outras arquiteturas de RNA's.

3.4 Mapas de inundação

Segundo Tucci (2007), os mapas de inundação podem ser de dois tipos: mapas de planejamento e mapas de alertas. No primeiro caso, são retratadas áreas atingidas por cheias com tempos de retorno pré-determinados, no segundo caso é informado em pontos de controle (esquinas, ruas, postes, régua etc.) o nível da régua da estação fluviométrica que está associada ao monitoramento de eventos de inundação na localidade. O mapa de inundação com a finalidade de alerta permite o acompanhamento da evolução da

enchente, com base nas observações das réguas linimétricas pela defesa civil e pelos moradores nos diferentes locais da cidade, e quando associados a um sistema de previsão de níveis pode ser utilizado pelas autoridades responsáveis como ferramenta para o planejamento de ações que visem a minimização dos danos ocasionados pelo evento. Ainda segundo Tucci (2007) para elaboração desses mapas são necessários os seguintes dados:

- a) Nivelamento da seção de réguas a um zero absoluto (geralmente utilizado o DATUM altimétrico brasileiro oficial);
- b) Levantamento topográfico da região afetada referenciado ao mesmo datum adotado para a seção de réguas linimétricas;
- c) Estudo de recorrência de níveis para uma seção linimétrica na proximidade da região afetada;
- d) Coleta de níveis de enchentes, ou marcas ao longo da região afetada que permita a definição da linha de água;
- e) Seções batimétricas ao longo do rio no perímetro urbano;
- f) Cadastramento das obstruções ao escoamento ao longo do trecho urbano;

Quando a declividade da linha de água ao longo da cidade é muito pequena e não existem arroios significativos no perímetro urbano, bem como obstruções e estrangulamentos no canal principal, os itens d, e e f são desnecessários, hipótese admitida nesse trabalho para os municípios de São Sebastião do Montenegro, que contam com um perímetro urbano de área reduzida, estando situados na região mais a jusante da bacia, com relevo predominantemente suave e cotas baixas, apresentam inundações de caráter gradual. É importante ressaltar que as seções de réguas utilizadas para esse trabalho se localizam próximas as áreas urbanas, estando a seção de São Sebastião do Caí localizada dentro do perímetro urbano e a de Montenegro a aproximadamente 1500 m do cais do porto no centro do perímetro urbano do município.

Para obtenção dos dados requeridos no item b, corriqueiramente tem-se aplicado a utilização de dados obtidos por sensoriamento remoto, manipulados por técnicas de geoprocessamento, amplamente utilizadas, em ambientes SIG, entre as formas de obtenção podemos destacar aerolevantamentos, imagens orbitais multiespectrais e de radar, na ausência dessas informações levantamentos topográficos, realizados por companhias de saneamento, podem ser utilizados como base para obtenção dos mapas, desde que apresentem escalas minimamente compatíveis com o mapeamento a ser realizado. É importante destacar que modelos digitais de terreno (MDT's) obtidos através

de imagens de aerolevantamentos costumam ter uma resolução e precisão superiores aos gerados a partir de imagens de satélite ou radar, para elaboração de mapas de inundação a combinação de ambas as fontes se mostra promissora, uma vez que MDT's podem ser gerados a partir de dados de aerolevantamentos com aviões ou drones, utilizando ortofotos ou dados de laser, manchas de inundação geradas a partir desses modelos podem ser validadas com imagens de satélite obtidas durante os eventos críticos.

4. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido em quatro etapas: desenvolvimento de um modelo de previsão fluviométrica, capaz de prever inundações em diferentes limiares de tempo para os municípios de São Sebastião do Caí - RS e Montenegro - RS; elaboração de mapas de inundação com intervalos de 0,5m, para o perímetro urbano dos dois municípios supracitados; levantamento dos danos causados para cada limiar de inundação e estimativa dos prejuízos associados; e, por último a integração das três etapas superiores apresentando um modelo de boletim informativo a ser enviado à defesa civil e demais autoridades em caso de ocorrência de eventos críticos, contendo cenários futuros para as duas localidades, de modo que a informação possa subsidiar a tomada de decisão.

O modelo de previsão fluviométrica, foi desenvolvido com a aplicação da técnica de redes neurais artificiais, tendo como entradas básicas dados de chuva e de nível gerados por sete estações telemétricas de monitoramento hidrológico, distribuídas na bacia do rio Caí, com uma discretização de 15 min. O modelo foi estruturado de forma que possa fornecer previsões com períodos de antecedência de 4, 6, 8, 12, 18, 24h e 30h.

O mapeamento dos limiares de inundação teve como foco, apenas, o perímetro urbano desses municípios e delimitou áreas inundáveis em intervalos de nível de 0,5m, tendo sido desenvolvido um modelo digital de terreno (MDT) a partir de ortofotos obtidas de um aerolevamento, esse MDT foi associado as seções linimétricas presentes na região afetada após realização de um levantamento geodésico para compatibilização do Datum vertical.

A estimativa de prejuízos econômicos, associados a cada limiar de inundação, foi realizada a partir da definição de um imóvel padrão e sua extrapolação, através da combinação da grade estatística do IBGE e setores censitários, levando em consideração os danos passíveis de ocorrer a esse imóvel em relação à profundidade de submersão a

que é exposto, e utilizando como fator ponderador o nível socioeconômico das unidades familiares atingidas.

Como resultado é apresentado um modelo de boletim informativo que integra as informações geradas nas etapas anteriores de forma sintética, para envio à defesa civil e demais autoridades envolvidas no gerenciamento de situações de risco, de forma que o material possa ser utilizado para subsidiar o processo de tomada de decisão. O diagrama, apresentado, a seguir representa o fluxo dos processos realizados.

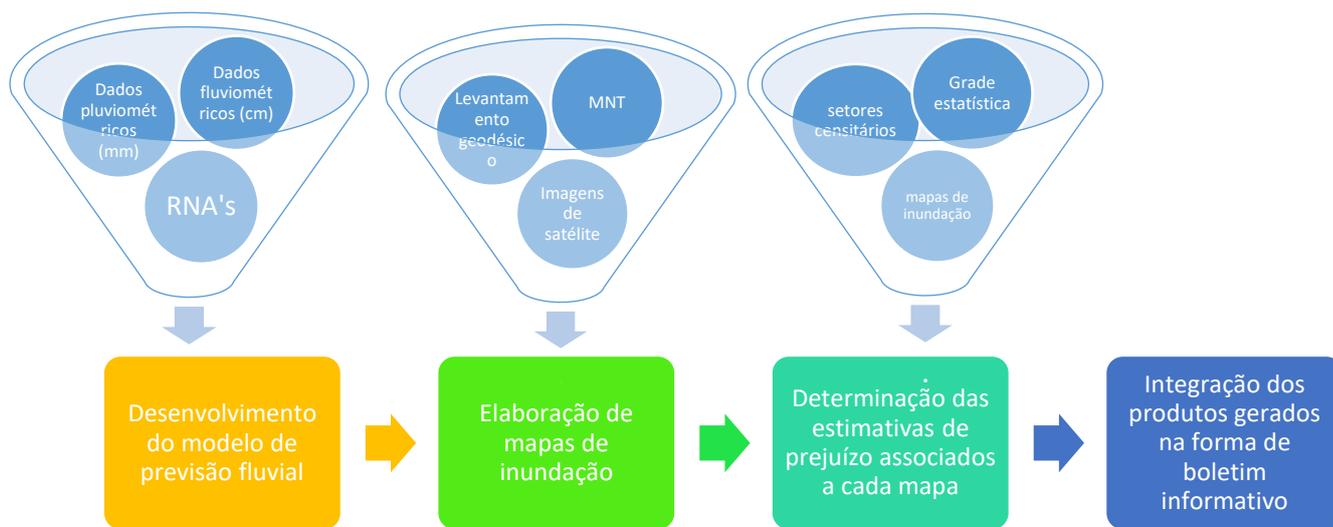


Figura 8: Fluxograma de processo.

4.1 Bacia Hidrográfica do Rio Caí

A bacia hidrográfica do Rio Caí está situada na porção nordeste do Estado do Rio Grande do Sul entre as coordenadas 29° 06' a 30° 00' de latitude e 50° 24' de longitude oeste, conforme figura 01, possuindo uma área de 4.983,38 km², atinge total ou parcialmente 42 municípios e abriga aproximadamente 490.000 habitantes, somente os municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro, situados no baixo curso, abrigam pouco mais de 90.000 habitantes (Revista do Plano Caí, 2007).

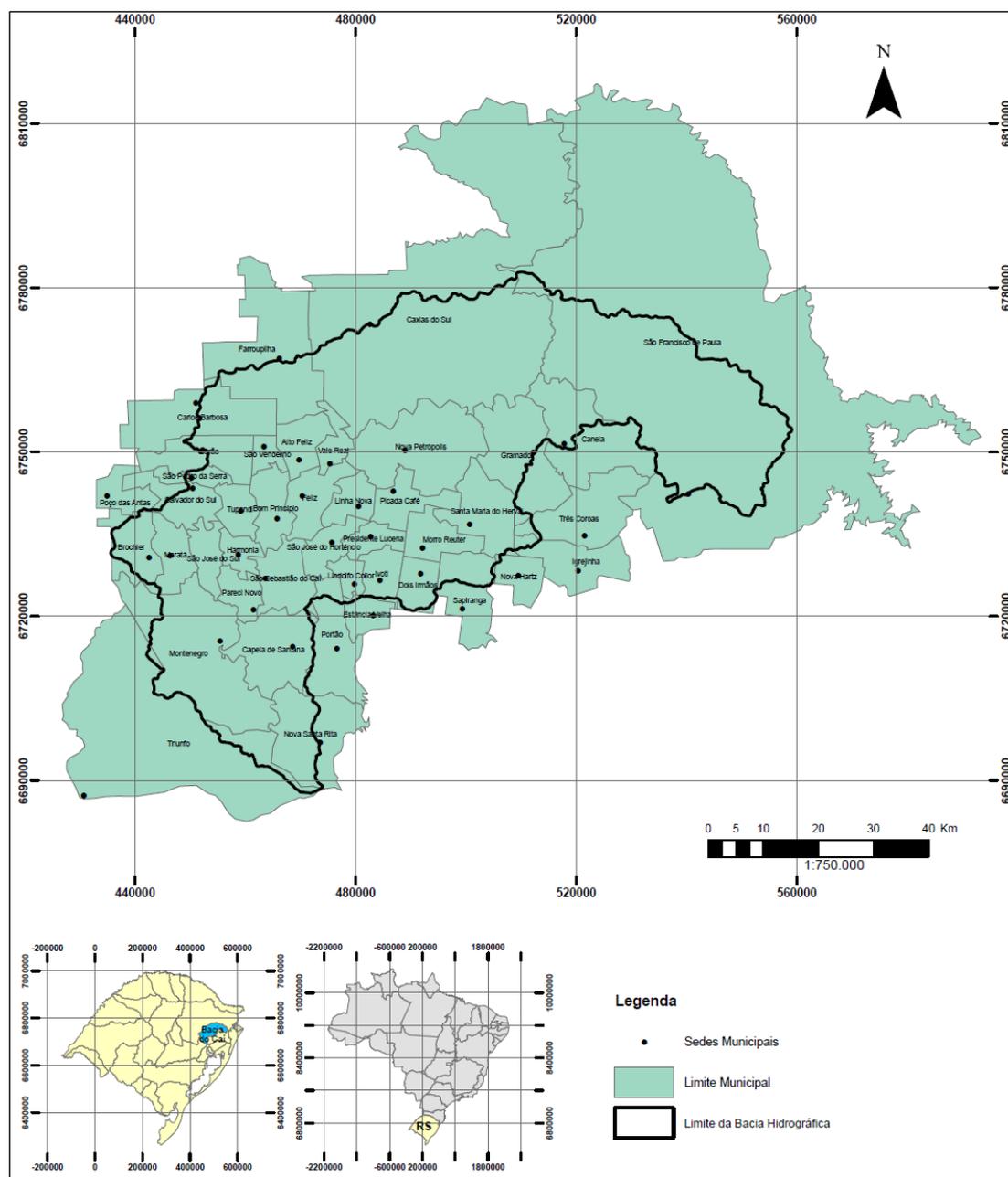


Figura 9: Bacia do Rio Caí localização espacial.

Fonte: Adaptado de Plano de Bacia do Rio Caí (2007)

O curso de água principal é denominado rio Caí, figura 02, dividido em alto, médio e baixo Caí, nasce no planalto da Serra Geral no município de São Francisco de Paula, entre as altitudes de 900 e 1000m. Recebe o nome de rio Santa Cruz até a divisa dos municípios de Canela e Gramado, percorre 195 km até desembocar no delta rio do Jacuí, em frente a Ilha Grande dos Marinheiros, nas proximidades do povoado de Morretes. Seus principais afluentes pela margem esquerda são os rios do Caracol, Pinto, Pirajá e Cadeia, e pela margem direita são os rios Divisa, Muniz, Macaco, Piaí, Ouro, Mauá e Maratá, entre esses

os de maior volume de contribuição são o Cadeia, Forromeco, Piaí e Marata. Destaca-se ainda a existência de barragens no alto curso, Salto, Blang e Divisa (Pedrollo, 2013).

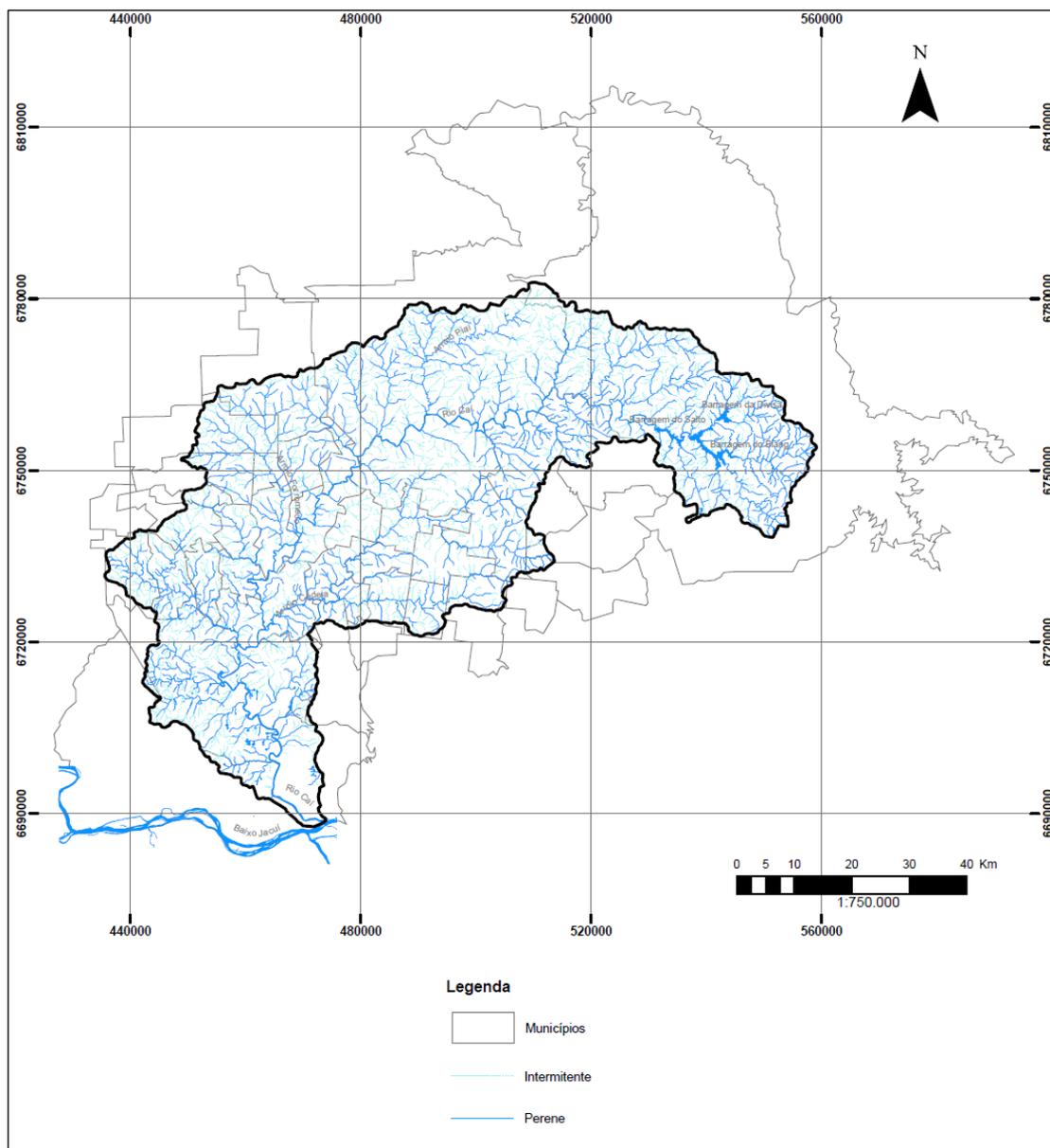


Figura 10: Hidrografia Bacia do Rio Caí

Fonte: Adaptado de Plano de Bacia do Rio Caí (2007)

Na Bacia do Rio Caí, grande parte dos eventos de cheias podem ser classificados como do tipo rápido, ou seja, com ascensão do curso de água a níveis de extravasamento em algumas horas e com duração de alguns dias, no entanto existe grande variabilidade quanto ao tipo de evento, estando intimamente ligados à condição meteorológica que os originou, apresentam ocorrência em qualquer época do ano, entretanto, julho é o mês com maior número de ocorrências registradas. Em relação à frequência de cheias, em São Sebastião do Caí, numa análise de 33 anos de dados, de 1984 a 2016, apenas em 2004 e

2006 o rio Caí não atingiu a cota de início de inundação (1000 cm), tendo ocorrido, neste período 91 eventos onde está cota foi ultrapassada. Em Montenegro, num período de 26 anos, 1991 a 2016, a cota de início de inundação, 600cm, foi ultrapassada 64 vezes. Os anos de 2015 e 2016 foram marcados pelos dois maiores eventos já registrados nessa bacia, resultantes da formação de sistemas convectivos de chuvas.

4.2 Modelo de previsão fluviométrica

O desenvolvimento do modelo de previsão fluviométrica, para os municípios estudados, se configura como um dos principais elementos desse trabalho, uma vez que funciona como base para a elaboração dos boletins informativos a serem enviados à defesa civil, tendo como objetivos centrais:

- Realizar previsões de nível para múltiplos horizontes temporais; e,
- Fornecer a entrada de nível necessária para realizar a estimativa de prejuízos econômicos durante os eventos críticos.

As seguintes etapas, que serão detalhas a seguir, foram executadas para a obtenção desse produto:

- a) Compilação e consistência das series de dados hidrológicos telemétricos fornecidas pela CPRM;
- b) Realização de análises preliminares (correlações entre os dados, aplicação de medias moveis de valores passados para os dados pluviométricos), a fim de se determinar as melhores formas e defasagens temporais para as entradas de variáveis no processo de treinamento;
- c) Realização do processo de treinamento com base nos resultados obtidos na etapa anterior; e,
- d) Avaliação do desempenho do modelo para os diferentes horizontes temporais requeridos.

4.2.1 Dados utilizados

Para esta pesquisa foram utilizadas séries de dados pluviométricos e fluviométricos provenientes das estações telemétricas, instaladas e operadas pela CPRM, com um

intervalo de coleta de 2011 a 2018. Apesar do curto período de amostragem, a frequência de aquisição dos dados, com intervalos de 15 minutos, bem como a ocorrência de diversos eventos extremos nesse período (2013, 2015 e 2016), possibilitaram a geração de dados em número e amplitude de domínio suficientes para aquisição de amostras de treinamento e verificação da rede neural proposta.

Os postos de monitoramento utilizados no processo de treinamento podem ser observados na tabela 03. Destaca-se que os postos são os mesmos utilizados no desenvolvimento do modelo proposto em 2013, que utilizou dados de observação convencionais, conforme metodologia adotada na operação da rede Hidrometeorológica nacional (RHN), dados fluviométricos com duas amostragens diárias (7 hs e às 17 hs) e pluviométricos com uma amostragem diária (7 hs), sendo possível uma melhor comparação entre a eficiência da utilização dos dois tipos de dados.

Tabela 3: Postos de monitoramento utilizados na pesquisa

CÓDIGO	NOME DA ESTAÇÃO	MUNICÍPIO	Coordenadas Geográfica	Tipo de dado utilizado
87270000	PASSO MONTENEGRO	Montenegro - RS	29°42'3.97"S / 51°26'24.68"O	F
87170000	BARCA DO CAÍ	São Sebastião do Caí - RS	29°35'24.35"S / 51°23'0.80"O	F
87230000	COSTA DO RIO CADEIA	São Sebastião do Caí - RS	29°35'23.88"S / 51°18'49.15"O	F
87168000	SÃO VENDELINO	São Vendelino - RS	29°22'58.92"S / 51°22'7.46"O	P
87160000	NOVA PALMIRA	Caxias do Sul - RS	29°20'7.31"S / 51°11'20.50"O	PF
02950045	CAPÃO DOS COXOS	São Francisco de Paula - RS	29°24'31.82"S / 50°35'3.75"O	P

Os registros provenientes dos *loggers* passaram por um processo de consistência a fim de se suprimir possíveis erros, que poderiam gerar tendências não desejadas durante o processo de treinamento. Não foram considerados dados estimados na composição do banco final, bem como a discretização das amostras foi reduzida de 15 minutos para uma hora, a fim de se reduzir a demanda computacional e problemas com o excesso de registros, que chegavam a aproximadamente 500.000 entradas em postos com dados pluviométricos e fluviométricos.

O banco final foi fracionado, conforme preconizado por Hecht-Nielsen (1990), de modo a fornecer uma amostra dos dados que não participará dos processos de treinamento e do de validação, chamada amostragem de verificação. Esta separação é necessária para que se possa medir o desempenho da rede com dados independentes representativos da realidade. O intervalo de dados extraídos está compreendido entre 09/2014 e 12/2015, período onde se observou a ocorrência de eventos de inundação de médio e grande portes,

na área de estudo, sem, no entanto, compreender os maiores eventos registrados na série, sendo estes reservados para a série de treinamento.

4.2.2 Estudos preliminares

Foram considerados para a realização do estudo a elaboração de dois modelos de previsão, unificados ao fim do trabalho, um para a localidade de Montenegro - RS e outro para São Sebastião do Caí -RS, a fim de se simplificar o processo de treinamento. O objetivo dessa etapa foi identificar as defasagens temporais, para as variáveis de entrada, que resultassem nos melhores índices de correlação com os valores alvo (níveis para os alcances de previsão desejados, valores de 4h à 30h), bem como identificar possíveis ganhos de desempenho com a aplicação de transformações matemáticas a essas variáveis de entrada. A seleção da forma e da composição das variáveis de entrada, utilizadas no treinamento de ambos modelos, contou com a realização de pesquisas a fim de se determinar as defasagens temporais e transformações matemáticas que propiciavam as melhores correlações com os valores em tempo atual, bem como identificar a utilização de defasagens que não geram correlações significativas, as descartando do processo de treinamento, uma vez que geram demanda computacional sem, no entanto, melhorar a performance do modelo. Uma vez determinados os padrões das entradas com alto grau de relacionamento com os valores alvo é possível otimizar o processo de treinamento e gerar resultados com incertezas menores, quando comparada à simples utilização dos dados sem transformações de qualquer natureza.

Foram aplicadas análises de correlações lineares simples aos dados fluviométricos, pela geração de correlogramas, a fim de se identificar os tempos de deslocamento e os efeitos sobre os postos fluviométricos de previsão. Também foram aplicadas transformações aritméticas aos dados fluviométricos e pluviométricos.

4.2.2.1 Aplicação de médias móveis

As transformações utilizadas são as médias móveis dos valores passados. Em estatística uma média móvel é considerada um estimador obtido a partir de médias de diferentes amostras temporais sucessivas de uma serie, sendo elas as MMU – Média móvel com ponderação uniforme, MME – Média móvel com ponderação de decaimento

exponencial e MMG – Média móvel com ponderação gama. Também foram aplicadas as transformações de cotas de entrada, a transformação nula (NUL) ou seja, os valores diretos, sem transformação, mas com defasagem temporal representada pelo retardo em relação ao tempo atual. Todas estas transformações têm como parâmetro de eficiência a correlação com a variação produzida nas cotas, entre o tempo atual e o tempo correspondente ao horizonte de previsão ($t + alc$), representada pelas suas diferenças.

As médias móveis com ponderação uniforme constituem médias simples, cujos parâmetros são a janela temporal e a defasagem do tempo final desta janela ao tempo atual, sendo que nesta operação todos os dados utilizados recebem pesos iguais. As médias móveis ponderadas com decaimento exponencial correspondem à formulação apresentada por Moore (1980), melhorada com a introdução do parâmetro de defasagem temporal, sendo que, neste formato, os dados mais recentes da série, que compõem a média, passam a ter maior peso, com sua importância declinando exponencialmente à medida que esses dados se tornam defasados no tempo. A MMG, por sua vez, realiza a média de valores passados, a partir do tempo atual, segundo um sistema de ponderação que se adapta de forma bastante flexível, conforme a formulação da FDP (função de densidade de probabilidade) Gama, tomando-se os valores das abscissas inteiras, e escalonando para resultar soma dos pesos igual a um. Esta função foi escolhida justamente pela sua flexibilidade de assumir diversa variedade de formas, dependentes de dois parâmetros, o de forma e o de escala.

Brasil (2007) destaca que a grande diversidade de formas da densidade Gama é garantida pela variação do parâmetro de forma, medida que esse parâmetro decresce a densidade Gama torna-se cada vez mais assimétrica, sendo que, para fatores de forma igual a 1 a distribuição Gama assume o formato da distribuição exponencial. Para valores crescentes do parâmetro de forma, a função densidade Gama torna-se menos assimétrica, até que, para valores muito elevados no fator de forma a distribuição aproxima-se da forma de uma distribuição Normal. A versatilidade de formas que podem ser assumidas faz da distribuição Gama um modelo probabilístico promissor para representação de variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas.

As transformações de cotas experimentadas sobre as possíveis entradas de cada modelo (Modelo de Barca do Caí -BC e Modelo de Passo Montenegro – PM), foram a transformação nula (nul) e as médias móveis MMU, MME e MMG.

As transformações sobre as séries de precipitações foram as três modalidades de médias móveis apresentadas anteriormente, sendo que a MMU é, matematicamente,

semelhante a uma soma móvel, pois as correlações e os efeitos sobre os modelos empíricos são os mesmos. Em ambas as análises foram pesquisadas as defasagens ideais entre o fim da janela temporal e o tempo atual.

Os dados obtidos nas análises preliminares podem ser conferidos em sua integralidade nas tabelas constantes no anexo 9.1. Os resultados demonstraram que a aplicação de MMG, para os dados pluviométricos de ambos modelos e para todos os postos de monitoramento, apresentaram valores de correlações superiores à utilização de dados sem transformações ou com aplicação das demais técnicas. O posto São Vendelino (87168000) apresentou os maiores valores correlacionais, indicando a sua maior influência em qualquer horizonte pesquisado. Quanto aos resultados obtidos para os dados fluviométricos, a aplicação de MME revelou os melhores resultados para o posto Nova Palmira (87160000), sendo que, para os demais postos, a variação de valores foi insignificante, mantendo respostas similares para qualquer pesquisa realizada. Também foi constatado que os valores de correlação declinam conforme o aumento do alcance estudado, nas análises com dados pluviométricos e fluviométricos, resultado esperado, uma vez que dados anteriores afetam cada vez menos os níveis no horizonte de previsão, à medida que este avança no tempo. Diante dos resultados percebidos, optou-se por utilizar como entrada no processo de treinamento as transformações MMG para entrada de dados pluviométricos e uma combinação do MME e dados sem transformação nos fluviométricos, sendo aplicada, em cada posto analisado, a que obteve melhor desempenho.

A entrada de dados, em cada modelo, tem o formato de uma matriz, composta pelas séries temporais de todos os postos escolhidos para alimentar o treinamento. Nesta matriz, cada linha corresponde a uma série fluviométrica ou a uma série pluviométrica de um posto de monitoramento, em ordem temporal crescente, e cada coluna é constitui um registro. Uma vez definido o formato de entrada para uma determinada série de dados de um posto, a linha correspondente passa pela transformação desejada e é sincronizada com as demais, provenientes de outros postos, de acordo com a defasagem temporal escolhida para o posto de monitoramento.

4.2.3 Aspectos do Treinamento

Uma vez definida a formatação para os parâmetros de entrada a partir das pesquisas preliminares, se procedeu com o diagnóstico do número ideal de registros a serem

utilizados no treinamento. O objetivo nessa etapa era testar a quantidade mínima de registros necessária para o processo, de modo a não comprometer a qualidade dos resultados, reduzindo a demanda computacional, tendo em vista que cada posto de monitoramento fornece um número elevado de registros, da ordem de 70 mil. Os registros que não foram separados para a verificação são divididos em conjunto de treinamento e conjunto de validação. Para tal, é utilizado o procedimento de amostragem sistemática para a amostragem do conjunto de treinamento, com base no ordenamento em ordem crescente dos valores de saída, e a seleção alternada, de forma a resultar o número desejado de amostras. Além disso, é garantido que sejam acrescentados, no conjunto de registros de treinamento, aqueles registros em que há em pelo menos uma das variáveis (de entrada ou de saída) com valores nos extremos de seu respectivo domínio.

Foram testadas amostras que variaram de 50 a 2000 registros, com variações de 100 unidades, a avaliação do desempenho foi realizada utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), para a amostra de validação. Percebeu-se que o desempenho aumenta lentamente conforme o aumento do número de registros de treinamento, alcançando valores máximos a partir de 800 registros, para a maioria dos alcances pesquisados, valores testados acima desse patamar apresentaram ganhos pouco significativos ou nulos desse modo, adotou-se o valor de 900 registros para o treinamento final. Esse fato poderia ser explicado pelo excesso de registros, que tendem a representar cenários semelhantes, podendo viciar o processo de treinamento, tornando-o tendencioso. Neste caso é preferível utilizar uma amostragem que seja suficientemente representativa dos cenários possíveis de ocorrer. Todos os resultados obtidos nessa etapa podem ser observados nas tabelas constantes no anexo 9.2.

Além da determinação do número mínimo de registros é necessária a determinação de uma complexidade interna mínima da RNA (número de neurônios utilizados na camada interna), a fim de se evitar o superajustamento e reduzir o número de operações de processamento para cada cenário. A pesquisa de complexidade é realizada verificando o desempenho, a partir dos resultados da amostra de validação, de uma rede propositalmente superdimensionada, para vários alcances, em seguida procede-se com a redução de sua complexidade (número de neurônios) até que o desempenho apresente redução significativa. Observou-se que, inicialmente, o desempenho mantém-se com a redução da complexidade, salvo oscilações (normais devido à aleatoriedade das condições de inicialização, não totalmente resolvida pelas repetições). A partir de certa complexidade, o desempenho começa a cair (avaliando-se o aumento do erro médio),

para fora da zona de oscilação que vinha apresentando, sem retornar ao padrão anterior, significando que o modelo não possui mais graus de liberdade suficientes para simular adequadamente o fenômeno, fato observado para valores entre 4 e 6 neurônios nos cenários considerados (alcances de 4, 10, 14, 16 e 20h), onde os valores dos erros médios quadráticos (SQE) apresentam elevações bruscas, conforme as figuras 11 e 12 para o alcance de 14h. Os resultados para todos os alcances experimentados podem ser observados nas figuras presentes no anexo 9.3.

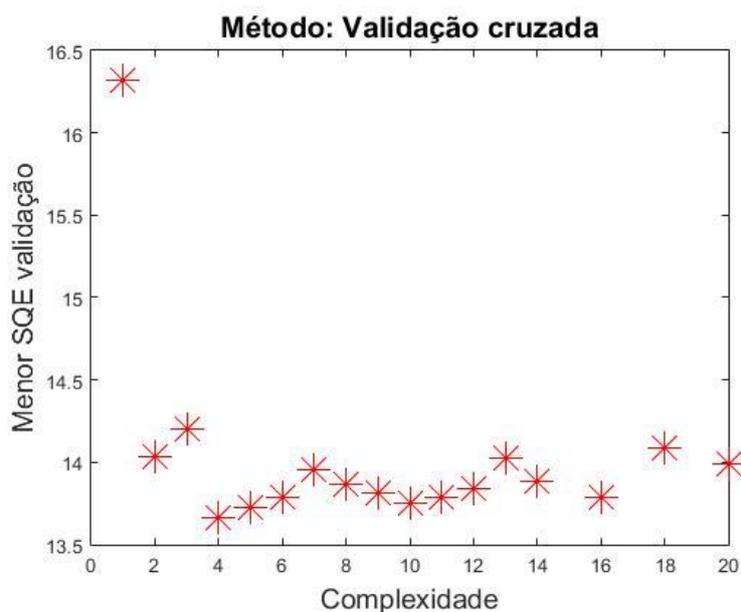


Figura 11: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 14h, no modelo Barca do Cai.

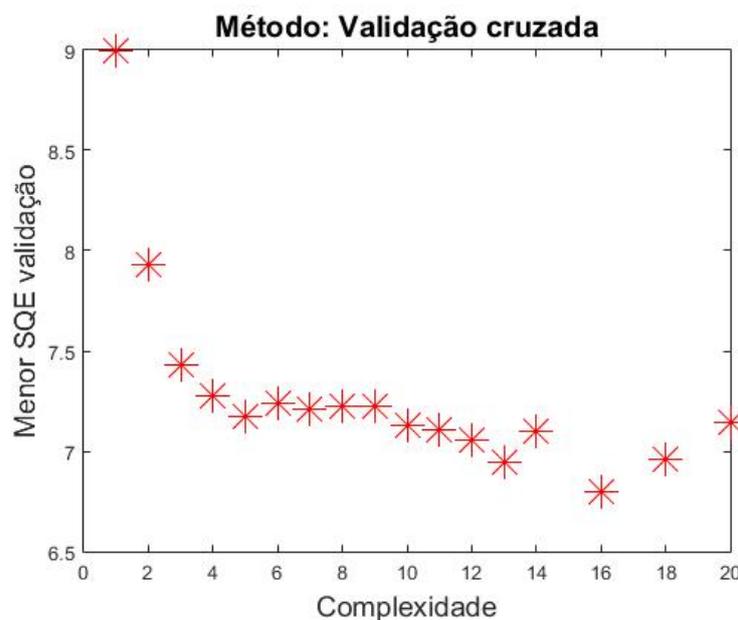


Figura 12: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 14h, no modelo Passo Montenegro.

Após a conclusão das etapas anteriores procede-se com o treinamento da rede neural final. Aplicando-se os parâmetros previamente definidos (defasagens e transformações das variáveis de entrada, número de registros a serem utilizados, número de neurônios na camada interna, alcances desejados), foram utilizados algoritmos desenvolvidos no âmbito do grupo de pesquisa AHRNA, sendo esta pesquisa integrante do projeto DEAHRNA (Desenvolvimento e experimentações com aplicações hidroambientais utilizando redes neurais artificiais), para automatização de todo o processo. Adicionalmente, aos parâmetros mencionados foram estipulados os limites de 5 repetições, com 200.000 ciclos de treinamento, para cada alcance desejado.

A fim de se evitar o superajustamento da rede neural, um critério de parada adicional foi definido, para isso foi utilizada a técnica da validação cruzada, descrita na metodologia deste trabalho.

O modelo BC (Barca do Caí) utiliza, como entradas, agregações de precipitações, com uso da média móvel gama, para os postos de Capão do Coxos (pCC.mmg), São Vendelino (pSV.mmg), Nova Palmira (pNP.mmg) e Costa do Rio Cadeia (pCD.mmg), agregações de informações de cotas anteriores no posto de montante, com médias móveis de decaimento exponencial, para o posto de Nova Palmira (fNP.mme), cotas defasadas do tempo atual (sem transformações), no posto de montante Nova Palmira (fNP.nul), agregações de informações de cotas anteriores em BC, com médias móveis de decaimento exponencial (fBC.mme) e cota em tempo atual no posto Barca do Caí (fBC), resultado em previsões com variados alcances (alc) neste posto (BC_{t+alc}), com a formulação descrita a seguir.

$$BC_{t+alc} = BC \left((p.mmg_t(CC, SV, NP)), (f.mme_t(NP, BC)), (f.nul_t(NP)), (f.BC_t) \right)$$

O modelo PM (Passo Montenegro) utiliza, como entradas, agregações de precipitações, com uso da média móvel gama, para os postos de Capão do Coxos (pCC.mmg), São Vendelino (pSV.mmg), Nova Palmira (pNP.mmg), Costa do Rio Cadeia (pCD.mmg) e Passo Montenegro (pPM.mmg), agregações de informações de cotas anteriores no posto de montante, com médias móveis de decaimento exponencial, para os postos de Nova Palmira (fNP.mme), Barca do Caí (fBC.mme) e Costa do Rio Cadeia (fCD.mme), cotas defasadas do tempo atual (sem transformações) nos postos a montante de Nova Palmira (fNP.nul), Baca do Caí (fBC.nul) e Costa do Rio Cadeia (fCD.nul), agregações de informações de cotas anteriores em PM, com médias móveis de decaimento exponencial (fPM.mme) e cota em tempo atual no posto Passo Montenegro (fPM),

resultado em previsões com variados alcances (alc) neste posto (PM_{t+alc}), com a formulação descrita a seguir.

$$PM_{t+alc} = BC \left((p. mmg_t(CC, SV, NP, PM)), (f. mme_t(NP, BC, CD, PM)), \right. \\ \left. (f. nul_t(NP, BC, CD)), (f. PM_t) \right)$$

4.2.4 Avaliação do desempenho

A análise de desempenho de cada modelo final é obtida com a aplicação da série de verificação, previamente escolhida (período entre os anos de 2014 e 2015 onde se observou a ocorrência de eventos de grande porte, embora inferiores ao máximo já observado que foi reservado para o treinamento), ao modelo resultante do processo de treinamento, as saídas provenientes do modelo são comparadas aos valores observados, através de estatísticas de desempenho, possibilitando avaliar a qualidade das previsões com dados que não foram utilizados no treinamento e na validação dos modelos.

As estatísticas de desempenho utilizadas foram escolhidas de modo a proporcionar uma comparação com o modelo elaborado em 2013, onde foram aplicadas avaliações utilizando coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), erro médio absoluto e o quantil $E_{0,9}$, além de expandir as avaliações que foram empregadas na época. A principal análise realizada foi a aplicação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), que representa a proporção da variância que é explicada pelo modelo em relação à variância total dos dados observados.

Além da análise individual do coeficiente de desempenho os modelos também foram submetidos a testes comparativos de eficiência com previsões realizadas por modelos de persistência e de extrapolação linear, a fim de se determinar se a aplicação da técnica de RNA's resulta em ganhos de desempenho quando comparada às aplicações de técnicas simplificadas.

4.3 Elaboração das manchas de inundação

A modelagem do terreno e o mapeamento dos setores inundáveis, nas áreas urbanas dos municípios estudados, é imprescindível para a realização da estimativa de danos e prejuízos, uma vez que delimita e segmenta regiões a serem inundadas, permitindo o cruzamento das informações topográficas e censitárias com previsões fluviométricas,

viabilizando assim o planejamento de ações em situações de risco, tem como objetivos centrais:

- Elaborar mapas de inundação para diferentes níveis fluviométricos, nas áreas urbanas dos municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro;
- Fornecer a delimitação de área atingida, para diferentes cotas de inundação, necessária para realização da estimativa de prejuízos econômicos durante os eventos críticos.

As seguintes etapas, que serão detalhas a seguir, foram executas para obtenção do produto:

- a) Compilação da base de dados topográficos;
- b) Determinação de altitudes ortométricas, vinculadas ao sistema geodésico oficial brasileiro, para as seções de réguas instaladas nas áreas urbanas dos municípios;
- c) Determinação dos tempos de retorno (TR) das inundações;
- d) Processamento dos dados com definição das áreas inundáveis; E,
- e) Validação dos produtos gerados.

Os objetivos e etapas de desenvolvimento supracitadas, visam obter a delimitação das áreas atingidas por inundações, com intervalos de 0,5 metros, associadas aos postos fluviométricos Barca do Caí (87170000) e Passo Montenegro (87270000), dentro do perímetro urbano dos municípios, em um espectro que compreende das cotas de início de inundação às associadas a um TR de 100 anos, de acordo com os registros fluviométricos disponíveis e indicação da defesa civil local. A vinculação aos postos citados se deve a realização de previsões fluviométricas para esses, bem como a sua localização, estratégica, dentro dos perímetros urbanos estudados.

Esta etapa do estudo utilizou dados e metodologia disponibilizados pela CPRM (2016) e Metroplan (2014), que caracterizaram as áreas inundáveis nos dois municípios.

4.3.1 Base de dados topográficos

Ao considerar o mapeamento de áreas propensas a inundações, como as ribeirinhas, busca-se levantamentos topográficos pré-existent, preferencialmente, com detalhamento das curvas de níveis de 0,5 m a 1 m, conforme recomendação de Tucci (2007). Além da obtenção dos dados topográficos, em resolução compatível com os

estudos que serão realizados, se faz necessário o levantamento das marcas históricas de cheias, imagens de satélite, obtidas durante a ocorrência de eventos extremos, registros fotográficos, notícias de jornais e relatos dos moradores e defesas civis locais, a fim de se obter dados que proporcionem a calibração e validação do mapeamento a ser gerado.

A base de dados cartográficos utilizada neste trabalho foi disponibilizada pela Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional – METROPLAN, elaborada para subsidiar o estudo de alternativas para minimização do efeito das cheias do baixo rio Caí (2014), sendo constituída de um modelo numérico de terreno (MNT), mapas e levantamentos topográficos, uma breve descrição da metodologia utilizada pela METROPLAN é abordada a seguir. A base topográfica utilizada para a elaboração do MNT foi proveniente de uma restituição aerofotogramétrica (distância focal 50 mm, câmera hasselblad, escalas das ortofotos 1:2000, restituição 1:2000, DATUM vertical: marégrafo de Imbituba-SC, DATUM horizontal: SIRGAS 2000) em formato *raster*, com pixels de resolução 0,5x0,5m, posteriormente convertido em um arquivo dwg (software AutoCAD) com curvas de níveis espaçadas de meio em meio metro e pontos cotados, para obtenção da modelagem final do terreno foi necessário definir a conformação da calha do rio Caí a qual foi obtido da seguinte forma:

- Primeiramente foram geradas seções batimétricas, equidistantes 30 m, ao longo do trecho em estudo a partir da interpolação linear das 27 seções batimétricas geradas em campo.

- Extraíram-se pontos das novas seções os agregando a restituição aerofotogramétrica (curvas e pontos) gerando um novo raster, utilizando para isso a ferramenta *spatial analyst* da suíte ArcGis.

O mapeamento original englobou todo o baixo vale do rio Caí, para esse estudo o MNT foi recortado de modo a representar, apenas, o perímetro urbano dos municípios estudados.

4.3.2 Determinação de altitudes ortométricas para zeros das réguas

Uma das etapas necessárias à obtenção dos mapas de inundação é o nivelamento da seção de réguas a um zero absoluto, de modo a compatibilizar os níveis aferidos pelas estações fluviométricas (87170000 e 87270000), referencias para as previsões fluviométricas, ao mesmo DATUM vertical (marégrafo de Imbituba) utilizado para

elaboração do MNT, deste modo foram realizadas campanhas para levantamento geodésicos de precisão em São Sebastião do Caí e Montenegro, a metodologia empregada para os levantamentos é proveniente do manual para instalação de estações hidrométricas, elaborado pela Agência Nacional de Águas (2015), que traz em seu escopo uma adaptação das Normas Técnicas de Georreferenciamento de Imóveis Rurais definidas pelo INCRA (2010).

As coordenadas planimétricas das estações fluviométricas foram determinadas por meio de GPS geodésico (receptor GNSS GTR-G2), sistema de referência SIRGAS2000, com observação mínima de 6 satélites, PDOP inferior a 4, posicionamento relativo estático, taxa de coleta de 15 segundos, tempo de ocupação em função do comprimento da linha de base e precisão superior ou igual a 5mm+1ppm, a determinação das altimetrias ocorreu por transporte de cotas com GPS geodésico a partir de um vértice pertencente a RBMC, no anexo 9.5 e 9.6 é possível observar os relatórios do processamento, dos pontos levantados, através do método de posicionamento por ponto preciso (PPP-IBGE). Devido a obstruções para apontamento da antena GPS, no caso de locação sobre as RN's pré-existent nas estações, foram materializados marcos geodésicos em área com boa exposição, sendo realizado um transporte altimétrico com nível topográfico digital (FOIF-EL303), os novos marcos foram denominados vértices de referência, nos anexos 9.5 e 9.6 se encontram as monografias dos vértices implementados.

4.3.3 Cálculo dos tempos de retorno

As análises de frequência têm como objetivo relacionar a magnitude dos eventos de cheias com sua frequência de ocorrência por meio da utilização de distribuições de probabilidades, com essa avaliação é possível delimitar áreas inundáveis associadas a determinados tempos de retorno, informação que pode ser utilizada no planejamento estratégico de instituições voltadas ao gerenciamento de situações de risco, além de subsidiar o planejamento do uso e ocupação do solo. O tempo de retorno ou tempo de recorrência de uma enchente é o tempo médio, em anos, em que a enchente é igualada ou superada. O tempo de retorno, Tr (anos), e a probabilidade de excedência, $P(Q \geq q)$, estão relacionados pela equação 06.

$$P(Q \geq q) = \frac{1}{Tr(\text{anos})} \quad (06)$$

Tabela 5: Valores obtidos pelas distribuições para o posto 87270000 (Passo Montenegro)

TR	log-NORMAL	GUMBEL	Nível ajustado ao DATUM vertical do MNT
100	1040	1078	993
50	993	1019	934
30	957	975	890
25	944	960	875
20	927	940	855
15	905	915	830
10	873	879	794
5	810	816	731
3	758	766	681
2	704	720	635
1	498	573	488

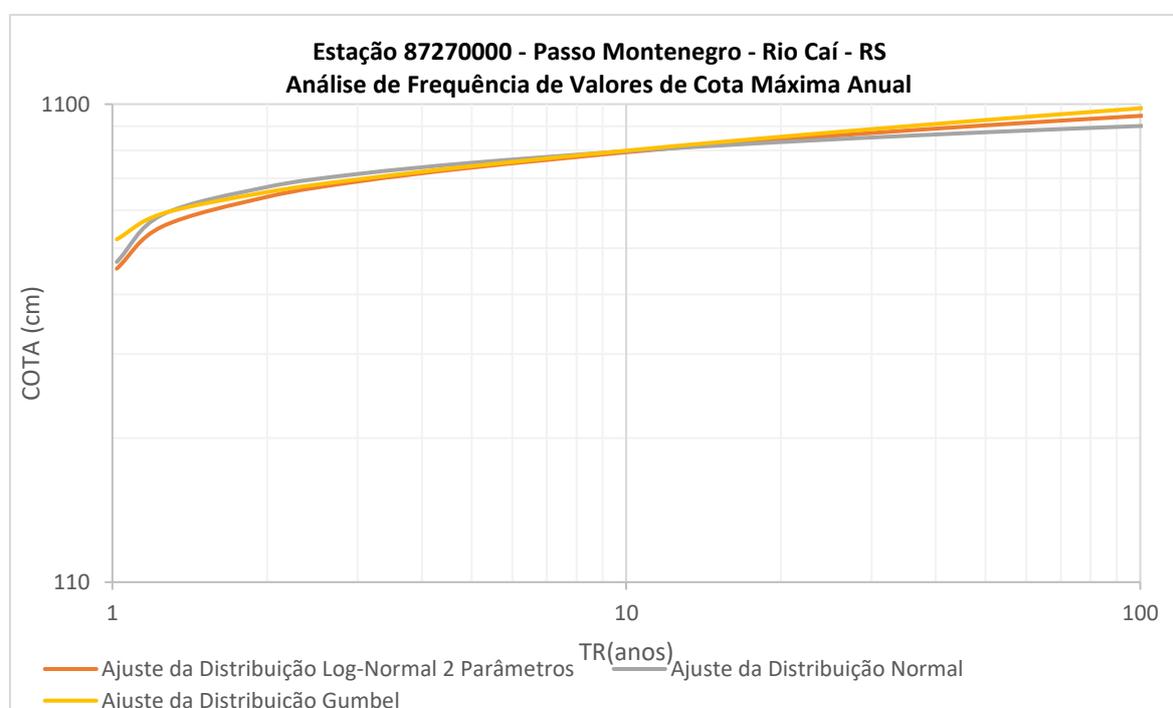


Gráfico 2: Análise de frequência de valores de cota máxima anual posto 87270000 (Passo Montenegro)

4.3.4 Processamento do MNT e definição das áreas inundáveis

Segundo Tucci (2007) quando a declividade da linha de água ao longo da cidade é muito pequena e não existem arroios significativos no perímetro urbano a definição do decaimento da linha de água e o cadastramento de obstruções ao escoamento, para elaboração de modelagem hidrodinâmica, são desnecessárias, sendo a delimitação realizada por transporte geométrico de cotas, hipótese admitida nesse trabalho para os

municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro, que contam com um perímetro urbano de área reduzida e estão situados na região mais a jusante da bacia, com relevo predominantemente suave e cotas baixas, apresentando inundações de caráter gradual. É importante ressaltar que as seções de réguas utilizadas neste trabalho se localizam próximas as áreas urbanas, estando a seção de São Sebastião do Caí localizada dentro do perímetro urbano e a de Montenegro a aproximadamente 1500 m do cais do porto no centro do perímetro urbano do município.

Partindo-se do princípio apresentado e tendo como base o produto desenvolvido pela METROPLAN, que possui curvas de nível com intervalos de 0,5m, as regiões afetadas pela inundação foram obtidas realizando-se delimitação de áreas, em ambiente SIG, através de planos de corte no relevo, com cotas predefinidas vinculadas aos postos fluviométricos de São Sebastião do Caí (87170000) e Montenegro (87270000).

A obtenção das áreas inundáveis, para as respectivas cotas vinculadas, foi realizada através da técnica de fatiamento de imagem, que tem como objetivo delimitar regiões compreendidas entre intervalos de dados predefinidos, para esse estudo utilizou-se intervalos de 0,5m, utilizando as ferramentas da suíte ArcGis, como a *Spatial Analyst Tools*, para essa finalidade. Para tanto se utilizou da ferramenta *Map Algebra*, que cria e executa uma expressão algébrica usando a sintaxe do *Python* em uma interface de calculadora para realização de operações algébricas com os dados contidos em um *Raster*, com o intuito de discretizar em intervalos pré-especificados os dados altimétricos.

O produto obtido nessa etapa do processamento nos permitiu utilizar a ferramenta *Reclassify* para separar as células compreendidas entre um intervalo de altitudes pré-estabelecida das demais, isso é possível, pois durante a reclassificação as células com valores 0 (fora do intervalo requerido), obtidas pelo processamento algébrico, podem ser descartadas, por fim o *raster* obtido após a reclassificação é convertido em polígono (vetor) e sua área é calculada.

Durante o processo de obtenção das áreas inundáveis associadas às cotas do seu posto fluviométrico foram descartadas pequenas regiões que apresentaram nível topográfico compatível com a do posto fluviométrico, mas não apresentavam continuidade com a mancha proveniente do rio, pois estavam isoladas topograficamente, nem conexão através de obras hidráulicas, como redes de drenagem, nesse caso deve-se considerar que a área está sujeita a acúmulo da água da chuva, mas não necessariamente será inundada pelo extravasamento do corpo hídrico, necessitando para isso de um canal comunicador o que não foi observado nessas situações.

4.3.5 Validação dos mapas gerados

Para validação do mapeamento das áreas inundáveis associadas a cada cota da seção linimétrica, geradas na fase de processamento, se faz necessário a coleta de pontos de controle em campo, que consistem em pontos limítrofes da evolução da lamina de água durante um evento de inundação, esses pontos são materializados na forma de marcas de cheias (marcas em paredes, vegetação, postes, apontamento do limite da lamina de água em uma rua) e podem ser apontadas pela defesa civil e moradores locais.

Diversos tipos de levantamentos podem ser realizados com a finalidade de se determinar a posição geográfica e a altimetria desses pontos, desde a topografia convencional a aquisição de posição GPS, utilizando modos de coleta cinemáticos ou semi-cinemático, pós processados, com equipamentos geodésicos dotados de recepção em dupla frequência (L1 e L2).

Adicionalmente a coleta de pontos, em campo, pode-se recorrer a imagens de satélite e fotografias aéreas, registradas durante a ocorrência de um evento de inundação, esse tipo de técnica permite a geração de uma grande massa de pontos de controle, maximizando o processo de validação do mapeamento gerado.

Após a aquisição e processamento dos pontos de controle as suas informações planimétricas são cruzadas com as cotas registradas nas seções de réguas das respectivas estações analisadas e a cada mancha de inundação associada, em ambiente SIG, sendo comparados aos polígonos gerados para cada nível de inundação. A validação é então executada quando se identifica que os pontos coletados, em campo ou oriundos de imagens orbitais, coincidem com os gerados computacionalmente para um mesmo nível na seção linimétrica a que estão vinculados, nessa etapa também é possível verificar se as áreas desconexas, que foram descartas na etapa de processamento, realmente não apresentam ligação com a inundação fluvial.

4.4 Estimativas de prejuízos

A obtenção de estimativas de prejuízo para cada horizonte de inundação está ligada aos resultados das etapas anteriores, uma vez que é necessário vincular os parâmetros econômicos as previsões hidrológicas e ao mapeamento de áreas inundáveis, podendo-se

quantificar os prejuízos potenciais para cada área inundada, logo a etapa de quantificação de danos e prejuízos tem como objetivos centrais:

- Quantificar danos decorrentes de inundações para diferentes horizontes de cheias;
- Determinar os prejuízos econômicos associados aos danos em cada horizonte de cheia, considerando aspectos socioeconômicos da população afetada.

As seguintes etapas, que serão detalhas a seguir, foram executas para obtenção deste subproduto:

- f) Discretização das regiões afetadas segundo a grade estatística do IBGE e setores censitários;
- g) Quantificação dos tipos de danos decorrentes para cada horizonte de inundação, levando em consideração a discretização socioeconômica obtida na etapa anterior;
- h) Determinação do prejuízo total por horizonte de inundação;

A metodologia utilizada é uma adaptação da proposta por Tachini (2010) e atualizada por Fadel (2015), prevê a utilização de dados já disponíveis nos municípios, sem a necessidade de levantamentos de campo nem inventários de danos.

4.4.1 Quantificação dos danos

A quantificação dos danos decorrente de uma inundação está intimamente ligada a área diretamente atingida, bem como à profundidade a que a região foi exposta, deste modo é necessário a elaboração de mapas de inundação para a região que se deseja obter essa estimativa. Estudo anteriormente elaborado por Brasil (2016a) gerou manchas de inundação para os municípios de Montenegro – RS e São Sebastião do Caí, Figuras 13,14, 15 e 16, para graduações de 0,5m até um horizonte de cotas de 1000 cm e 1600 cm, respectivamente, vinculadas a seção de réguas dos postos fluviométricos 87270000 (Passo Montenegro) e 87170000 (São Sebastião do Caí), essa base de dados foi utilizada nesse trabalho, sendo cada mancha de inundação associada aos prejuízos potenciais para a região.

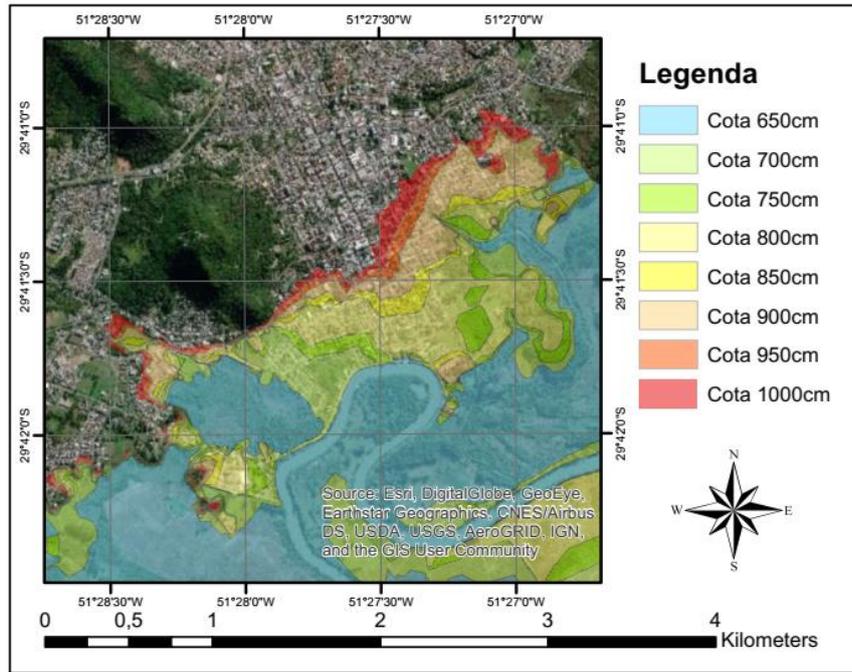


Figura 13: Manchas de inundação dispostas por variação de cotas posto Montenegro (87270000).

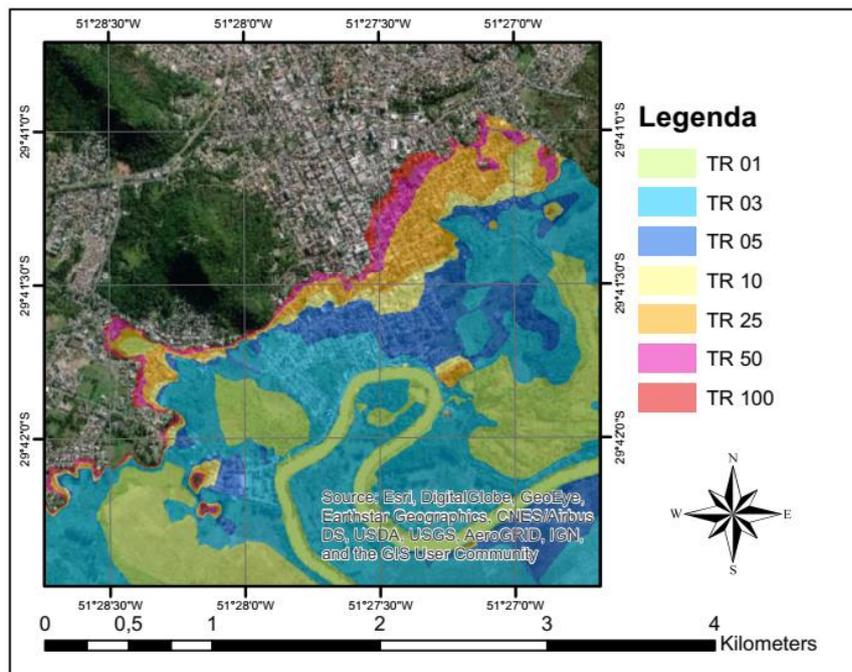


Figura 14: Manchas de inundação dispostas por tempo de retorno respectivamente posto Montenegro (87270000).

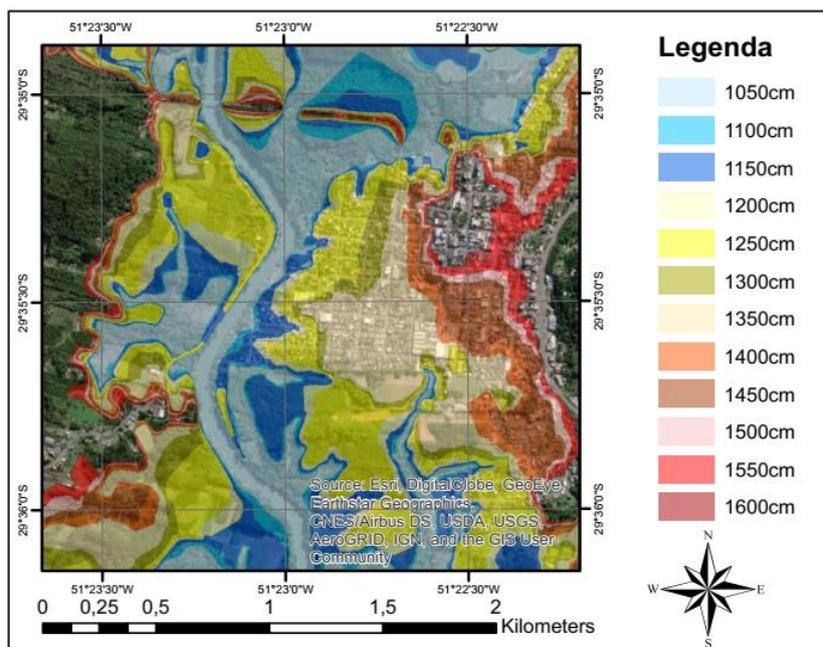


Figura 15: Manchas de inundação dispostas por variação de cotas posto Barca do Caí (87170000).

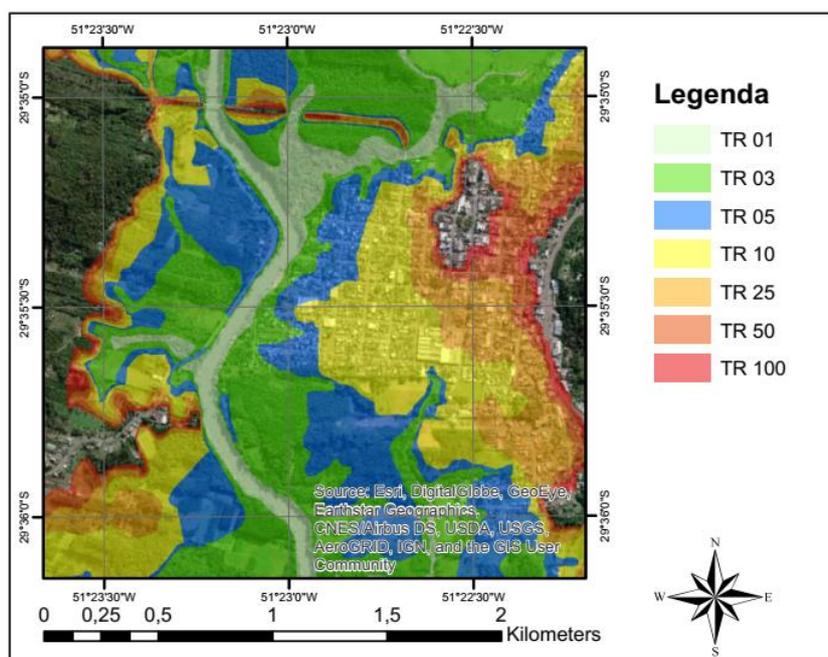


Figura 16: Manchas de inundação dispostas por tempo de retorno posto Barca do Caí (87170000).

Parte das variáveis utilizadas para o desenvolvimento das estimativas são padronizadas de acordo com a classe socioeconômica de cada setor censitário segundo critério desenvolvido pela ABEP (2016), apresentado na tabela 06, e a quantidade de imóveis atingidos pela inundação obtidos através do cruzamento de cada mancha de inundação com a grade estatística do IBGE, sendo seu enquadramento, para quantificação de área e padrão construtivos, proposto pela ABNT conforme tabela 07.

Tabela 6: Critério de divisão de classes socioeconômicas de acordo com a renda familiar.

Classe	Renda familiar média (R\$)
A	20.888
B1	9.254
B2	4.852
C1	2.705
C2	1.625
D-E	768

Tabela 7: Características das residências padrão por classe socioeconômica.

Classe ¹	Tipo de Residência ²	Código ²	Descrição ²	Área (m ²) ²
D-E	Popular	RP1Q	Sala, 1 quarto, banheiro e cozinha	39,56
C	Padrão Baixo	R1 – B	Sala, 2 quartos, banheiro, cozinha e área de serviço	58,64
B	Padrão Normal	R1 – N	Sala, 3 quartos (1 suíte), banheiro, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda/abrigo.	106,44
A	Padrão Alto	R 1 – A	Sala, 4 quartos (2 suítes e 1 closet), banheiro, cozinha, dependências completas de serviço e varanda/abrigo	224,82

A quantificação do dano total é obtida através do somatório dos danos às edificações e seu conteúdo, custo de limpeza e paralização de atividades econômicas. Fadel (2015) e Tachini (2010) utilizaram um imóvel padrão para a análise dos danos, o que resulta em dados de prejuízo unitário, sendo este possível de ser extrapolado para quaisquer áreas inundadas, de qualquer padrão construtivo, este conceito também foi utilizado neste trabalho. Os danos as edificações podem ser obtidos utilizando o Custo Básico de Construção Civil (CUB) para o estado do Rio Grande do Sul, tabela 08, como unidade base, uma vez estimado o custo das edificações de acordo com a classe econômica do setor censitário na qual estão inseridas, bem como a quantidade de residências atingidas através da grade estatística e a profundidade a que foram submetidas, tabela 09, é possível calcular o dano total as edificações através da seguinte expressão:

$$DE=0.05 \times CUB \times Ped \times Ua \quad (7)$$

Onde:

0.05: fator de depreciação para imóveis usados de 5%, proposto por Tachini (2010);

DE: dano residencial relativo à edificação [R\$];

CUB: custo unitário de construção civil [R\$/m²];

Ped: percentual de dano à edificação;

Ua: unidades atingidas;

Tabela 8: Custo unitário básico de construção para cada classe socioeconômica.

Classe ¹	CUB abr/19 (R\$/m ²)
D-E	1.515,23
C	1.445,19
B	1.824,26
A	2.293,12

Tabela 9: Percentual de dano à edificação dos imóveis padrão, conforma altura de submersão.

Classe	Altura de submersão (m)				
	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
A	16%	20%	24%	28%	32%
B	13%	17%	20%	26%	28%
C	13%	16%	18%	24%	26%
D-E	14%	17%	20%	26%	28%

Os danos ao conteúdo foram calculados conforme metodologia apresentada por Fadel (2015), que levou em consideração o conteúdo de um imóvel padrão, anexo 9.7, conforme a classe social média da região, para os municípios estudados foi adotado padrão B2, os valores dos itens que compõe o conteúdo do imóvel padrão foram atualizados com uma pesquisa de mercado local, para os imóveis compreendidos em setores censitários de outras classes foi aplicado um fator ponderador conforme tabela 10, assim é possível calcular o dano ao conteúdo através da seguinte expressão:

$$DC = 0,5 . Cip . Fm . Ua . Pdc \quad (8)$$

Onde:

DC: dano relativo ao conteúdo das residências [R\$];

0,5: Fator de depreciação por tempo de uso do conteúdo;

Cip: custo do conteúdo do imóvel padrão [R\$];

Fm: fator de multiplicação;

Ua; unidades atingidas

Pdc: percentual de dano ao conteúdo (obtido em fator da profundidade de submersão);

Tabela 10: Fator de multiplicação para as demais classes socioeconômicas.

Classe	FM (padrão B2)
A	1.64
B1	1.21
B2	1
C1	0.79
C2	0.69
D-E	0.25

O custo de limpeza é estimado em virtude da quantidade de horas gastas para limpeza do domicílio atingido, tabela 11, levando em consideração o nível de submersão que a residência foi submetida, renda familiar e demais encargos sociais que incidem sobre o salário, assim é possível calcular o custo de limpeza através da seguinte expressão:

$$DL = Rf \cdot Tl \cdot Ua \quad (9)$$

Onde:

DL: dano relativo à limpeza da residência [R\$];

Rf: renda média mensal familiar já adicionada de encargos sociais [R\$/h];

Tl: tempo de limpeza [horas/m² pessoa];

Ua: unidades atingidas [m²];

Hm: total de horas de trabalho por mês [h/mês] (média de 21 dias trabalhados ao longo do mês e 8 horas diárias)

Tabela 11: Tempo médio de limpeza conforme a profundidade de submersão.

Nível de Submersão (m)	Horas/m² pessoa
0.50 a 0.75	0,25
0.75 a 1.00	0,5
1.00 a 1.50	1,0
1.50 a 2.00	3,0
2.00 a 3.50	5,0
3.50 a 5.00	8,0

Os danos por dias parados têm relação com a paralização das atividades econômicas em decorrência do evento de inundação, levando em consideração a quantidade de pessoas atingidas e seu nível socioeconômico, podendo ser calculado através da seguinte expressão:

$$DDP = \frac{RF}{Nd} \cdot Pop_i \cdot D_i \quad (10)$$

Onde

DDP: dano relativo aos dias de paralização das áreas atingidas [R\$];

Rf: renda média mensal familiar [R\$/mês];

Nd: número de dias do mês;

PopI: número de pessoas atingidas pela inundação;

DI: duração da inundação [dias];

4.4.2 Prejuízo total da inundação

De posse da quantificação dos prejuízos associados a cada tipo de dano podemos estimar o prejuízo total, para cada nível da inundação, a partir da seguinte expressão:

$$D_{total_i} = DDP_i + DE_i + Dc_i + DL_i \quad (11)$$

Onde

Dtotal: dano total por nível de inundação [R\$];

i: nível previsto considerado.

DDP: dano relativo aos dias de paralização das áreas atingidas;

DE: danos as edificações;

Dc: Danos ao conteúdo;

DL: custo de limpeza.

4.5 Integração de dados em formato de boletins

Conforme as diretrizes propostas neste estudo, a integração das informações obtidas nas diferentes etapas (mapeamento, quantificação de prejuízos e modelagem hidrológica) deve culminar na geração de um produto, integrante do projeto de sistemas de alertas hidrológicos desenvolvido pelo SGB, com finalidade de subsidiar a tomada de decisão

por entidades governamentais e outros setores da sociedade envolvidos no gerenciamento de situações de risco, deste modo a sua composição deve ser realizada de forma a possibilitar a elaboração de um informe de fácil interpretação pelos usuários governamentais (defesa civil, bombeiros, prefeitura municipal) e a população diretamente afetada, além de possibilitar a divulgação de forma ampla e rápida.

A experiência acumulada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), na operação de sistemas de alertas hidrológicos desde 1989, tem demonstrado que a divulgação de prognósticos, para eventos hidrológicos extremos, em formato de boletins informativos, construídos em conjunto com as defesas civis, tem apresentado sucesso, uma vez que conseguem expressar dados provenientes de modelos complexos de forma objetiva e simplificada, possibilitando a compreensão, mesmo, de usuários com pouca familiaridade ao tema, bem como esse modelo de transmissão de informação tem sido utilizado por diversas instituições no País, como CEMADEN, INPE e INMET, para emissão de prognósticos e alertas de diversas naturezas, o que gera familiaridade com os atores envolvidos no processo de tomada de decisão.

A elaboração do boletim informativo, responsável por entregar ao público os resultados desse estudo, deve considerar a construção de cenários base com elementos informativos básicos. Os cenários base adotados, para os municípios afetados, serão construídos a partir do cruzamento das informações obtidas nos diagnósticos realizados nas etapas anteriores, sendo cada cenário composto por um conjunto de três informações básicas, previsão do nível do corpo hídrico, área a ser inundada e prejuízo estimado para essa área, a sua construção é exemplificada na figura 17, assim para cada cota prevista é elaborado um cenário.

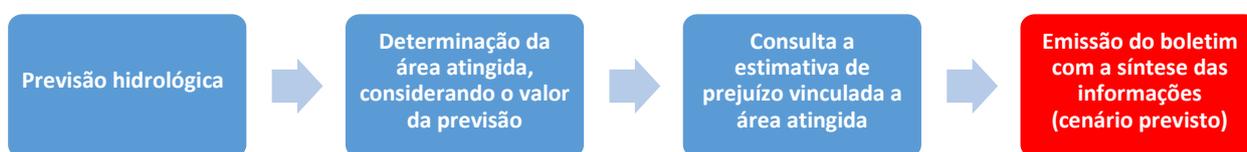


Figura 17: fluxograma para determinação de um cenário base

Para a elaboração dos cenários, nas cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro, serão consideradas os intervalos de cotas compreendidas entre o início dos prejuízos da inundação e a maior faixa de inundação considerando um TR de 100 anos, além da escolha dos intervalos de cotas para construção dos cenários foram determinadas cotas

auxiliares de atenção e alerta, segundo metodologia apresentada por Germano (2017), a definição desses parâmetros foi realizada com a finalidade de se estabelecer uma rotina operacional para construção e emissão dos boletins, sendo respectivamente os estágios de mobilização e organização das equipes que operarão o sistema e o início da emissão dos alertas ao público.

Os valores das cotas auxiliares podem ser obtidos a partir de uma análise de frequência de cotas utilizando métodos de ajuste clássicos, como o Normal, Log-Normal, Gumbel e levantamentos de campo, uma vez determinado o TR da cota de início de inundação (cota obtida em campo em conjunto com moradores e defesa civil), estima-se as cotas de atenção e alerta considerando que tenham, respectivamente, 50% e 75% do TR da de inundação, esses percentuais foram obtidos de forma empírica portanto podem ser dilatados a partir de uma análise do tempo médio transcorrido entre a obtenção de uma cota de alerta e a inundação propriamente dita, de modo a compatibilizar o tempo decorrido a um tempo de resposta mínimo necessário à mobilização da defesa civil.

Quanto a escolha dos elementos informativos que compõe o boletim de divulgação, foram consideradas as informações indispensáveis a boa compressão dos usuários, descritos a seguir e definidos em conjunto com as defesas civis dos municípios envolvidos.

1. Indicação do cenário atual, contendo a quantidade de chuva acumulada nas últimas 24 horas, bem como o nível dos rios monitorados em todos os postos de monitoramento da bacia, contendo representação numérica e gráfica;
2. Definição e apresentação de cotas de referência (atenção, alerta e inundação), conforme metodologia apresentada por Germano (2017), que servirão de base para início da emissão dos boletins ao público e apresentação, de forma simplificada, da situação geral de uma região;
3. Indicação dos níveis a serem atingidos em diferentes horizontes de tempo;
4. Indicação do prejuízo estimado para cada nível previsto;
5. Apresentação do mapa das áreas a serem atingidas, indicando ruas e acessos a serem inundados.

Adicionalmente aos elementos supracitados o boletim deve conter a identificação da instituição responsável pela operação do sistema e o responsável técnico pela montagem do informe e revisão dos dados durante um evento, bem como os principais canais de comunicação e considerações sobre a natureza estatística das previsões e suas implicações.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do modelo de previsão fluviométrica

Durante a condução dos estudos preliminares buscou-se determinar as estruturas e formatos de entrada que proporcionassem as melhores eficiências durante o processo de treinamento, e para tanto se pesquisou quais defasagens temporais, aplicadas as variáveis de entrada, proporcionavam as melhores correlações com os valores em tempo atual. Nesta etapa foi possível observar que a simples defasagem temporal aplicada aos dados pluviométricos gerou correlações baixas para qualquer defasagem pesquisada, relação inversa aos dados fluviométricos que apresentavam correlação significativas entre os postos Nova Palmira e Barca do Caí, máximas para uma defasagem de 10h, e Nova Palmira e Passo Montenegro, máximas para uma defasagem de 16h. Os dados obtidos nesta pesquisa podem ser vistos de forma resumida na tabela 12 e 13, e integralmente no anexo 9.3, onde os valores intermediários (segunda linha de cada caso) correspondem às defasagens com máxima correlação, indicando, com estas defasagens, o tempo estimado de deslocamento do fluxo.

Tabela 12: Análise de correlação entre os postos fluviométricos e as estações Barca do Caí e Passo Montenegro; def - defasagem (h), r – correlação.

Pesquisa de Correlações	Barca do Caí F		Passo Montenegro F	
	def	r	def	r
Costa do Cadeia F	0	0.952	0	0.93
	0	0.952	5	0.936
	240	0.246	240	0.246
Nova Palmira F	0	0.84	0	0.84
	10	0.888	16	0.835
	240	0.23	240	0.242
Barca do Caí F	-	-	def	r
	-	-	0	0.968
	-	-	6	0.976
	-	-	240	0.321

Tabela 13: Análise de correlação entre os postos pluviométricos e as estações Barca do Caí e Passo Montenegro; def - defasagem (h), r – correlação.

Pesquisa de Correlações	Barca do Caí F		Passo Montenegro F	
	def	r	def	r
Capão dos Coxos P	0	0.071	0	0.051
	26	0.236	35	0.204
	240	0.05	240	0.05
São Vendelino P	0	0.058	0	0.039
	26	0.235	40	0.205
	240	0.052	240	0.049
Nova Palmira P	0	0.045	0	0.031
	28	0.203	36	0.181
	240	0.048	240	0.05
Costa do Cadeia P	0	0.081	0	0.064
	25	0.24	38	0.229
	240	0.046	240	0.058
Passo Montenegro P	0	0.054	0	0.041
	29	0.183	41	0.176
	240	0.043	240	0.046

Além da análise das defasagens temporais foi determinado o impacto que a aplicação de transformações aritméticas, por diferentes tipos de médias móveis, que as variáveis de entrada proporcionavam, tendo como parâmetro de eficiência a correlação com a variação produzida nas cotas, entre o tempo atual e o tempo correspondente ao horizonte de previsão. Os resultados demonstraram que a aplicação de MMG, com pequenas exceções em alcances curtos, para os dados pluviométricos de todos os postos de monitoramento em ambos os modelos, apresentou valores de correlações superiores à utilização de dados sem transformações ou com aplicação das demais técnicas. O posto São Vendelino (87168000) apresentou os maiores valores correlacionais indicando a sua maior influência sobre a variação de cotas nos postos Passo Montenegro e São Sebastião do Caí em qualquer horizonte de tempo pesquisado.

Quanto aos resultados obtidos para os dados fluviométricos, a aplicação de MME revelou os melhores resultados para o posto Nova Palmira (87160000), para os demais postos a variação de valores foram baixas, mantendo respostas similares para qualquer pesquisa realizada. Também foi constatado que os valores de correlação declinam

conforme o aumento do alcance estudado, nas análises com dados pluviométricos e fluviométricos, resultado esperado, uma vez que dados anteriores influenciam cada vez menos os níveis no horizonte de previsão à medida que este avança no tempo, uma síntese dos resultados obtidos é apresentada nos gráficos 3 a 17, bem como os resultados são apresentados em sua integralidade no anexo 9.1.

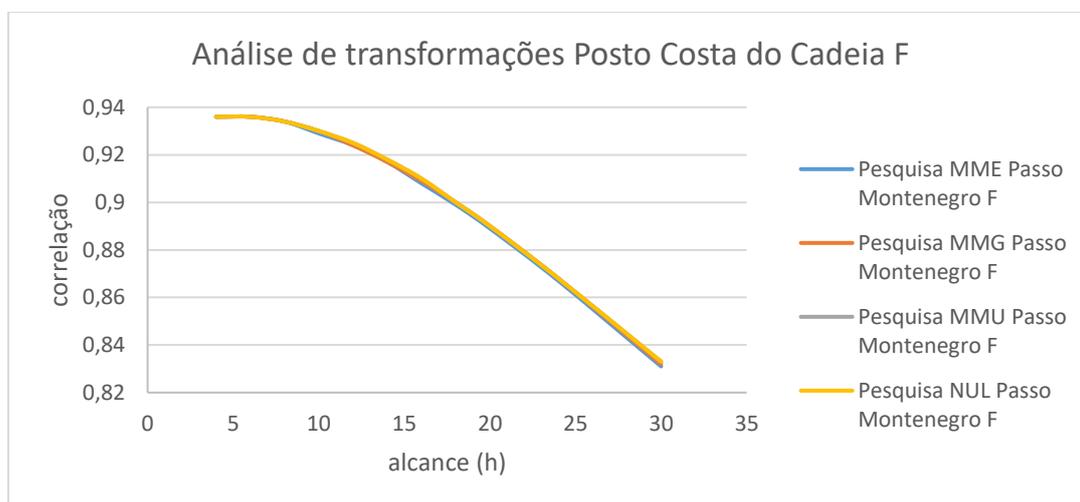


Gráfico 3: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Costa do Cadeia e Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

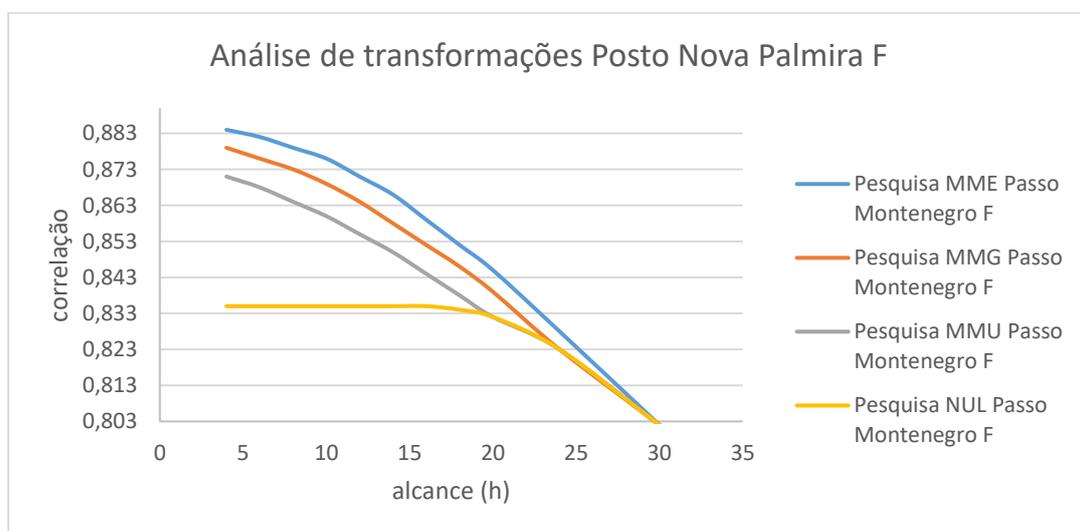


Gráfico 4: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Nova Palmira e Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

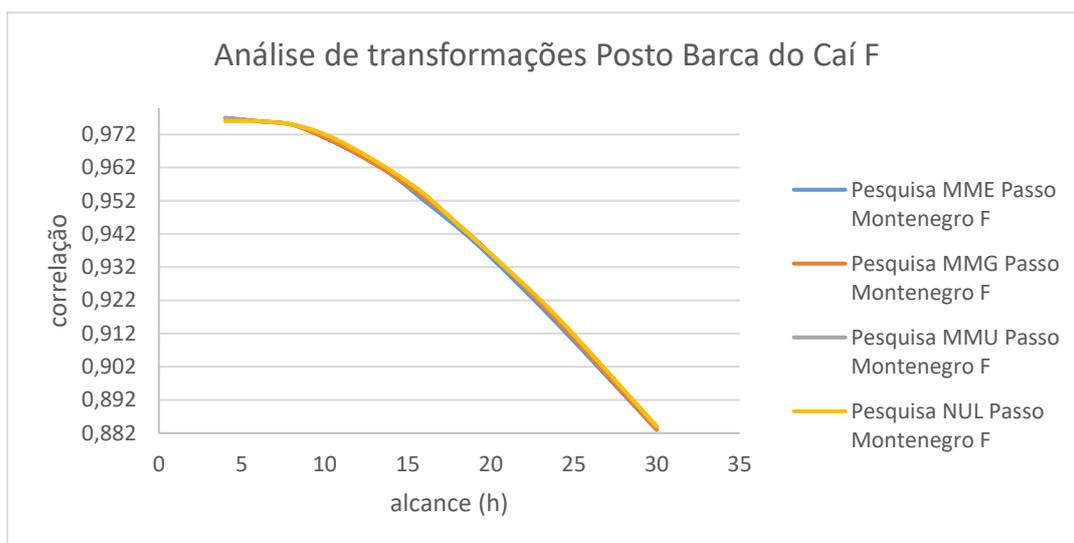


Gráfico 5: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Barca do Caí e Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

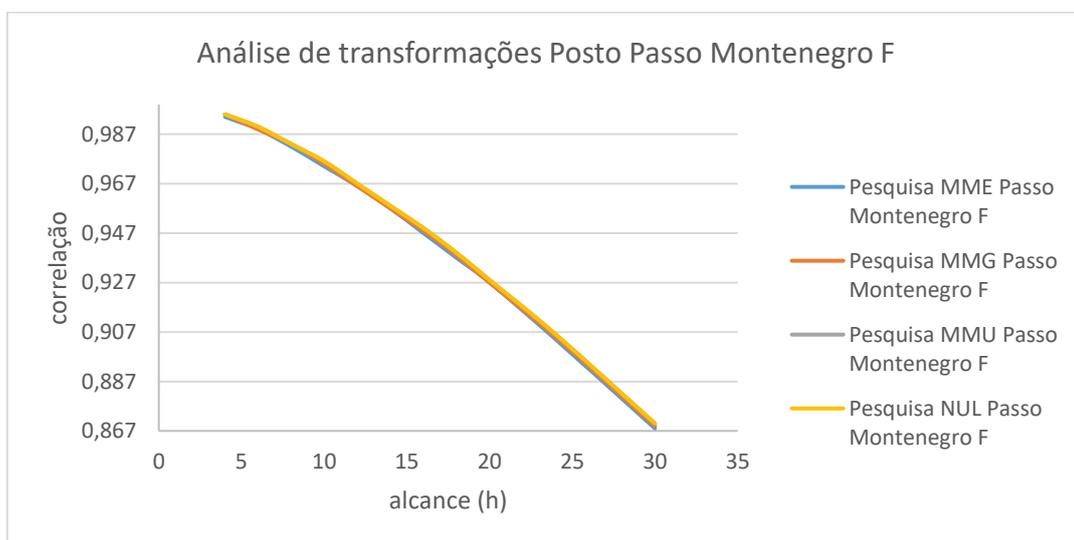


Gráfico 6: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

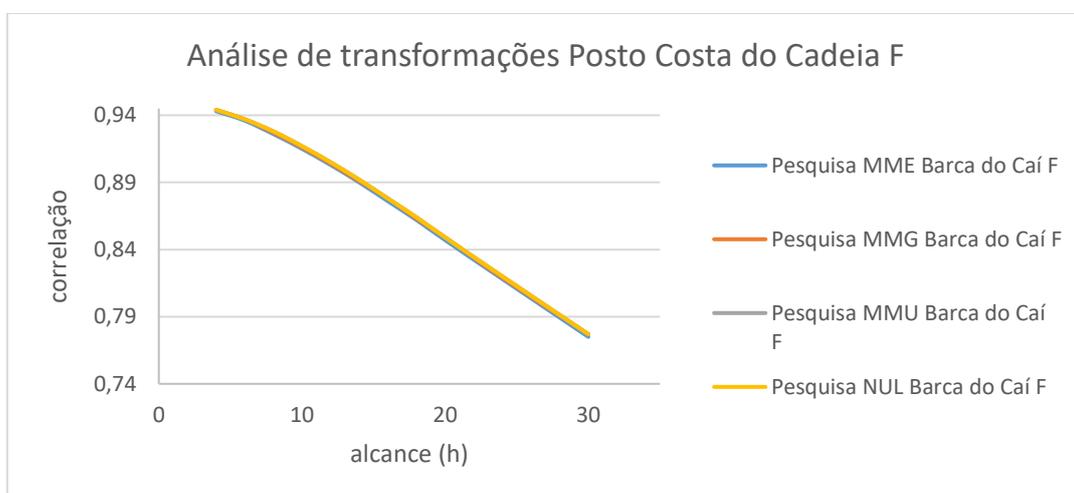


Gráfico 7: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Costa do Cadeia e Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

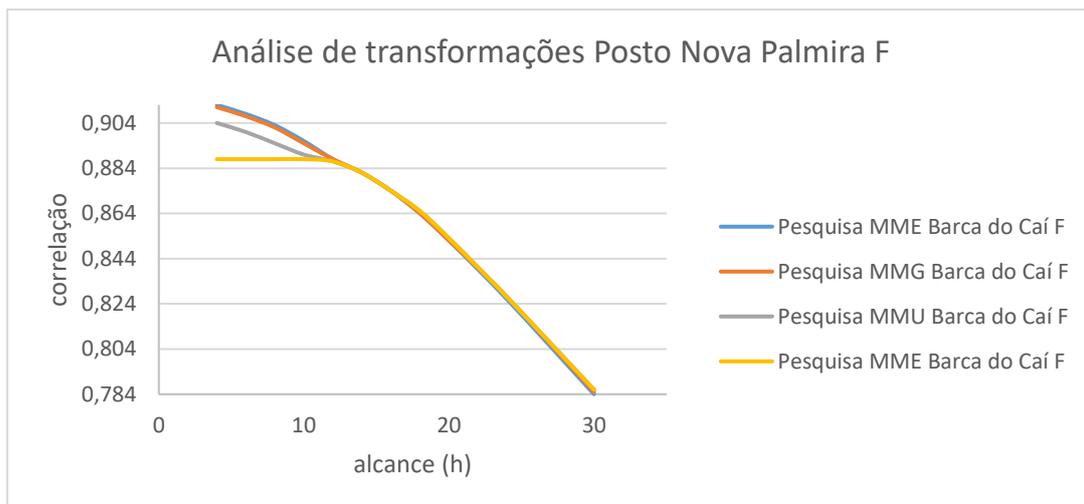


Gráfico 8: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Nova Palmira e Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

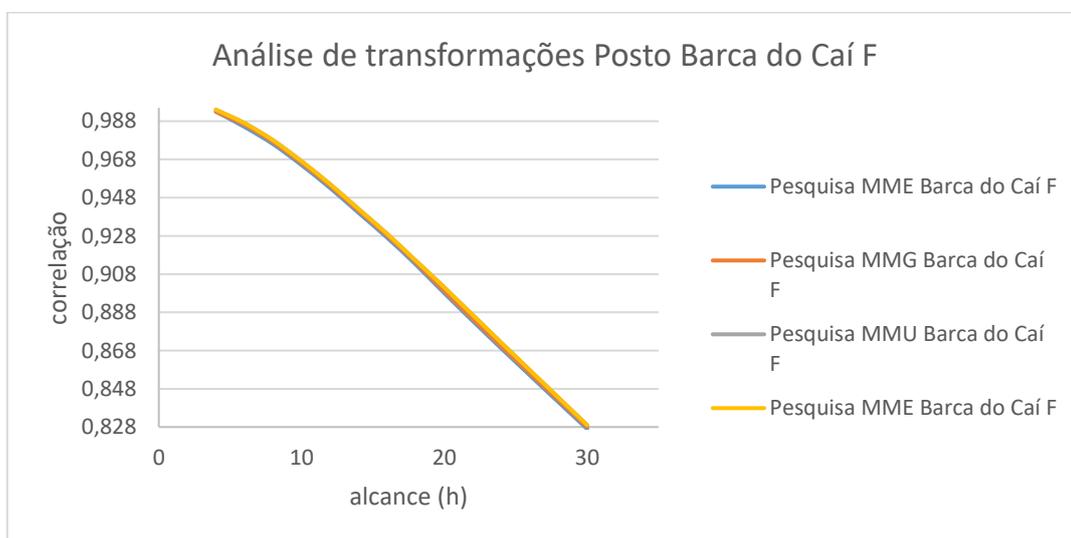


Gráfico 9: Análise de correlação entre os dados fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

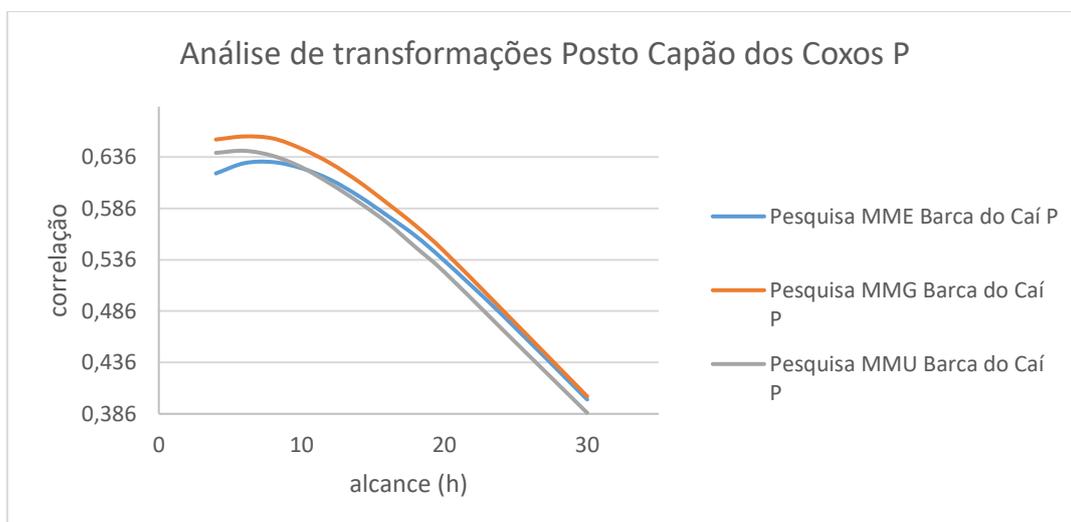


Gráfico 10: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Capão dos Coxos e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

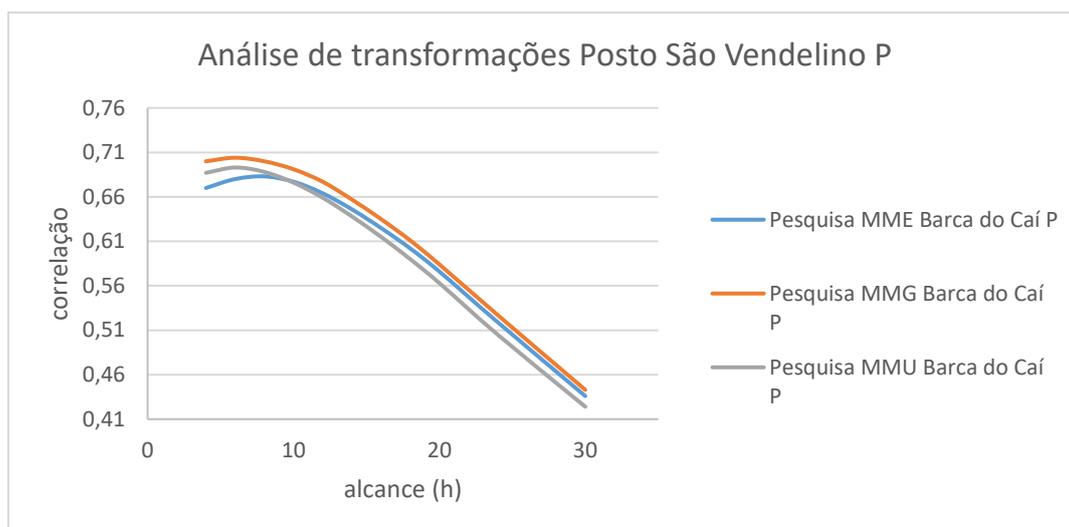


Gráfico 11: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto São Vendelino e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

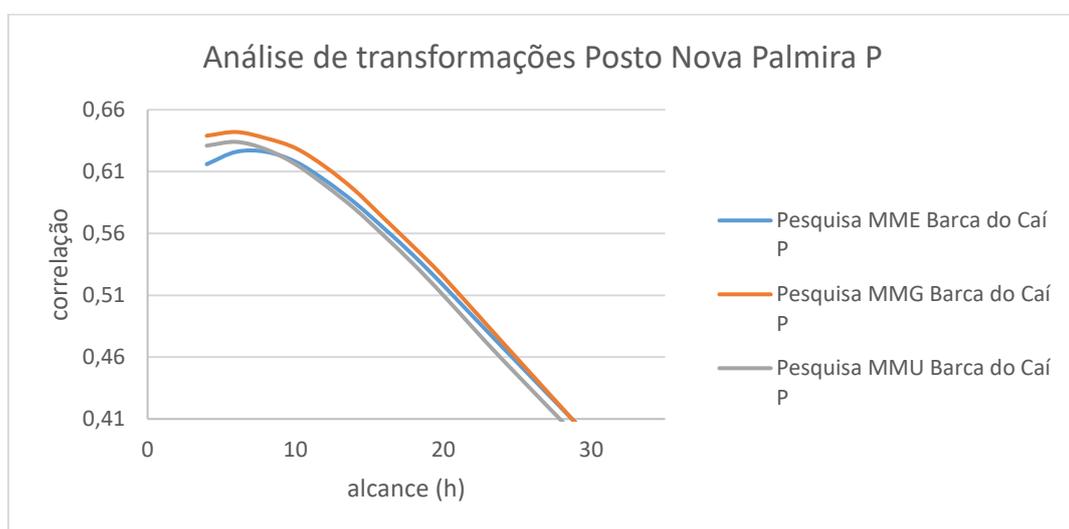


Gráfico 12: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Nova Palmira e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

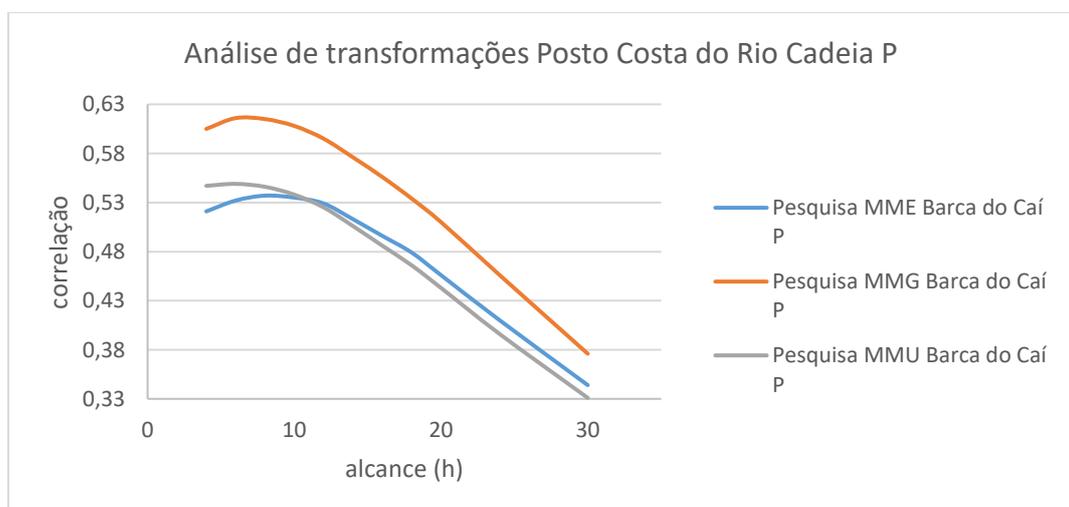


Gráfico 13: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Costa do Rio Cadeia e os fluviométricos do posto Barca do Caí após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

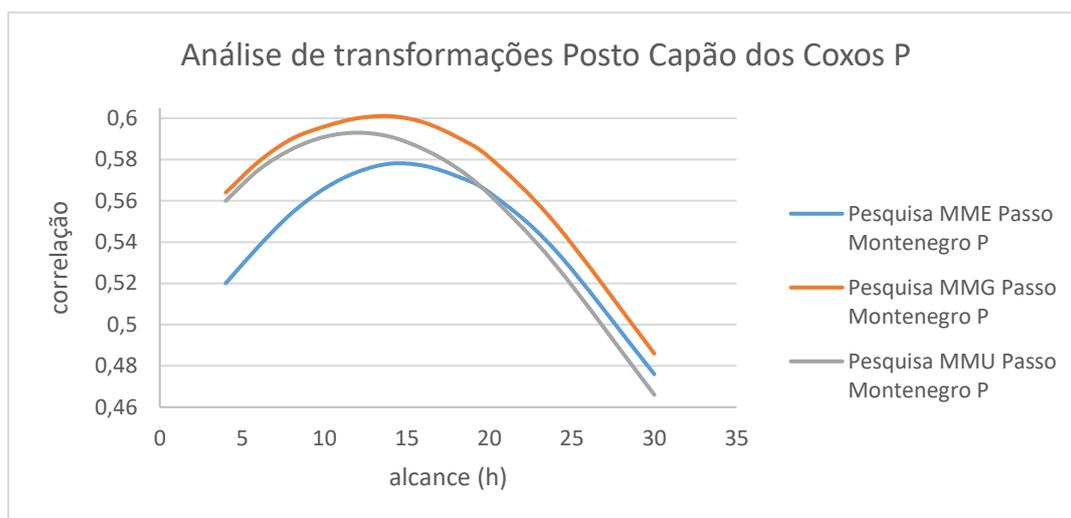


Gráfico 14: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Capão dos Coxos e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

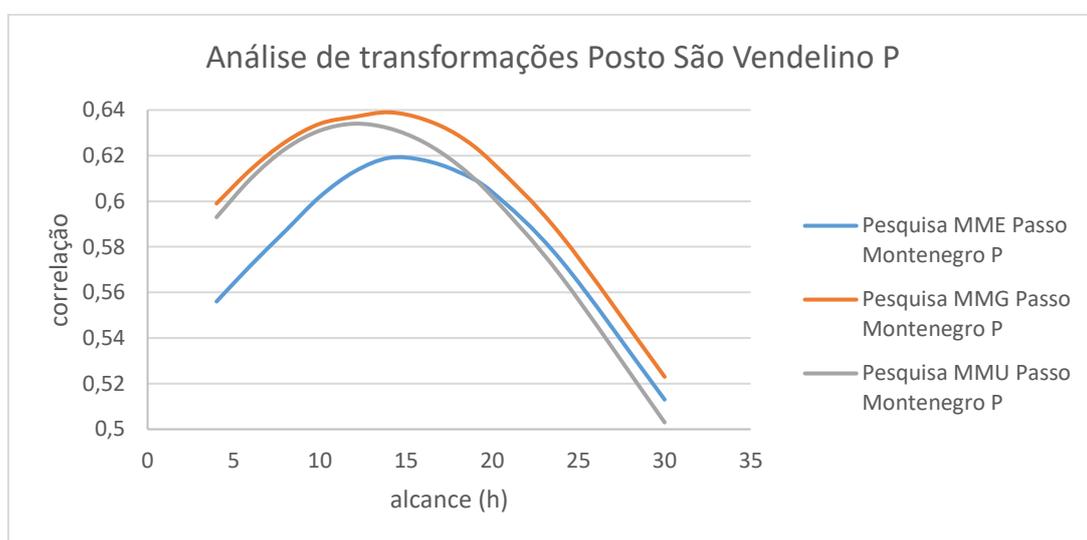


Gráfico 15: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto São Vendelino e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

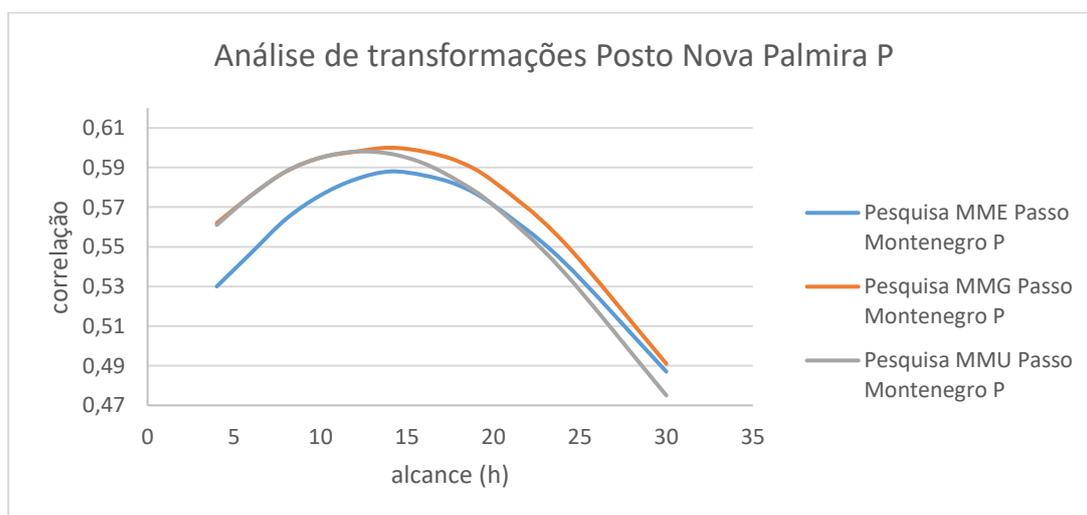


Gráfico 16: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Nova Palmira e os fluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias móveis os dados de entrada.

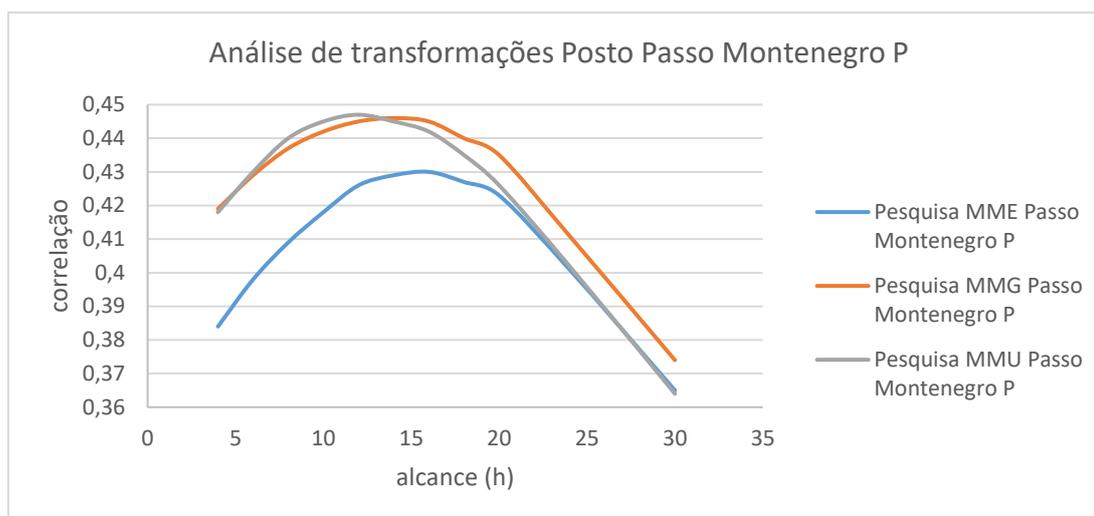


Gráfico 17: Análise de correlação entre os dados pluviométricos do posto Passo Montenegro e os pluviométricos do posto Passo Montenegro após a aplicação de médias moveis os dados de entrada.

Foi pesquisada, de forma a complementar as análises anteriores e com a finalidade de minimizar a demanda computacional durante o processo de treinamento das RNA's, a influência no desempenho do modelo mediante a utilização de amostras de treinamento com diferentes quantidades de registros, selecionados através de amostragem sistemática. Para tanto, foram utilizadas amostras com acréscimos da ordem de 100 registros, variando de 50 a 2000 entradas para cada posto de monitoramento, bem como foram simulados diversos alcances de previsão podendo-se diagnosticar a influência da utilização de diferentes quantidades de registros para cada alcance pesquisado. Os desempenhos nos testes de validação aumentaram de forma suave, alcançando valores máximos na faixa de 700 a 1700 registros, sem grandes variações nessa faixa, conforme tabela do anexo 9.2. Também foi possível observar que a influência no desempenho em alcances pequenos (4h à 6h) é pouco perceptível quando se trabalha com valores superiores a 100 registros.

Diversas avaliações estatísticas, descritas na metodologia, foram utilizadas na avaliação dos modelos ao longo do processo de treinamento, no entanto, para a escolha dos modelos finais de previsão, levou-se em consideração, primordialmente, a sua eficiência em função do coeficiente de NS, sendo adotados como critérios secundários de avaliação o erro médio absoluto e o erro no quantil $E_{0,9}$. Quanto ao processo de escolha do nível de complexidade estrutural, que consiste no número de neurônios nas camadas internas, foi escolhido os que apresentou a menor complexidade sem que os resultados da eficiência fossem comprometidos. Para tanto, foram simuladas redes superdimensionadas (20 neurônios internos) e seus resultados de desempenho foram comparados com redes de complexidade inferiores até que se encontrasse o limiar de complexidade onde o

decaimento da performance mudava de patamar. Os limiares de complexidade resultantes deste procedimento foram de 5 e 4 neurônios, respectivamente para o modelo de São Sebastião do Caí e Montenegro. Os resultados dessa fase da pesquisa podem ser vistos de forma integral no anexo 9.3.

Observou que para alcances acima de 20h havia uma degeneração da eficiência dos modelos gerados para o posto Barca do Caí a despeito do seu nível de complexidade, o mesmo ocorrida para o posto Passo Montenegro em horizontes superiores a 24h, deste modo foram fixados os alcances de 20h e 24h, respectivamente para São Sebastião do Caí e Passo Montenegro, como os limites para a geração de previsões, os resultados são apresentados de forma sintética nas tabelas 14 e 15, respectivamente para os postos de São Sebastião do Caí e Montenegro.

Tabela 14: Estatísticas de desempenho da RNA na previsão de níveis para o posto Barca do Caí; NS - Nash-Sutcliffe; E90 – erro no quantil $E_{0,9}$, Mea – erro médio absoluto, nni- número de neurônios na camada intermediária, alc – alcance da previsão.

avaliação- nni	alc na validação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -5	1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.91	0.87	0.81	0.69
E90 - 5	6.12	10.1	12.7	14	13.9	20.8	24.3	33.7	29.2	31.8	48.9
Mea - 5	5.67	8.11	9.74	11.1	12.9	17.5	20.3	24.2	26	31.7	40.6
Avaliação- nni	alc na verificação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -5	1	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.9	0.86	0.77
E90 - 5	10.5	13.8	20.5	19	20.4	32.8	43.9	42.8	49.8	71.2	137.4
Mea - 5	7.46	10.9	14.1	15.6	17.8	24.3	29.4	30.8	37.2	45.1	59.3

Tabela 15: Estatísticas de desempenho da RNA na previsão de níveis para o posto Passo Montenegro; NS - Nash-Sutcliffe; E90 – erro no quantil $E_{0,9}$, Mea – erro médio absoluto, nni- número de neurônios na camada intermediária, alc – alcance da previsão.

Avaliação- nni	alc na validação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.88	0.8
E90 - 4	7.43	11.4	14.2	16.6	17.5	18.7	20.1	19.5	21.6	23.8	30.4
Mea - 4	4.82	7.04	8.93	10.2	11.7	12.5	13.1	13.9	14.7	17.9	23.8
avaliação/ nni	alc na verificação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.93	0.88
E90 - 4	10.4	17.8	19.5	20.2	20.4	22.8	26.2	26.1	28.1	36	55.8
Mea - 4	5.27	8.57	10.4	10.8	12.6	14.9	16.4	17.9	19	24.6	32.7

O desempenho do modelo resultante para Passo Montenegro foi superior ao do Barca do Caí, principalmente quando comparados alcances superiores a 14h. Esse fato pode ser explicado, a despeito da natureza matemática da técnica empregada para a modelagem, devido ao tamanho da área de drenagem de cada posto e a velocidade de resposta associada a essa área, quanto maior a área de drenagem mais demorada a resposta o que possibilita melhores correlações com os dados dos postos de montante em horizontes de previsão superiores, os resultados são apresentados de forma sintética no gráfico 18. A listagem completa dos resultados obtidos durante a avaliação de desempenho individual e os testes comparativos de complexidade podem ser observados nas tabelas presentes no anexo 9.3.

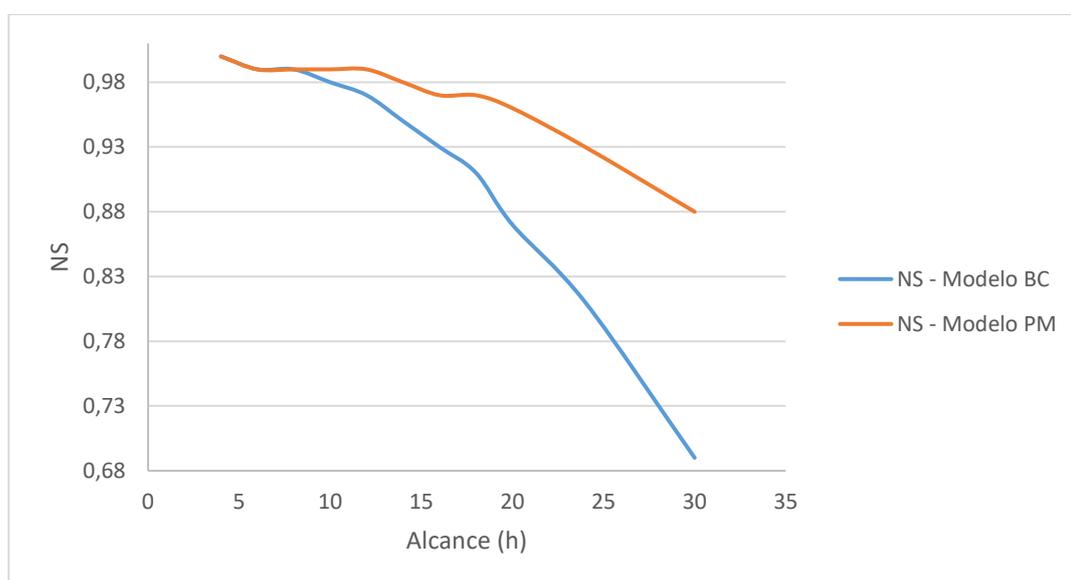


Gráfico 18: Evolução da eficiência do modelo com o aumento do alcance de previsão.

Comparativamente ao modelo desenvolvido em 2013, utilizando dados de dupla cota (7h e 17h), houve ganho de desempenho para o mesmo horizonte de previsão, 10 horas, conforme dados apresentados na tabela 16, sendo o ganho mais sensível observado ao se comparar os valores dos erros que não foram superados em 90% das previsões (representados pelo $E_{0,90}$), onde houve uma redução de 51% no posto BC e 12% no posto PM, mesmo para alcances elevados, de 20h em São Sebastião do Caí e 24 h em Montenegro. O coeficiente de Nash-Sutcliffe, que representa a proporção da variância explicada pelo modelo, se manteve acima de 0,9, em uma escala que varia de menos infinito (pouco explicativo) a 1 (muito explicativo), no entanto, o maior ganho pode ser atribuído à expansão dos horizontes de previsão, que passam de 10h para 20h em São Sebastião do Caí e de 10h para 24h em Passo Montenegro. Essa dilatação temporal representa um avanço na forma em que a defesa civil poderá lidar com as situações de

risco hidrológico, uma vez que proporciona informações com maior antecedência, para auxílio à tomada de decisão, a qual viabiliza a gestão de pessoas e recursos de forma mais organizada e eficiente.

Tabela 16: Comparação do desempenho, na série de verificação, entre o modelo desenvolvido em 2013 e o desenvolvido em 2018.

Postos	Modelo- alc-ano	NS	EM (cm)	E _{0,9} (cm)
Barca do Caí	BC10-2013	0,96	17,6	39,0
Barca do Caí	BC10-2018	0,98	15,6	19,0
Barca do Caí	BC14-2018	0,96	24,3	32,8
Passo Montenegro	PM10-2013	0,98	11,5	24,4
Passo Montenegro	PM10-2018	0,99	10,8	20,2
Passo Montenegro	PM14-2018	0,98	14,9	22,8

Embora os resultados obtidos pareçam muito promissores, se faz necessário o acompanhamento da operacionalização dos modelos de previsão, realizando, de forma periódica, uma análise de seu comportamento em diversos eventos, com posteriores ajustes no tocante aos alcances utilizados e o seu emprego em diferentes situações de risco. Outro ponto relevante é que o aumento do banco de dados, com dilatação de seu domínio no decorrer do tempo, proporcionado pela manutenção das redes de monitoramento, a qual propiciará subsídio para a revisão do treinamento da RNA, podendo resultar em melhoras significativas no desempenho do modelo.

5.2 Manchas de inundação por limiares de cotas

Neste subitem são apresentados os resultados referentes ao mapeamento das áreas inundáveis, tendo como referência as seções linimétricas 87170000 (Barca do Caí) e 87270000 (Passo Montenegro), conforme metodologia apresentada no item 5.2, o mapeamento abrangeu, apenas, o perímetro urbano dos dois municípios e foi limitado a área coberta pelas ortofotos utilizadas como base para a geração do MDT, a abrangência foi superior a 90% da área de interesse em ambas as regiões estudadas.

Em São Sebastião do Caí, para a seção linimétrica 87170000, foram geradas manchas de inundação com variação de níveis de 0,5 m no intervalo de cotas de 1050 cm (início dos prejuízos da inundação em área urbana) e 1650 cm (nível para um TR de aproximadamente 100 anos). A validação foi realizada a partir da comparação de dados coletados em campo, após a inundação de outubro de 2015, e o mapeamento gerado para a cota 1350, através de um levantamento GPS semi-cinemático, feito com equipamento

geodésico de dupla frequência, que identificou 42 marcas (pontos) de referência, vinculadas a maior cota observada durante esse evento (1360 cm), durante a comparação foi possível identificar, aproximadamente, 93% de correspondência entre os pontos coletados em campo e os gerados computacionalmente, os resultados do mapeamento são apresentados de forma resumida na figura 18.

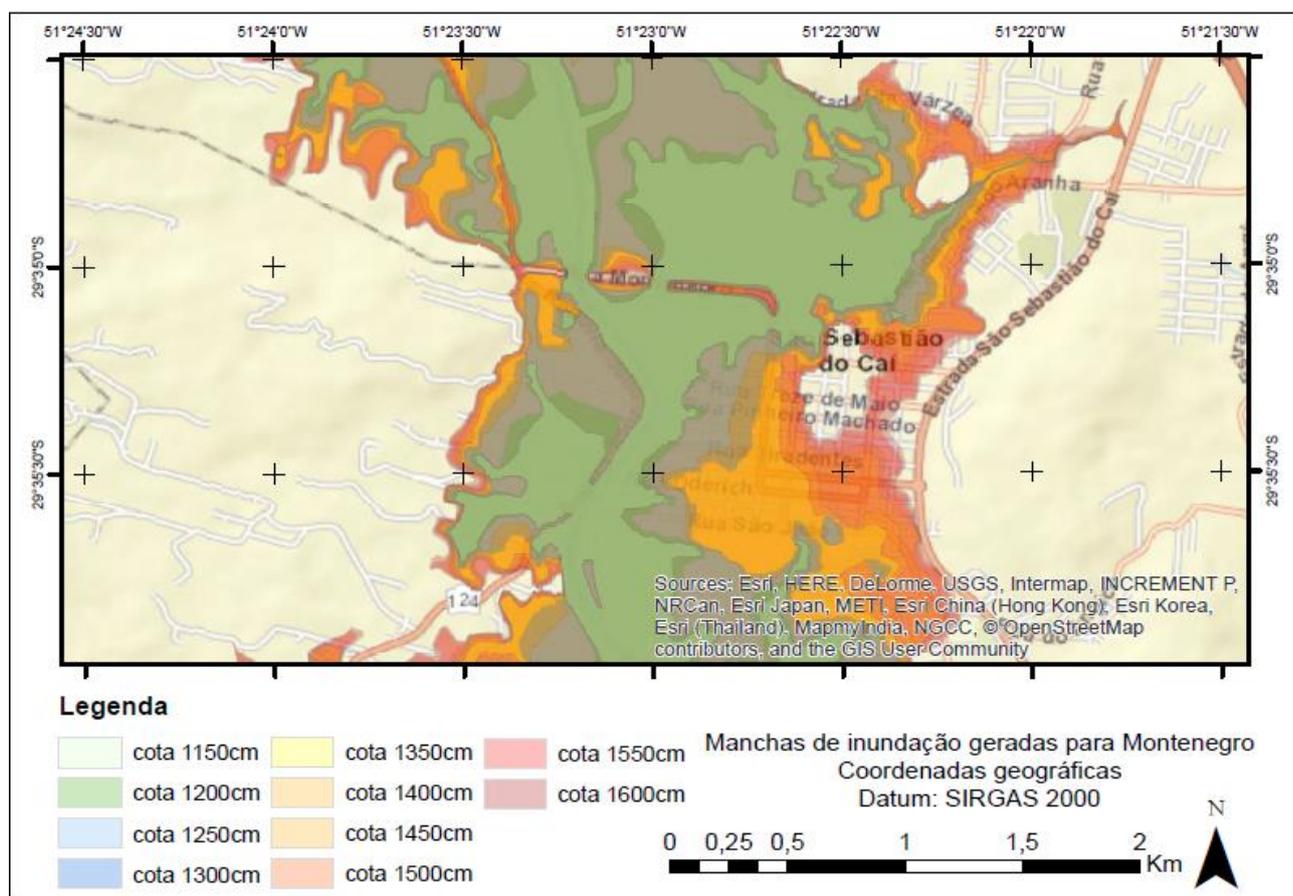


Figura 18: delimitação das áreas de inundação por níveis linimétricas para o município de São Sebastião do Cai .

No município de Montenegro, para a seção linimétrica 87270000, foram geradas manchas de inundação com variação de níveis de 0,5 m no intervalo de cotas de 650 cm (início dos prejuízos da inundação em área urbana) e 1000 cm (nível para um TR de aproximadamente 100 anos). A validação foi realizada a partir da comparação de dados coletados em campo, após a inundação de outubro de 2015, e o mapeamento gerado para a cota 800 cm, através de um levantamento GPS semi-cinemático, feito com equipamento geodésico de dupla frequência, que identificou 55 marcas (pontos) de referência, vinculadas a maior cota observada durante esse evento (815 cm), durante a comparação foi possível identificar, aproximadamente, 90% de correspondência dos pontos coletados em campo com os gerados computacionalmente, adicionalmente a utilização dos pontos

cotados foi possível utilizar imagens aéreas do município de Montenegro, retiradas durante o pico de eventos hidrológicos extremos ocorridos nos anos de 2009 e 2011, onde se gerou mais 22 pontos de controle nos limiares da lamina de água, no entanto, apesar de correspondência superior a 80% com as manchas geradas computacionalmente, optou-se por descartar essa fonte, pois não havia precisão quanto ao horário de aquisição das imagens nem o do pico da cheia no dia correspondente, os resultados do mapeamento são apresentados de forma resumida na figura 19.

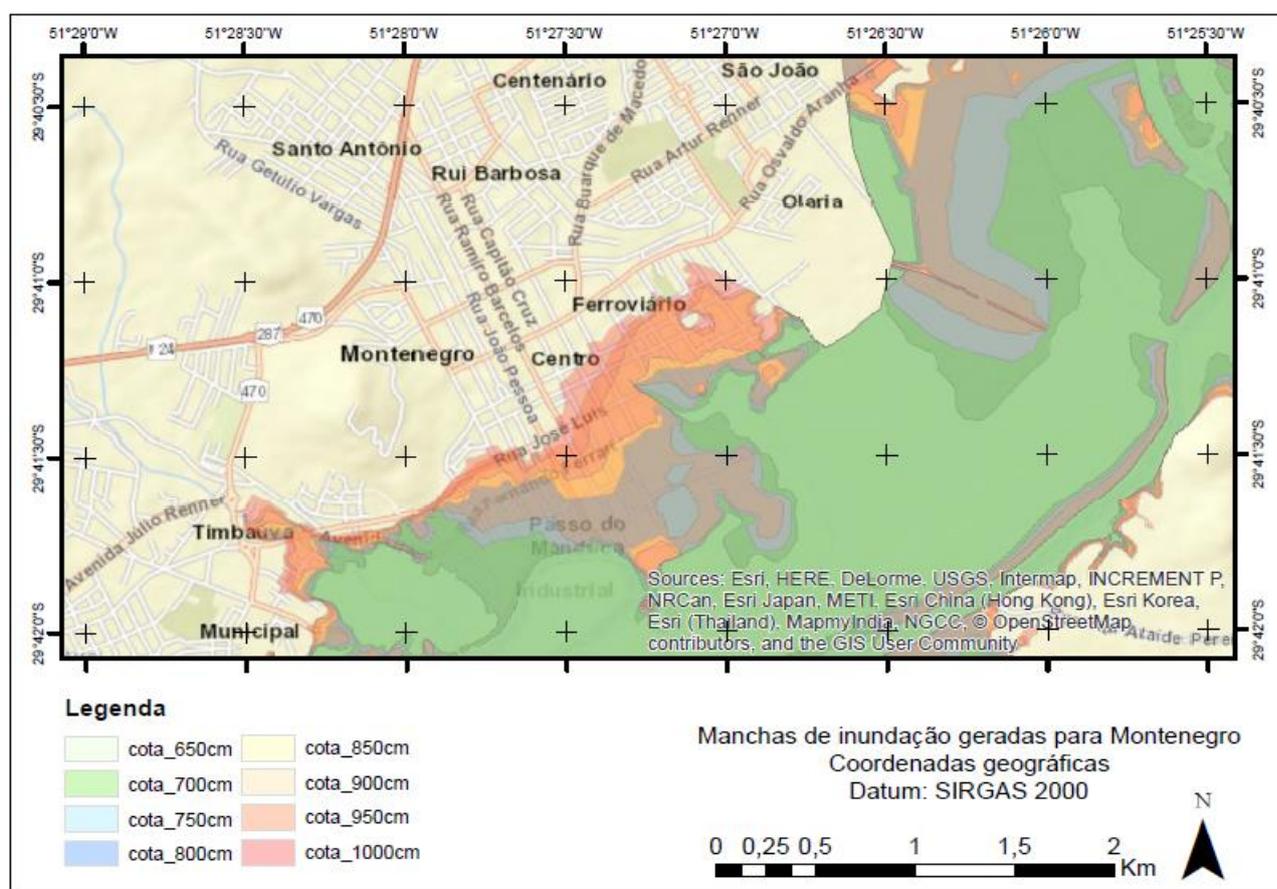


Figura 19: delimitação das áreas de inundação por níveis linimétricos para o município de Montenegro .

O emprego da metodologia descrita no capítulo 5.2, se mostrou prática, barata e eficiente para região, no entanto só foi possível devido as características hidráulicas dessa porção da bacia, com baixo declive de linha de água e ausência de grandes controles hidráulicos, permitindo a simplificação do mapeamento sem o emprego de modelos hidrodinâmicos complexos que requerem, costumeiramente, extensos e caros levantamentos de campo, para composição de bases de entrada consistentes que permitam a sua adequada calibração. É importante destacar que o processo de verificação empregado tem como premissa a comparação de uma área de inundação real com uma

modelada em ambiente SIG, no entanto a limitação de obtenção de dados de mapeamento de cheias reais restringe esse processo a cenários mapeados em poucos eventos, sendo recomendável a obtenção de imagens orbitais de eventos de maior magnitude para validação em patamares superiores, uma vez que em níveis de inundação, muito, elevados o comportamento hidráulico do corpo hídrico, na região, pode ser alterado inviabilizando o emprego da metodologia, outra prática recomendável é a realização do levantamento topográfico das marcas de cheias após cada evento por parte da entidade operadora da rede de monitoramento.

Os produtos gerados nessa etapa serviram como base para a setorização das áreas quanto a classe econômica, número de domicílios atingidos e profundidade de submersão, sendo imprescindível para a quantificação de danos e estimativa de prejuízos associados. A sua disponibilização on-line, no sistema SACE, associados a uma base de mapas viários, permitirá a defesa civil local simular a extensão das regiões atingidas a partir das previsões de nível, permitindo planejar com antecedência a evolução do bloqueio de vias, traçar rotas de fuga e planejar a evacuação de setores.

Os produtos cartográficos gerados nessa fase da pesquisa podem ser acessados integralmente em http://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php.

5.3 Prejuízo associado a cada limiar de inundação

A quantificação de danos e os prejuízos associados, elaboradas nessa fase da pesquisa, foram realizados em quatro etapas, ou seja, danos às edificações, danos ao conteúdo, custos com limpeza e prejuízos por dias não trabalhados. As duas primeiras etapas cruzaram dados de área do imóvel, custos de reforma, valoração de conteúdo, área inundada e nível de submersão a que os imóveis podem ser expostos, com uma variação da grade estatística do IBGE, obtida a partir da integração da espacialização dos imóveis, disponibilizados nessa matriz, com os dados de renda presentes nos setores censitário. As etapas restantes cruzaram dados de renda domiciliar, permanência do cenário de inundação, e número de unidades habitacionais atingidas, conforme metodologia apresentada no capítulo 5.3.

Quanto à estimativa do dano ao conteúdo das edificações, foi realizada uma pesquisa de mercado local, com a finalidade de se valorar o conteúdo de um imóvel padrão que funcionou como unidade central para as estimativas, tendo como base uma adaptação e atualização da planilha de conteúdo utilizada por Fadel (2015), apresentada no anexo 9.7.

Os intervalos de níveis considerados para determinação das estimativas, foram definidos com base na identificação dos níveis referentes ao início da inundação, apontados em campo pela população e defesa civil local, enquanto que o limiar foi definido pela cota associada a um tempo de retorno de 100 anos.

Foram simuladas inundações para cotas no intervalo de 650cm a 1000cm, tendo como referência o posto fluviométrico 87270000 (Passo Montenegro), a cota 600cm do referido posto marca o início da inundação na cidade, no entanto não foi considerada em virtude da baixa profundidade de submersão de domicílios e equipamentos, sendo utilizada pela defesa civil local, apenas, como referencial para o transbordamento inicial da calha fluvial.

Os gráficos 19, 20 e 21 apresentam, de forma sintética, respectivamente, o total de prejuízos acumulados, prejuízo médio por domicílio atingido e o prejuízo médio por m² edificado, considerando o nível de inundação, para município de Montenegro – RS. É possível observar uma redução dos valores médios aferidos na cota 900cm, esse fato pode ser explicado devido ao aumento considerável de imóveis classes B1 e B2 nessa faixa. Esses imóveis possuem áreas construídas substancialmente maiores que as classes C e D sem que, no entanto, tenham aumento proporcional no valor do conteúdo e do custo de reforma, diluindo os valores aferidos por unidade e m².



Gráfico 19: Total de prejuízos estimados para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.

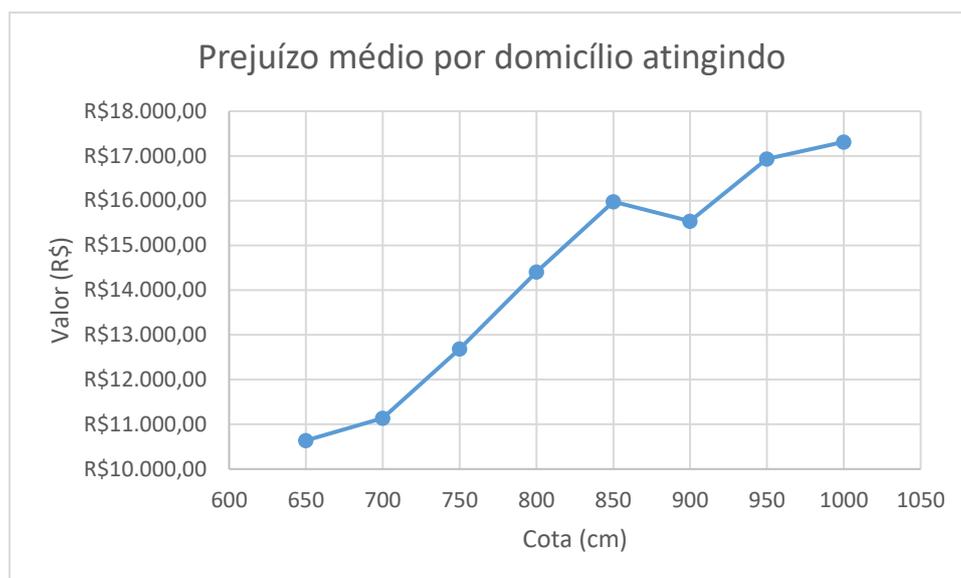


Gráfico 20: Prejuízo médio por domicílios estimado para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.

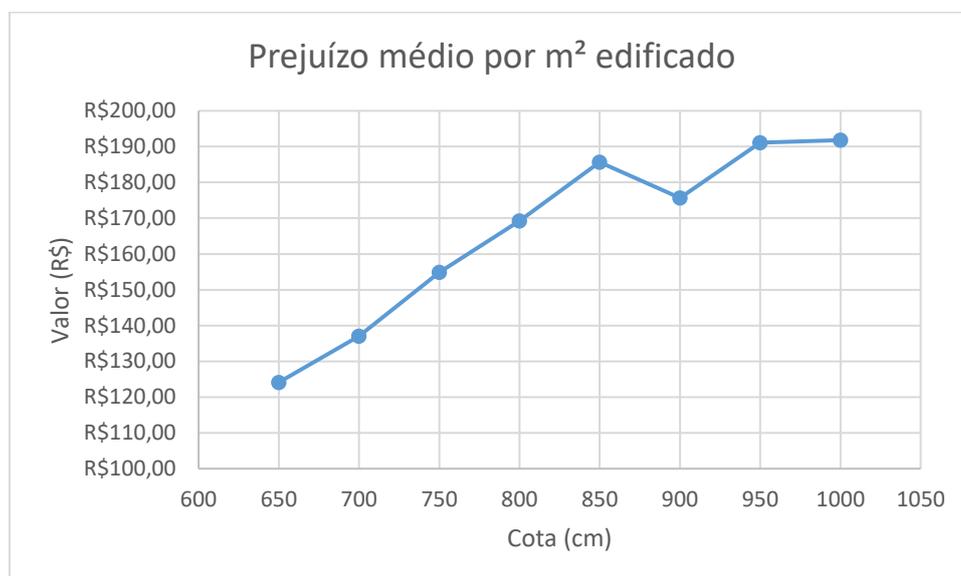


Gráfico 21: Prejuízo médio por metro quadrado estimado para cada horizonte de inundação no município de Montenegro-RS.

Foram simuladas inundações para cotas no intervalo de 1100cm a 1500cm, tendo como referência o posto fluviométrico 8717000 (Barca do Caí), a cota 1050 cm do referido posto marca o início da inundação na cidade, no entanto não foi considerada em virtude da baixa profundidade de submersão de domicílios e equipamentos, sendo utilizada pela defesa civil local, apenas, como referencial para o transbordamento inicial da calha fluvial.

Os gráficos 22, 23 e 24 apresentam de forma sintética, respectivamente, o total de prejuízos acumulados, prejuízo médio por domicílio atingido e o prejuízo médio por m² edificado, considerando o nível de inundação, para a cidade de São Sebastião do Caí- RS.

É possível observar uma redução dos valores médios aferidos a partir da cota 1450cm, esse fato pode ser explicado devido ao aumento considerável de imóveis classes A, B1 e B2 nessa faixa, esses imóveis possuem áreas construídas substancialmente maiores que as classes C e D sem que, no entanto, tenham aumento proporcional no valor do conteúdo e custo de reforma, diluindo os valores aferidos por unidade e m².

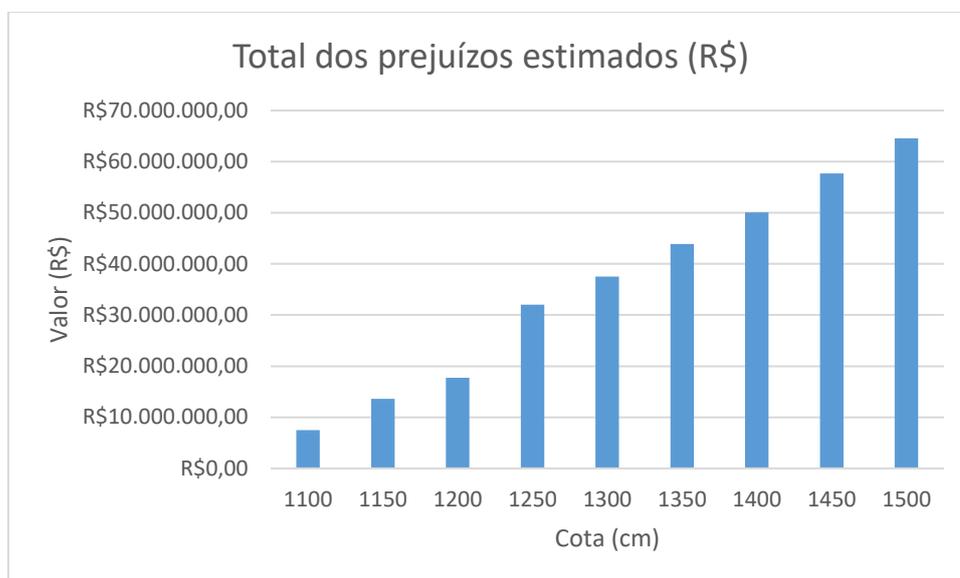


Gráfico 22: Gráfico 23: Total prejuízos estimados para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.

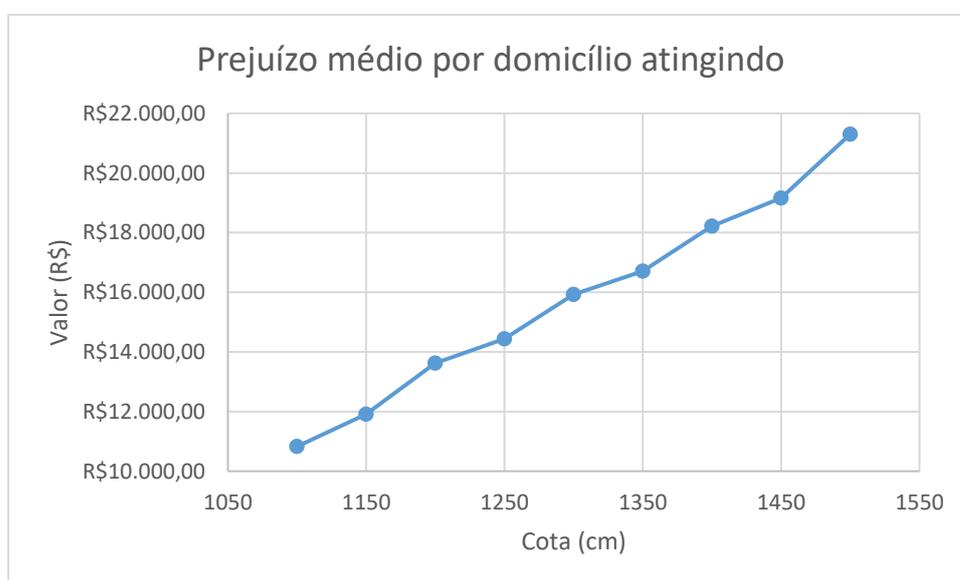


Gráfico 24: Prejuízo médio por domicílios estimado para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.

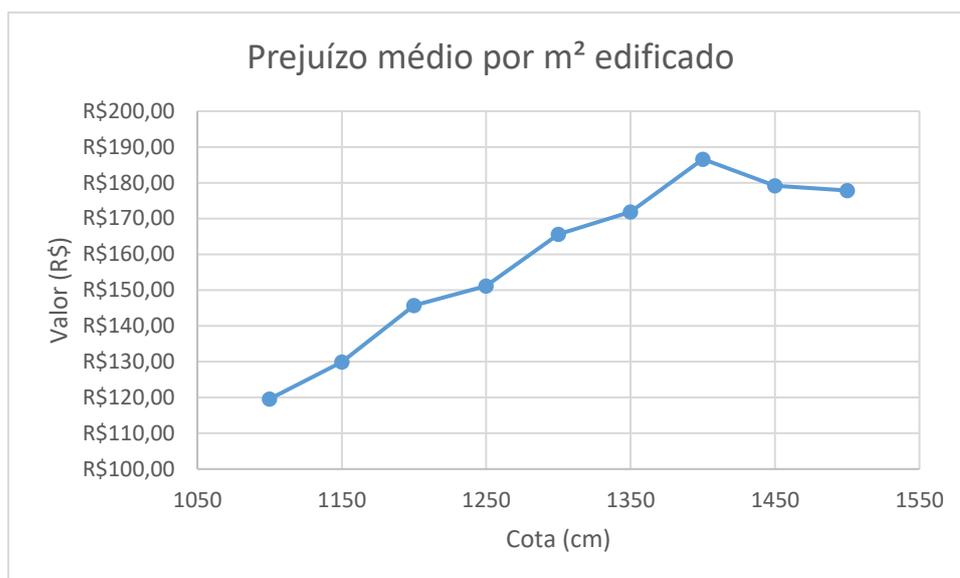


Gráfico 25: Prejuízo médio por metro quadrado estimado para cada horizonte de inundação no município de São Sebastião do Caí - RS.

Ao comparar os resultados da metodologia proposta com os obtidos por Fadel (2015), para os parâmetros dados a edificações e conteúdo, foi possível perceber, respectivamente, um acréscimo de aproximadamente 15% e 14% no valor médio obtido para uma submersão de 2m, nas classes A-B e C-D em Montenegro e 8,5% e 14% para uma submersão de 2m, nas classes A-B e C-D em São Sebastião do Caí, principalmente resultante da atualização monetária dos valores usados como referência (CUB e valores da planilha de dano ao conteúdo) para o cálculo e do ajuste necessário ao fator ponderador do imóvel padrão no cálculo dos danos ao conteúdo, para utilização da grade estatística como unidade discretizadora, demonstrando que as adaptações realizadas para simplificação da metodologia original se mostraram consistentes.

A espacialização dos domicílios utilizando a grade estatística do IBGE se mostrou promissora, pois possibilita um nível de discretização da informação que não pode ser obtida utilizando-se, unicamente, os setores censitários. É importante destacar que os dados presentes na grade estatística e nos setores censitários são referentes ao ano de 2010 o que pode representar distorções em relação aos quantitativos de domicílios efetivamente atingidos atualmente, a utilização de um cadastro urbano atualizado tem potencial de aproximar mais efetivamente os resultados da realidade.

A defesa civil produz um relatório de danos (formulário de informações do desastre – FIDE) com uma estimativa de prejuízo global após cada ocorrência de desastres naturais, no entanto os critérios adotados têm como enfoque na quantificação de prejuízos econômicos no setor público, como os com saúde pública, decorrentes de atendimentos

médicos emergenciais e reparos da infraestrutura de transporte, bem como a quantificação dos danos habitacionais não leva em consideração o conteúdo de forma detalhada. Os resultados obtidos utilizando a presente metodologia tem ênfase nos prejuízos diretamente relacionados aos domicílios podendo serem utilizados para complementação do FIDE.

É importante destacar que a utilização destas estimativas em conjunto com um sistema de alertas de inundação, como ferramenta para auxílio de tomada de decisão, requer atualização regular das variáveis diretamente relacionada à flutuação de preços, evitando a sua defasagem e a consequente subestimação dos prejuízos. Também é recomendável a sua utilização em associação com estudos complementares que permitam identificar prejuízos à infraestrutura, serviços públicos e outros setores econômicos não abordados na metodologia.

5.4 Boletim informativo proposto

Um modelo de boletim informativo foi elaborado, segundo os critérios apresentados no tópico 5.4. Este se configura como o produto final a ser empregado pelo SGB na operação dos sistemas de alertas hidrológicos que atendem os dois municípios estudados, sendo responsável por entregar ao público os resultados deste estudo de forma sintética, rápida e de fácil compreensão. As figuras 20, 21 e 22 apresentam a estrutura elaborada e os principais elementos empregados.

A metodologia empregada previu a elaboração de cenários base para composição do modelo de boletim. Esses cenários foram constituídos a partir do cruzamento das informações obtidas nos diagnósticos realizados nas etapas anteriores, sendo cada cenário composto por um conjunto de três informações básicas, ou seja, previsão do nível do corpo hídrico, área a ser inundada e prejuízo estimado para essa área.

Para a cidade de Montenegro, foram elaborados cenários dentro do intervalo de cotas de 650 cm (início dos prejuízos da inundação) a 1000 cm (maior faixa de inundação considerando um TR de 100 anos). Na cidade de São Sebastião do Caí, os cenários consideram a faixa de cotas de 1100 cm à a 1650 cm, segundo os mesmos critérios adotados para Montenegro, além da escolha dos intervalos de cotas para construção dos cenários foram determinadas cotas de atenção (500cm-BC e 300cm-PM) e alerta (750cm-BC e 400cm-PM), segundo metodologia apresentada por Germano (2017). A definição destes parâmetros foi realizada com a finalidade de se estabelecer uma rotina operacional

para o modelo proposto, sendo respectivamente os estágios de mobilização e organização das equipes que operarão o sistema e o início da emissão dos alertas ao público.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT
SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE PORTO ALEGRE – SUREG-PA

BOLETIM EXTRAORDINÁRIO DE MONITORAMENTO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS E DE PREVISÃO DE NÍVEIS NA BACIA DO RIO CAÍ

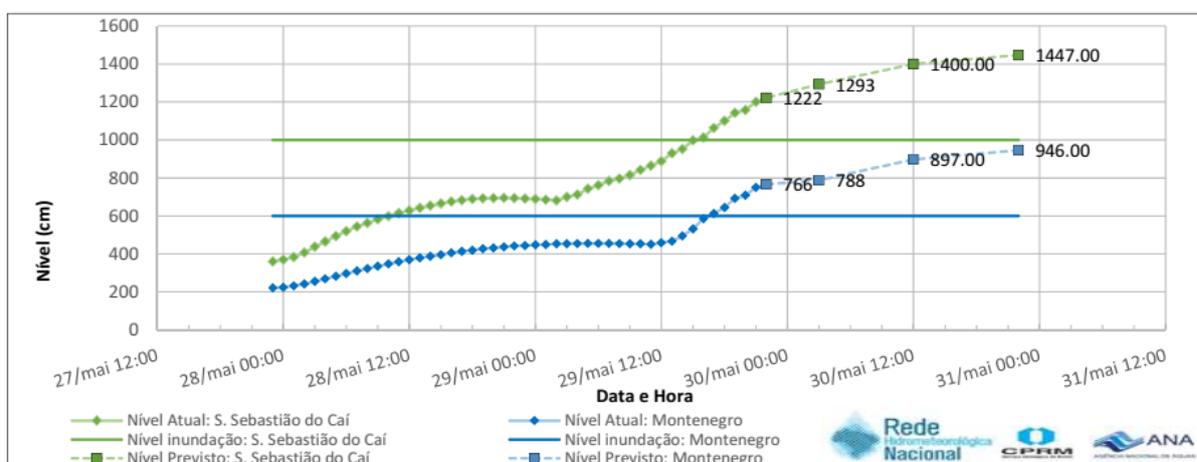
Porto Alegre, 29 de maio de 2019.

Prezados(as) Senhores(as),

Estamos enviando o Boletim Extraordinário do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí (SAH Rio Caí). Os dados das estações de monitoramento e as previsões aqui apresentados estão disponíveis em <http://www.cprm.gov.br/sace/cai>, assim como os boletins enviados até o presente momento (acessando "bacias monitoradas").

Nome da Estação	Curso d'água	Município	Chuva Acumulada	Nível Atual	Nível de Inundação	Nível Previsto	Nível Previsto	Nível Previsto
			24h	(cm)		30/05 - 03:00	30/05 - 12:00	30/05 - 22:00
			(mm)	(cm)		(cm)	(cm)	(cm)
			29/05/2019 22:00		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Morro Reuter	-	Morro Reuter	112.0	*				
Capão dos Coxos	-	São Francisco de Paula	110.0	*				
Linha Gonzaga	rio Caí	Caxias do Sul	96.0	622				
Nova Palmira	rio Caí	Caxias do Sul	99.4	745				
São Vendelino	arroio Forromeco	São Vendelino	116.0	412				
Barca do Caí	rio Caí	São Sebastião do Caí	110.2	1222	1000	1293	1400	1447
Costa do Cadeia	rio Cadeia	São Sebastião do Caí	85.6	816				
Passo Montenegro	rio Caí	Montenegro	88.6	766	600	788	897	946

Legenda: * Estação não possui medição de nível ou chuva; + Valor informado pelo observador; - Equipamento em manutenção.



Previsão para as próximas 24 horas 30/05/2019 22:00 h

São Sebastião do Caí: O nível, provavelmente, atingirá: 14.47 m
Passo Montenegro: O nível, provavelmente, atingirá: 9.46 m

Os dados hidrológicos utilizados nos boletins são provenientes da Rede Hidrometeorológica Nacional de responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA), operada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e demais parceiros. As previsões apresentadas neste boletim são baseadas em modelos hidrológicos e econômicos estão sujeitas às incertezas inerentes aos mesmos.

Atenciosamente,

Emanuel Duarte
 Engenheiro Hidrólogo/Pesquisador em Geociências - CPRM
 Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí - SAH Rio Caí

Parceria:

CPRM
 Serviço Geológico do Brasil

SECRETARIA DE
 GEOLOGIA, MINERAÇÃO
 E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
 MINAS E ENERGIA

**PÁTRIA AMADA
 BRASIL**
 GOVERNO FEDERAL

Figura 20: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 1, 2 e 3.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT
SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE PORTO ALEGRE – SUREG-PA

BOLETIM EXTRAORDINÁRIO DE MONITORAMENTO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS E DE PREVISÃO DE ÁREAS A SEREM ATINGIDAS NA CIDADE DE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ E ESTIMATIVA DE PREJUÍZOS

Os mapas interativos podem ser acessados no seguinte endereço eletrônico: <http://geowebapp.cprm.gov.br/cheias/index-ssebastiaocai.html>

Mapa 01: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 03:00h - Prejuízos estimados na ordem de 16 milhões de reais.



Mapa 02: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 12:00h - Prejuízos estimados na ordem de 21 milhões de reais.



Mapa 03: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 22:00h - Prejuízos estimados na ordem de 25 milhões de reais.

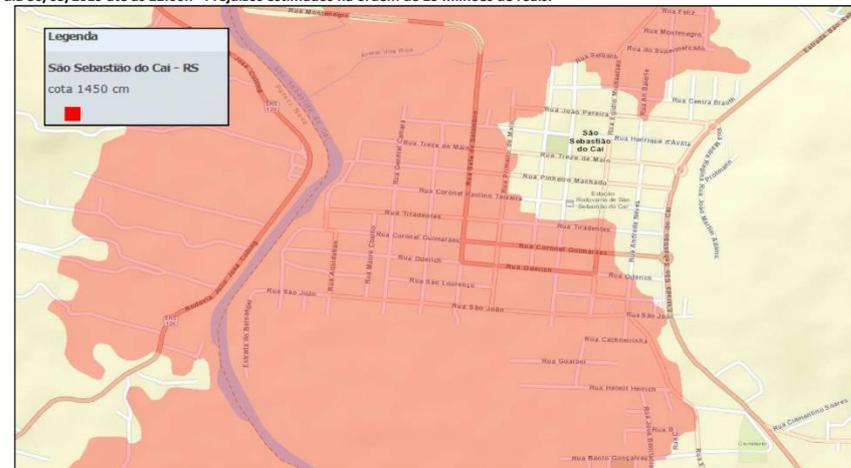


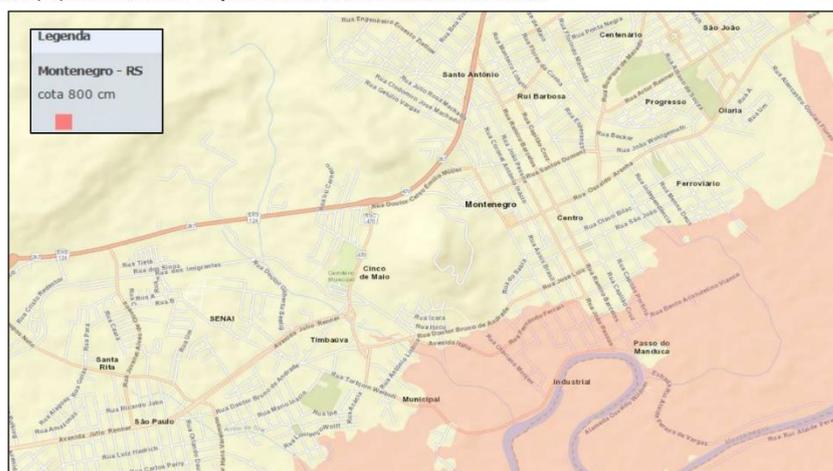
Figura 21: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 4 e 5.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT
SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DE PORTO ALEGRE – SUREG-PA

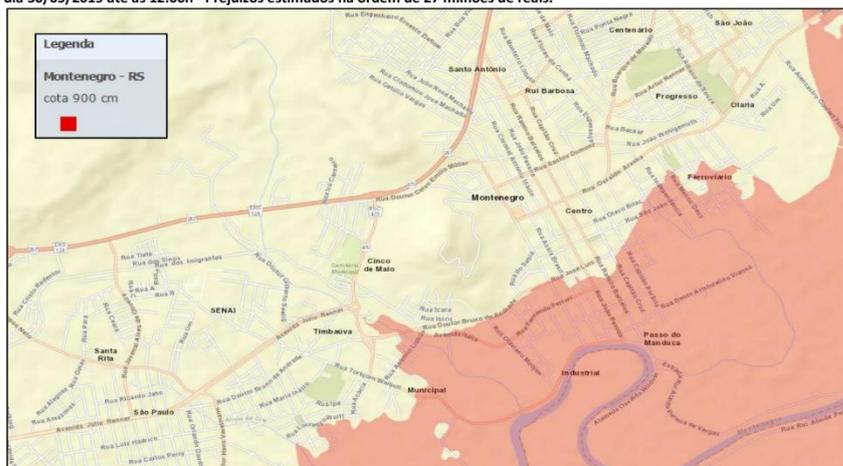
BOLETIM EXTRAORDINÁRIO DE MONITORAMENTO DOS DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS E DE PREVISÃO DE ÁREAS A SEREM ATINGIDAS NA CIDADE DE MONTENEGRO E ESTIMATIVA DE PREJUÍZO

Os mapas interativos podem ser acessados no seguinte endereço eletrônico: <http://geowebapp.cprm.gov.br/cheias/index-ssebastiaocai.html>

Mapa 01: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 03:00h - Prejuízos estimados na ordem de 18 milhões de reais.



Mapa 02: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 12:00h - Prejuízos estimados na ordem de 27 milhões de reais.



Mapa 03: Área a ser atingida dia 30/05/2019 até as 22:00h - Prejuízos estimados na ordem de 30 milhões de reais.

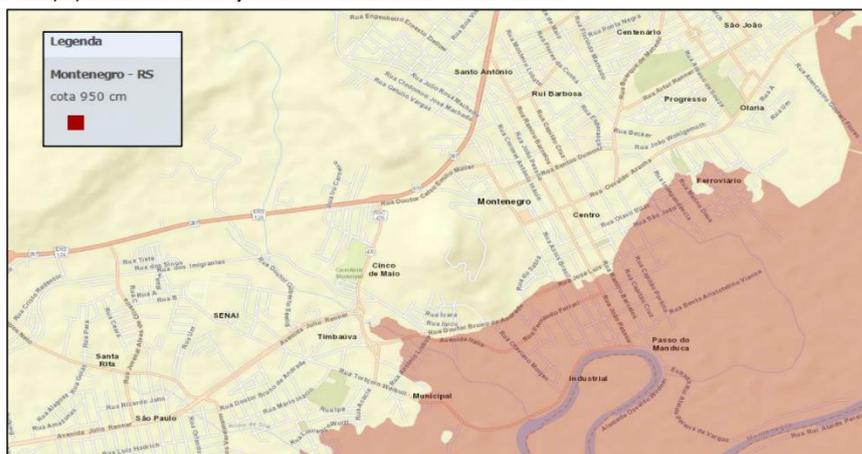


Figura 22: Modelo conceitual de boletim contendo os elementos 4 e 5.

Além do envio do boletim informativo, em formato digital, a elaboração de uma plataforma eletrônica online, onde as informações possam ser divulgadas em tempo real e o usuário possa realizar simulações e verificar o estado da sua região, se mostra uma ferramenta promissora, uma vez que estimula os usuários a interagir com os dados e demais informações melhorando a sua compreensão dos resultados divulgados. Para essa finalidade, os dados produzidos neste estudo estarão disponíveis na plataforma SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos), onde os usuários poderão verificar previsões, checar em tempo real o estado das estações, visualizar alertas e simular áreas a serem atingidas por uma inundação em um mapa interativo.

Outro aspecto relevante para o êxito da operação do sistema diz respeito à realização de treinamentos, de forma periódica, com as defesas civis locais, com a finalidade de instruir sobre a operação dos sistemas e a interpretação dos dados. Essa rotina se mostra indispensável, evitando que conceitos básicos de interpretação dos boletins e demais dados sejam esquecidos durante períodos de ausência de eventos extremos. Com a finalidade de implementar uma rotina de treinamentos e avaliação dos boletins, as ferramentas desenvolvidas ao longo desse trabalho serão apresentadas em oficinas temáticas às defesas civis de São Sebastião do Caí e de Montenegro.

6. CONCLUSÕES

A obtenção de cada produto desenvolvido durante este estudo contou com o uso de uma metodologia que primava pela simplificação de processos e baixo grau de investimento, o que possibilita a sua replicação de forma facilitada em outras regiões. As considerações finais pertinentes a cada etapa da pesquisa são apresentadas nos itens a seguir.

1. A aplicação das redes neurais artificiais (RNA's) para previsão de curto prazo nas cidades pesquisadas já tinha se mostrado promissora em sua primeira aplicação em 2013 e ao longo de sua operação (2013-2019). Utilizando dados convencionais de dupla leitura possibilitou horizontes de previsão de até 10h com resultados aceitáveis, como coeficiente de NS acima de 0,9 e $E_{0,9}$ por volta de 39 cm no pior cenário. No processo de atualização desse modelo, realizado nesta pesquisa, a utilização de uma série de dados horários associada à técnica de amostragem sistemática para composição dos bancos de treinamento e a aplicação de médias móveis com decaimento exponencial, bem como a ponderação gama para os dados fluviométricos e pluviométricos de entrada, possibilitaram a expansão dos horizontes de previsão para 20h e 24h, respectivamente, em São Sebastião do Caí e em Montenegro, enquanto melhoraram os resultados das estatísticas de desempenho em comparação ao modelo anterior. Também foi possível demonstrar que a aplicação dessas técnicas tem grande potencial na redução da demanda computacional quando comparadas a metodologias convencionais de treinamento de RNA's. Por fim, foi possível obter uma ferramenta de previsão que, além de mais precisa, possibilita uma antecedência crucial ao planejamento de ações em situação de risco.
2. De modo geral, os resultados obtidos na espacialização das áreas de inundação apresentaram bons resultados, obtendo-se valores superiores a 90% de correspondência com os pontos de controle, a despeito das dificuldades para mapeamento de áreas inundáveis que geralmente necessitam de levantamentos topobatimétricos extensos e caros além do emprego de modelos hidrodinâmicos complexos. Os produtos gerados nessa fase da pesquisa apresentam potencial para subsidiarem o planejamento de ações de remoção e realocação de populações, planejamento de tráfego, limpeza e demais ações que envolvam logística,

permitindo a antecedência necessária a melhora na eficiência de alocação de pessoal e recursos durante a ocorrência de eventos hidrológicos críticos, além da distribuição em formato de boletim o mapeamento pode ser acessado de forma dinâmica através da plataforma on-line SACE, onde é possível realizar simulações de áreas a serem atingidas.

3. Os resultados obtidos na realização das estimativas de prejuízo apresentam similaridade com os alcançados em estudos similares desenvolvidos por Fadel (2015) e Tachini (2010). A utilização da grade estatística do IBGE, combinada aos dados socioeconômicos dos setores censitários, como unidade discretizadora demonstrou potencial na melhora da espacialização das estimativas de prejuízo, uma vez que permitiu realizar estimativas levando-se em consideração áreas inferiores a de um setor censitário, no entanto é necessário destacar que os dados utilizados tem como base o senso 2010, sendo necessária uma revisão após a divulgação de novos dados censitários a fim de não gerar subestimativas quanto ao número de habitantes e residências atingidas, bem como atualizar as características de renda da população.
4. O agrupamento dos dados em cenários pré-estabelecidos e a disponibilização em formato de boletins informativos se mostrou eficiente como método de divulgação dos dados gerados nesta pesquisa. Construídos em parceria com as defesas civis locais e demais entidades envolvidas no gerenciamento de situações de risco proporciona familiaridade e maior agilidade na interpretação das informações, demonstrando a importância do envolvimento desses atores no processo de desenvolvimento dos produtos que serão entregues a sociedade.

7. RECOMENDAÇÕES

Durante o desenvolvimento desta pesquisa foram observadas oportunidades de aprimoramento da metodologia empregada, bem como de outros aspectos relacionados a operacionalização dos produtos gerados, sendo apresentados como recomendações e listados a seguir.

1. É recomendável o acompanhamento do desempenho da aplicação em situações reais, a fim de se validar a sua utilização no cotidiano da operação do SAH-Caí, bem como a realização de novos treinamentos, conforme o aumento da série histórica com discretização horária e do número de postos de monitoramento, com os quais credita-se potencial para o melhoramento dos resultados.
2. Recomenda-se a aquisição de imagens orbitais e a realização de levantamentos com VANT's após eventos hidrológicos extremos que resultem em inundações, a fim de se coletar pontos de controle que permitam a validação de horizontes de inundação superiores, além da instalação de seções linimétricas e pontos de referência ao longo do perímetro urbano permitindo o acompanhamento físico da evolução inundação pela população.
3. Tendo em vista que as estimativas de prejuízo estão pautadas nos danos decorrentes de quatro tipologias (danos as edificações, ao conteúdo, custos com limpeza e perdas econômicas decorrentes da paralisação do trabalho) recomenda-se a adição de novas tipologias que contemplem mais danos tangíveis melhorando a performance das estimativas.
4. É recomendável o desenvolvimento de treinamentos periódicos com as partes interessadas a fim de se solidificar o conhecimento sobre o assunto e melhorar os produtos desenvolvidos a partir do retorno dos usuários. Outro aspecto relevante é a manutenção da plataforma on-line de intercâmbio com o público (SACE) que possibilita a interação dos usuários melhorando a sua compreensão sobre os processos naturais atuantes na bacia e conseqüentemente tornando mais eficiente o processo de tomada de decisão.

5. Recomenda-se o aumento do investimento em redes de monitoramento telemétricas, modernização constante das plataformas on-line de interação com o público e a expansão dos sistemas de alertas hidrológicos, hoje existente e operadas pelo SGB, como medida não estrutural e de baixo impacto financeiro para minimização dos prejuízos decorrentes de inundações

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEP. Associação Brasileira de Empresas e Pesquisa. Critério Brasil. Disponível em: <http://www.abep.org/criterioBrasil.aspx>. Acesso em: 10 de abril de 2019.
- ABHAS K JHA (Washington). Banco Mundial. Cidades e Inundações: Um guia para a Gestão Integrada do Risco de Inundação Urbana para o Século XXI.. Washington Dc: Banco Mundial, 2012. 54 p. Disponível em: <http://mi.gov.br/pt/c/document_library/get_file?uuid=3c3b9a72-9358-415f-9efe-89fad4cbb381&groupId=10157>. Acesso em: 06 abr. 2019.
- ADAMOWSKI, Jan; SUN, Karen. Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 390, n. 1-2, p.85-91, ago. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.033>.
- BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Grade Estatística. Brasília, 2016. 33 slides, color. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/imprensa/ppts/00000025574403112016443316633687.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2019.
- BRASIL. Mauro Naghettini. Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: Cprm, 2007. 552 p.
- BRASIL. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Elaboração de manchas de inundação para as cidades de São Sebastião do Caí e Montenegro. Porto Alegre: CPRM, 2016a. 23 p.
- Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (UFSC-CEPED). Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume 2. Brasil. Florianópolis: CEPED -UFSC; 2013.
- CANÇADO, V. L. Consequências econômicas das inundações e vulnerabilidade: Desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade. 2009. 394 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

- CASTRO, A. L. C. (2003). Manual de Desastres: desastres naturais. Volume 1. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 177 p.
- COSTACHE, R. The assessment of economical loss caused by floods and flash-floods by using computer techniques. CASE STUDY: LOPĂTARI VILLAGE, SLĂNIC RIVER. Air And Water Components Of The Environment, [s.l.], n. 2015, p.179-186, 20 mar. 2015. Casa Cartii de Stiinta Cluj Napoca. http://dx.doi.org/10.17378/AWC2015_24.
- FADEL, Amanda Wajnberg. Incorporação do Risco de Prejuízo no Gerenciamento de Medidas de Controle de Inundação. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Iph, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- GERMANO, Andrea de Oliveira; MATOS, Artur José Soares. Metodologia para definição de cotas de referência em sistemas de alerta e previsão hidrológica. In: XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. Anais... . Florianópolis: ABRH, 2017. p. 52 - 60. Disponível em: <<http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/download-2017-UEFQMDIzMDgzLnBkZg==>>. Acesso em: 16 jun. 2019.
- HAYKIN, S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. 2. ed. New York: Macmillan College Publishing Company, 696p. 1994.
- HECHT-NIELSEN, R. 1990. Neurocomputing. Addison-Wesley, 1990. pp. 433.
- HUMPHREY, Greer B. et al. A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: Integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 540, p.623-640, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.026>.
- JAMALI, Behzad et al. A rapid urban flood inundation and damage assessment model. Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 564, p.1085-1098, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.064>.
- JEON, Haemin; EEM, Seung-hyun; PARK, Junghyun. Flood Damage Assessment in Building Scale Caused by the Coastal Inundation Height at Haeundae Beach,

Busan. Journal Of Coastal Research, [s.l.], v. 85, p.1561-1565, maio 2018. Coastal Education and Research Foundation. <http://dx.doi.org/10.2112/si85-313.1>.

JONOV, Cristiane Machado Parisi; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; SILVA, Adriano de Paula e. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação. Ambiente Construído, [s.l.], v. 13, n. 1, p.75-94, mar. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212013000100006>.

MCCULLOCH, W.; PITTS, W. A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, v.5, p.115-133. 1943.

KAMPF, Stephanie K.; BURGESS, Stephen J.. Parameter estimation for a physics-based distributed hydrologic model using measured outflow fluxes and internal moisture states. Water Resources Research, [s.l.], v. 43, n. 12, p.124-138, dez. 2007. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2006wr005605>.

KASABOV, N. K. Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems, and Knowledge Engineering. The MIT press, 550p. 1996.

KITANIDAS, Peter K.; BRAS, Rafael L.. Real time forecasting of river flows. Cambridge: Mit Dept. Of Civil Engineering, 1978. 324 p.

KREIBICH, Heidi; THIEKEN, Annegret H.. Assessment of damage caused by high groundwater inundation. Water Resources Research, [s.l.], v. 44, n. 9, p.2-18, set. 2008. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2007wr006621>.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. Journal of Hydrology, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

OLIVEIRA, Guilherme Garcia de. Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS. 2010. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G. G. Mapas aplicados às inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, Rio Grande do Sul. 2010

PEDROLLO, Márcia Conceição Rodrigues et al. Alerta hidrológico da bacia do rio caí: concepção e implantação do sistema. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais... . Maceió: Abrh, 2011. p. 1 - 14. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=942&ST=alerta_hidrologico_da_bacia_do_rio_cai_concepcao_e_implantacao_do_sistema>. Acesso em: 12 abr. 2019.

PEDROLLO, Olavo Correa. Previsão de curto prazo de níveis com redes neurais artificiais para a cidade de Estrela (RS): Resultados preliminares. In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 22°, 2017, Florianópolis. **Anais...** . Florianópolis: Abrh, 2017. p. 1 - 8.

PEDROLLO, O. C., PEDROLLO, M. C. R. Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais In: Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: Inundações e Movimentos de Massa. 1 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013, v.1, p. 102-120.

Revista do Plano Caí: Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Porto Alegre, n.2, set., 2007.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning Internal Representations by Error Propagation. In: RUMELHART, D. E.; MCCLELLAND, J. L. Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition. v.1, p.318–362, MIT press, Cambridge. 1986.

TACHINI, M. O alerta de cheias e a ação da defesa civil. In: FRANK, B.; PINHEIRO A. Enchentes na bacia do Itajaí: 20 anos de experiências. Blumenau: Edifurb, 2003, p. 129-141.

TACHINI, M. Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau. 2010. 167 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

- TUCCI, Carlos E. M.. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Ufrgs, 2005. 678 p.
- TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 5-12, jul./dez. 1997.
- SILVA, I. N. da; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. Artliber, 2016. 431 p.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2007. 943 p.
- VEINTIMILLA-REYES, Jaime; CISNEROS, Felipe; VANEGAS, Pablo. Artificial Neural Networks Applied to Flow Prediction: A Use Case for the Tomebamba River. Procedia Engineering, [s.l.], v. 162, p.153-161, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.031>.
- GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as Inundações no Brasil. XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa. Anais... Porto Alegre, ABRH, 2005.
- SENE, Kevin. Flood Warning, Forecasting and Emergency Response. United Kingdom: Springer, 2008. 303 p.
- WMO – World Meteorological Organization. (1994). Guide to hidrological pratices. Publication No. 168, WMO, Geneva, pp. 735.
- WUNSCH, Andreas; LIESCH, Tanja; BRODA, Stefan. Forecasting groundwater levels using nonlinear autoregressive networks with exogenous input (NARX). Journal Of Hydrology, [s.l.], v. 567, p.743-758, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.045>.
- Xu, C. Textbook of Hydrologic Models. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology, Lärobok I Edition, Sweden, 2002.
- NWS/NOAA - NATIONAL WEATHER SERVICE/NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. (2009). Glossary. (Disponível em <https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=Flash+flood>/Consultado em abril de 2019).

Pesquisa NUL Passo Montenegro F											
Costa do Cadeia F/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
def	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r	0.936	0.936	0.934	0.93	0.925	0.918	0.91	0.9	0.89	0.868	0.833
240	0.261	0.259	0.258	0.256	0.255	0.254	0.252	0.251	0.25	0.249	0.247
Nova Palmira F/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
def	12.000	10	8	6	4	2	0	0	0	0	0
r	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.835	0.834	0.832	0.823	0.802
240	0.237	0.234	0.232	0.23	0.228	0.226	0.224	0.222	0.22	0.216	0.211
Barca do Caí F/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
def	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r	0.976	0.976	0.975	0.972	0.967	0.961	0.954	0.945	0.936	0.917	0.884
240	0.317	0.315	0.313	0.311	0.31	0.308	0.307	0.305	0.304	0.301	0.296
Passo Montenegro F/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r	0.995	0.99	0.983	0.976	0.967	0.958	0.949	0.939	0.928	0.906	0.87
240	0.303	0.301	0.298	0.296	0.294	0.292	0.291	0.289	0.288	0.284	0.279

Pesquisa B - Correlações P x Barca do Caí F											
Capão dos Coxos P	def	r									
	0	0.071									
	26	0.236	max								
	240	0.05									
São Vendelino P	def	r									
	0	0.058									
	26	0.235	max								
	240	0.052									
Nova Palmira P	def	r									
	0	0.045									
	28	0.203	max								
	240	0.048									
Costa do Cadeia P	def	r									
	0	0.081									
	25	0.24	max								
	240	0.046									
Passo Montenegro P	def	r									
	0	0.054									
	29	0.183	max								
	240	0.043									
Pesquisa MME Barca do Caí P											
Capão dos Coxos P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30

r	0.62	0.63	0.631	0.625	0.614	0.598	0.579	0.559	0.535	0.483	0.4
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
mei	6	5	5	5	4	4	4	4	4	3	3
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
São Vendelino P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.670	0.68	0.683	0.677	0.664	0.646	0.625	0.602	0.576	0.519	0.436
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
mei	5	6	5	5	5	4	4	4	4	3	3
def	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nova Palmira P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.616	0.626	0.626	0.618	0.603	0.585	0.564	0.542	0.518	0.468	0.394
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
mei	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3	3
def	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costa do Rio Cadeia P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.521	0.532	0.537	0.535	0.529	0.513	0.496	0.479	0.456	0.41	0.344
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
mei	5	5	5	4	4	4	3	3	3	3	3
def	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pesquisa MMG Barca do Caí P											
Capão dos Coxos P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.653	0.656	0.654	0.644	0.63	0.612	0.591	0.569	0.544	0.488	0.403
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pesc	4.5	9.5	8.5	8	7.5	6.5	6	6	5.5	5	4
São Vendelino P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.700	0.704	0.7	0.691	0.677	0.657	0.635	0.611	0.584	0.527	0.443
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pesc	4.5	4.5	8.5	8	7.5	7.5	6.5	6	6	5.5	4.5
Nova Palmira P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.639	0.642	0.637	0.629	0.677	0.595	0.572	0.549	0.525	0.472	0.393
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
pesc	4.5	4.5	8.5	8	7.5	7.5	6.4	6	6	5	4.5
Costa do Cadeia P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30

	36	0.181	max								
	240	0.05									
Costa do Cadeia P	def	r									
	0	0.064									
	38	0.229	max								
	240	0.058									
Passo Montenegro P	def	r									
	0	0.041									
	41	0.176	max								
	240	0.046									
Pesquisa MME Passo Montenegro P											
Capão dos Coxos P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.52	0.538	0.554	0.566	0.574	0.578	0.577	0.572	0.564	0.536	0.476
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
mei	8	8	8	7	7	6	6	6	5	5	4
def	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
São Vendelino P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.556	0.572	0.587	0.602	0.613	0.619	0.618	0.613	0.604	0.574	0.513
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007
mei	7	7	8	8	7	7	7	6	6	5	5
def	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Nova Palmira P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.53	0.547	0.564	0.576	0.584	0.588	0.586	0.581	0.571	0.543	0.487
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
mei	8	8	8	8	7	7	7	6	6	6	5
def	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costa do Rio Cadeia P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.472	0.487	0.503	0.516	0.526	0.531	0.532	0.527	0.519	0.494	0.447
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
mei	6	7	8	7	7	6	6	5	5	5	4
def	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Passo Montenegro P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.384	0.398	0.409	0.418	0.426	0.429	0.43	0.427	0.423	0.401	0.365
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
mei	6	6	6	6	6	5	5	5	5	4	4
def	3	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
Pesquisa MMG Passo Montenegro P											

Capão dos Coxos P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.564	0.579	0.59	0.596	0.6	0.601	0.598	0.591	0.581	0.549	0.486
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
pesc	4	6	6	5.5	12.5	11	11	10	9.5	8.5	7.5
São Vendelino P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.599	0.614	0.626	0.634	0.637	0.639	0.636	0.629	0.617	0.585	0.523
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1
pesc	4	4.5	6	6	5.5	11.5	11	11	10	9.5	9.5
Nova Palmira P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.562	0.576	0.588	0.595	0.598	0.6	0.598	0.593	0.583	0.553	0.491
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	4	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
pesc	4	6.5	6	6	5.5	12.5	11	11	10	9.5	8
Costa do Cadeia P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.564	0.58	0.592	0.602	0.61	0.614	0.613	0.606	0.595	0.562	0.503
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
pform	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
pesc	7	6.5	6.5	14	13	12	10.5	10.5	10.5	9	9
Passo Montenegro P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.419	0.429	0.437	0.442	0.445	0.446	0.445	0.44	0.435	0.411	0.374
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
pform	11	7	3	2	2	2	1	1	1	1	1
pesc	2	2.5	4	5	5	4.5	9.5	8.5	8	7.5	6.5
Pesquisa MMU Passo Montenegro P											
Capão do Coxos P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.56	0.575	0.585	0.591	0.593	0.591	0.585	0.576	0.563	0.529	0.466
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
nhmm	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
São Vendelino P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.593	0.61	0.623	0.631	0.634	0.632	0.626	0.616	0.602	0.567	0.503
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
nhmm	22	20	19	18	17	17	16	15	14	13	12

def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nova Palmira P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.561	0.576	0.588	0.595	0.598	0.597	0.592	0.583	0.571	0.538	0.475
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
nhmm	22	21	20	19	18	17	16	15	15	14	13
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costa do Cadeia P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.537	0.55	0.558	0.563	0.564	0.561	0.554	0.542	0.528	0.493	0.438
rb	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
ru	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
nhmm	23	23	21	20	19	19	18	18	17	15	15
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Passo Montenegro P/ alc (h)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
r	0.418	0.43	0.44	0.445	0.447	0.445	0.442	0.435	0.426	0.402	0.364
rb	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
ru	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
nhmm	20	19	18	16	15	15	14	14	13	13	11
def	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

8.2 Resultados da pesquisa por número mínimo de registros utilizados no treinamento

Pesquisa número de registros modelo Passo Montenegro									
NS obtido no treinamento para complexidade de 4 neurônios									
NR	6.00	8	10	14.00	16	18	20.00	24	30.00
50	1.00	0.995	0.995	1.00	1.00	0.985	1.00	0.969	0.93
100	1.00	0.995	0.992	0.99	0.99	0.986	0.99	0.963	0.93
200	1.00	0.991	0.99	0.98	0.99	0.977	0.96	0.957	0.91
300	1.00	0.992	0.991	0.98	0.99	0.958	0.98	0.938	0.90
400	0.99	0.99	0.989	0.98	0.98	0.953	0.96	0.961	0.88
500	0.99	0.99	0.981	0.98	0.98	0.963	0.95	0.886	0.83
600	0.99	0.988	0.987	0.97	0.97	0.956	0.96	0.921	0.89
700	0.99	0.99	0.983	0.98	0.96	0.947	0.97	0.925	0.81
800	0.99	0.988	0.985	0.98	0.97	0.944	0.96	0.94	0.84
900	0.99	0.988	0.986	0.97	0.97	0.959	0.96	0.906	0.84
1000	0.99	0.987	0.981	0.97	0.97	0.967	0.93	0.877	0.81
1200	0.99	0.987	0.985	0.97	0.97	0.94	0.95	0.911	0.87
1500	0.99	0.988	0.981	0.97	0.97	0.942	0.93	0.896	0.85

1700	0.99	0.985	0.983	0.97	0.96	0.955	0.94	0.918	0.79
1900	0.99	0.983	0.979	0.97	0.96	0.93	0.92	0.858	0.82
2000	0.06	0.061	0.062	0.05	0.06	0.943	0.06	0.053	0.05
NS obtido na validação para complexidade de 4 neurônios									
NR	6.00	8	10	14.00	16.00	18	20.00	24	30.00
50	0.98	0.97	0.962	0.94	0.92	0.91	0.92	0.86	0.74
100	0.98	0.98	0.956	0.96	0.93	0.92	0.92	0.85	0.76
200	0.98	0.98	0.966	0.96	0.95	0.94	0.91	0.86	0.78
300	0.99	0.98	0.973	0.96	0.94	0.94	0.91	0.88	0.77
400	0.99	0.98	0.971	0.96	0.95	0.94	0.92	0.87	0.77
500	0.99	0.98	0.972	0.96	0.95	0.94	0.92	0.86	0.78
600	0.99	0.98	0.972	0.96	0.95	0.94	0.92	0.88	0.79
700	0.99	0.98	0.974	0.96	0.96	0.94	0.92	0.88	0.79
800	0.99	0.98	0.974	0.97	0.96	0.94	0.93	0.88	0.78
900	0.99	0.98	0.975	0.96	0.95	0.94	0.93	0.88	0.80
1000	0.99	0.99	0.975	0.97	0.96	0.94	0.93	0.87	0.79
1200	0.99	0.99	0.978	0.96	0.96	0.95	0.92	0.88	0.78
1500	0.99	0.99	0.978	0.96	0.95	0.95	0.92	0.88	0.80
1700	0.99	0.98	0.976	0.96	0.96	0.94	0.93	0.89	0.81
1900	0.99	0.98	0.978	0.96	0.95	0.94	0.93	0.89	0.80
2000	0.07	0.07	0.064	0.06	0.06	0.94	0.06	0.06	0.05

Pesquisa número de registros modelo Barca do Caí							
NS obtido no treinamento para complexidade de 4 neurônios							
NT	6	8	10	14	16	20	24
50	0.996	0.987	0.998	0.986	0.987	0.978	0.989
100	0.996	0.997	0.994	0.988	0.984	0.979	0.872
200	0.996	0.995	0.992	0.982	0.938	0.889	0.885
300	0.995	0.993	0.98	0.979	0.899	0.966	0.811
400	0.995	0.993	0.989	0.977	0.947	0.904	0.81
500	0.994	0.99	0.982	0.959	0.938	0.865	0.763
600	0.994	0.994	0.982	0.971	0.92	0.919	0.846
700	0.993	0.987	0.988	0.955	0.941	0.907	0.86
800	0.993	0.989	0.982	0.961	0.935	0.861	0.746
900	0.994	0.989	0.984	0.963	0.927	0.934	0.815
1000	0.992	0.991	0.981	0.961	0.929	0.883	0.778
1200	0.993	0.99	0.979	0.969	0.926	0.885	0.811
1500	0.992	0.987	0.979	0.953	0.918	0.882	0.8
1700	0.99	0.985	0.975	0.956	0.932	0.866	0.801
1900	0.989	0.988	0.979	0.055	0.057	0.877	0.795
2000	0.047	0.043	0.049	0.049	0.053	0.046	0.044
NS obtido na validação para complexidade de 4 neurônios							
NT	6	8	10	14	16	20	24

50	0.98	0.97	0.97	0.93	0.90	0.86	0.76
100	0.98	0.98	0.97	0.93	0.91	0.86	0.78
200	0.99	0.98	0.98	0.93	0.92	0.85	0.78
300	0.98	0.94	0.98	0.94	0.91	0.86	0.79
400	0.99	0.99	0.98	0.94	0.93	0.86	0.79
500	0.99	0.98	0.98	0.94	0.93	0.86	0.79
600	0.99	0.99	0.98	0.94	0.92	0.87	0.80
700	0.99	0.99	0.98	0.94	0.93	0.86	0.80
800	0.99	0.99	0.98	0.84	0.93	0.86	0.80
900	0.99	0.99	0.98	0.95	0.93	0.87	0.81
1000	0.99	0.99	0.98	0.95	0.93	0.88	0.81
1200	0.99	0.99	0.98	0.95	0.93	0.87	0.81
1500	0.99	0.99	0.98	0.95	0.93	0.88	0.81
1700	0.99	0.99	0.98	0.95	0.93	0.88	0.81
1900	0.99	0.99	0.98	0.06	0.06	0.88	0.81
2000	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05	0.05

8.3 Resultados na pesquisa de complexidade

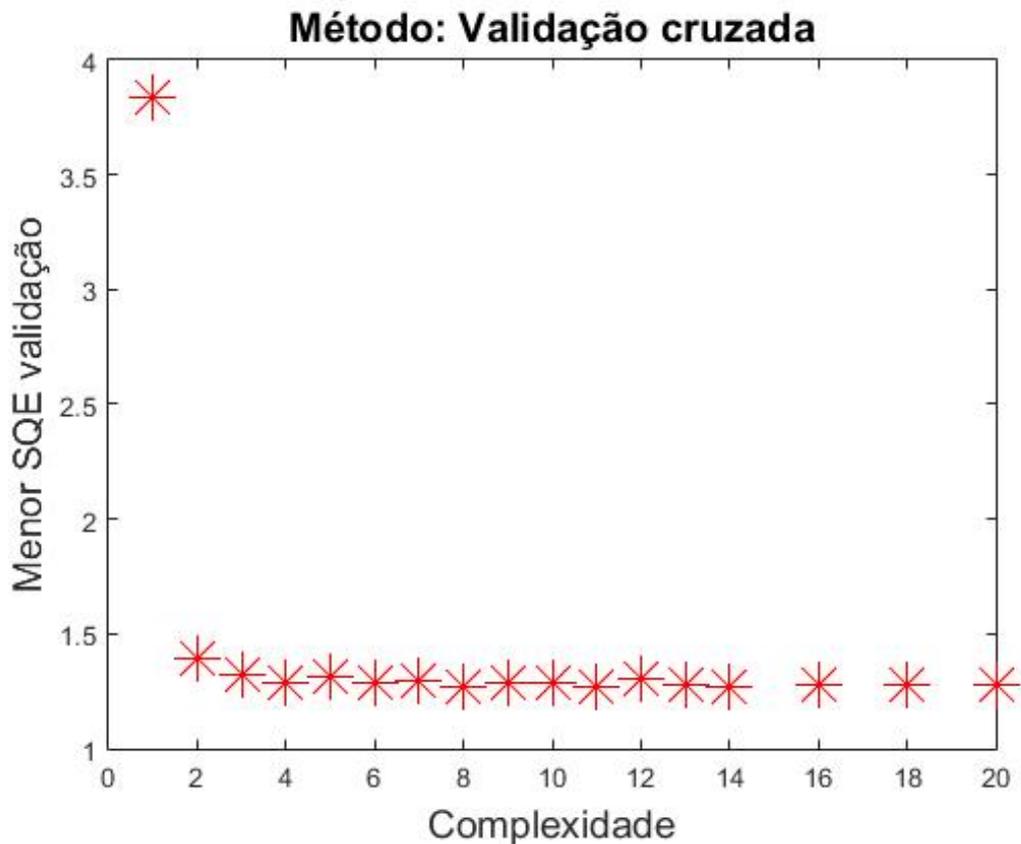


Figura 23: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 4h, no modelo Barca do Cai.

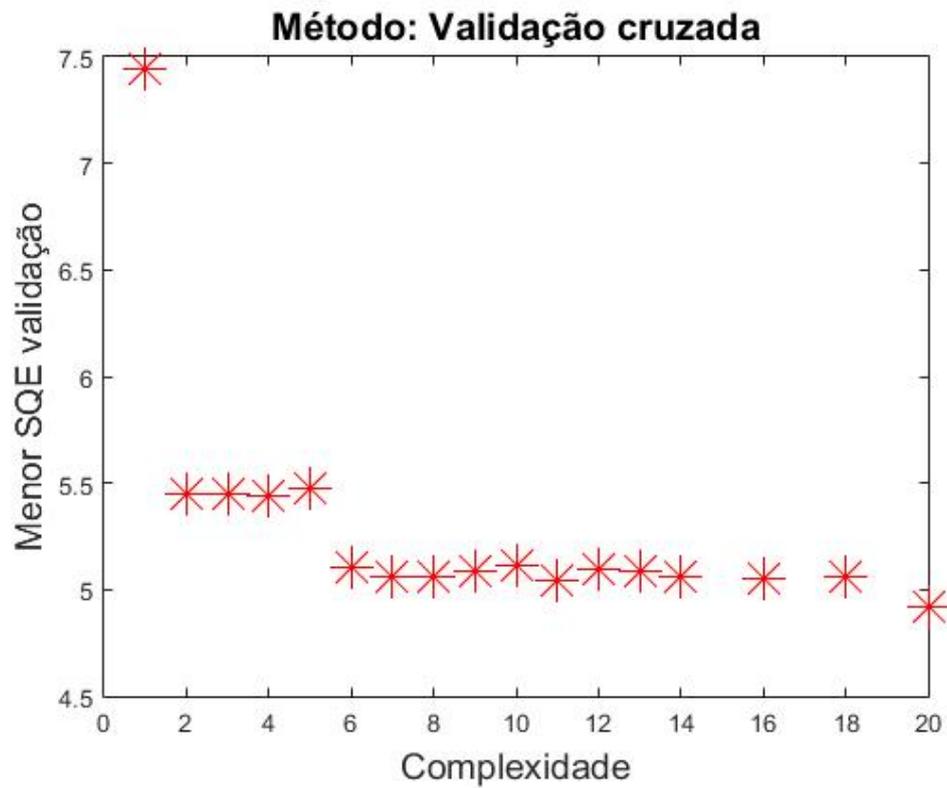


Figura 24: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 10h, no modelo Barca do Cai.

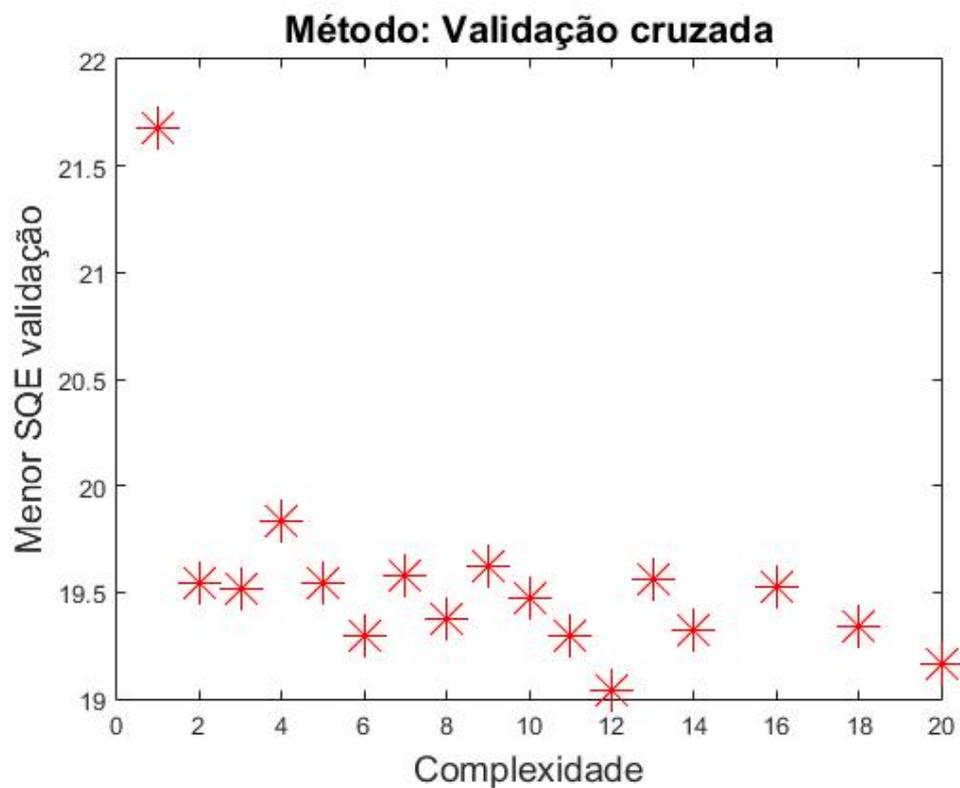


Figura 25: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 16h, no modelo Barca do Cai.

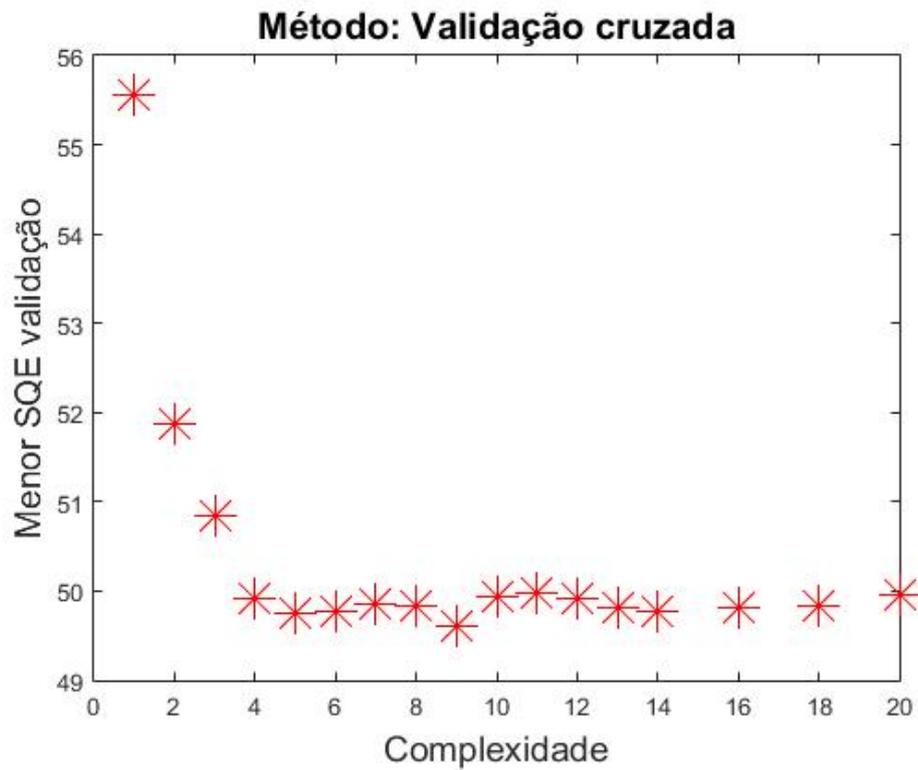


Figura 26: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 24h, no modelo Barca do Cai.

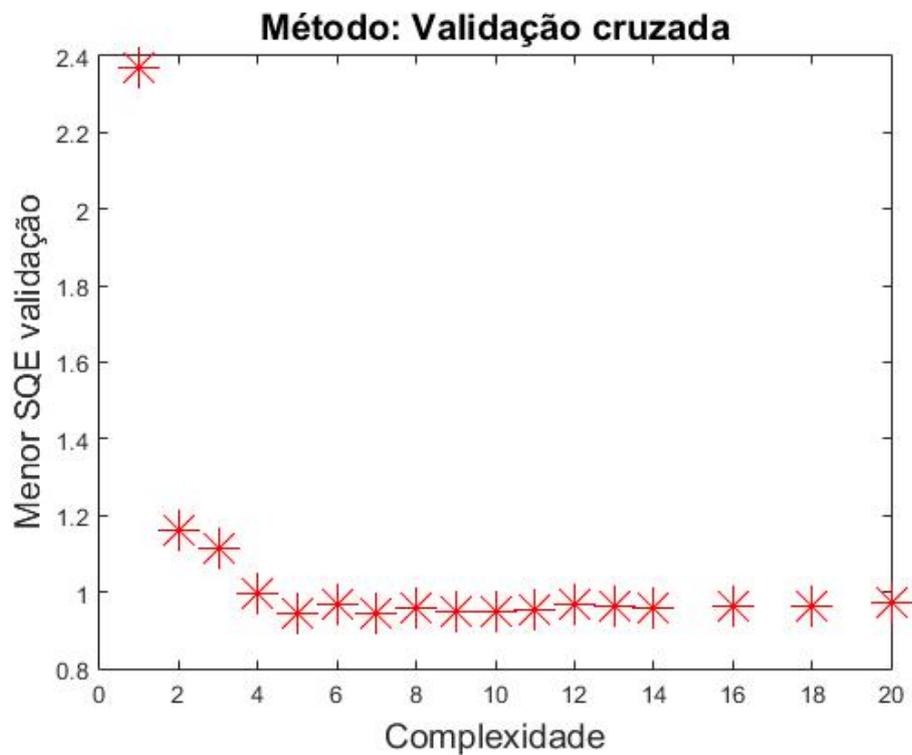


Figura 27: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 4h, no modelo Passo Montenegro.

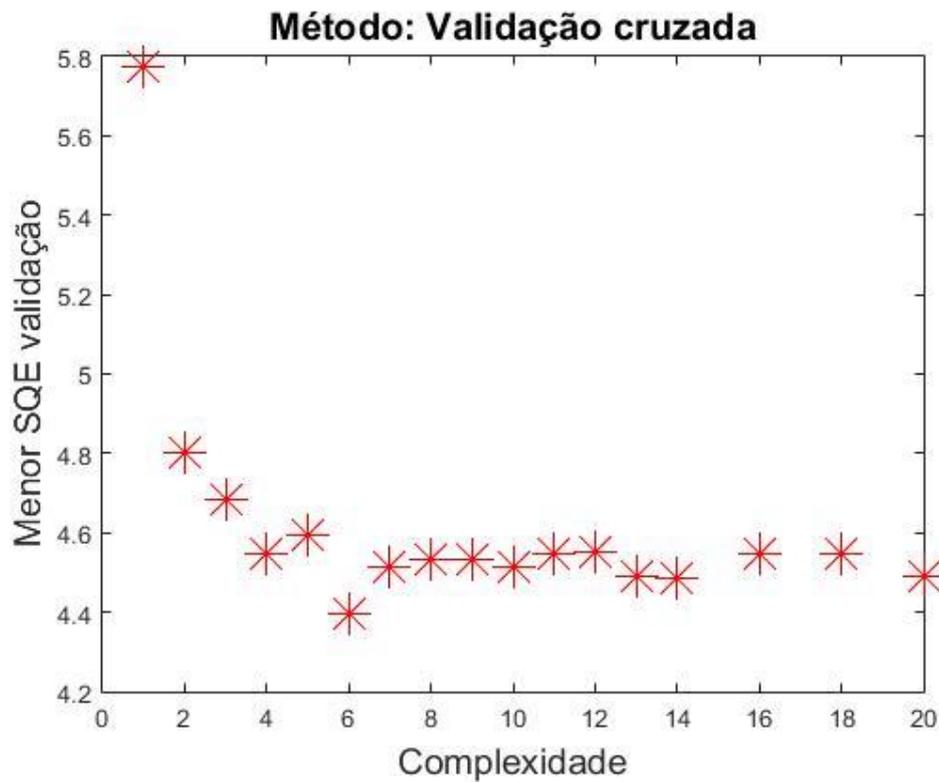


Figura 28: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 10h, no modelo Passo Montenegro.

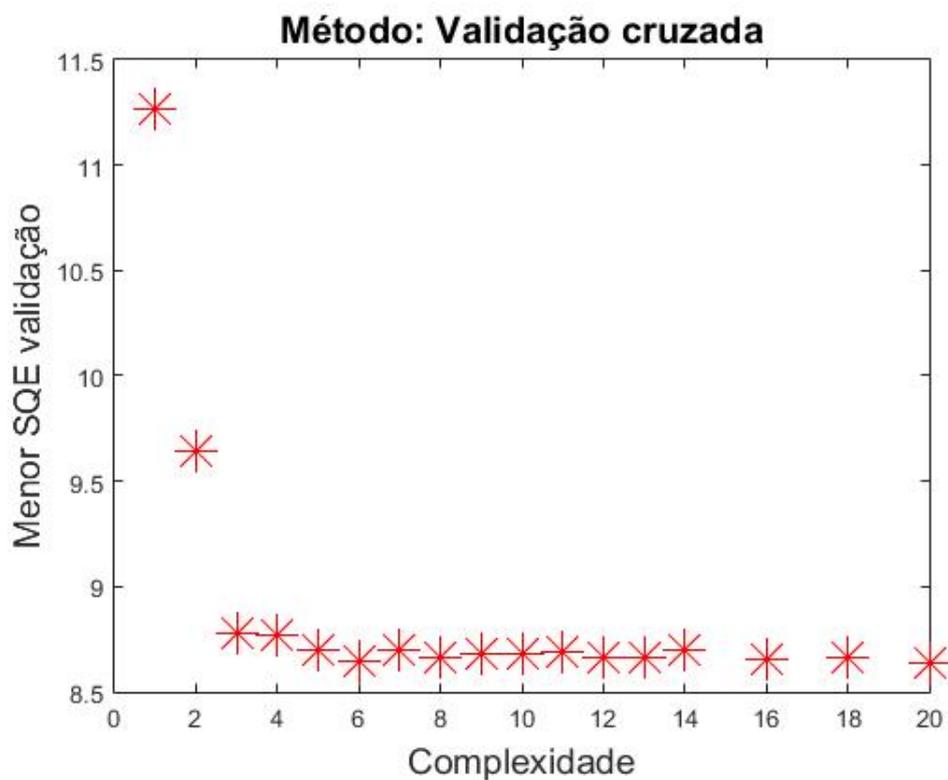


Figura 29: Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 16h, no modelo Passo Montenegro.

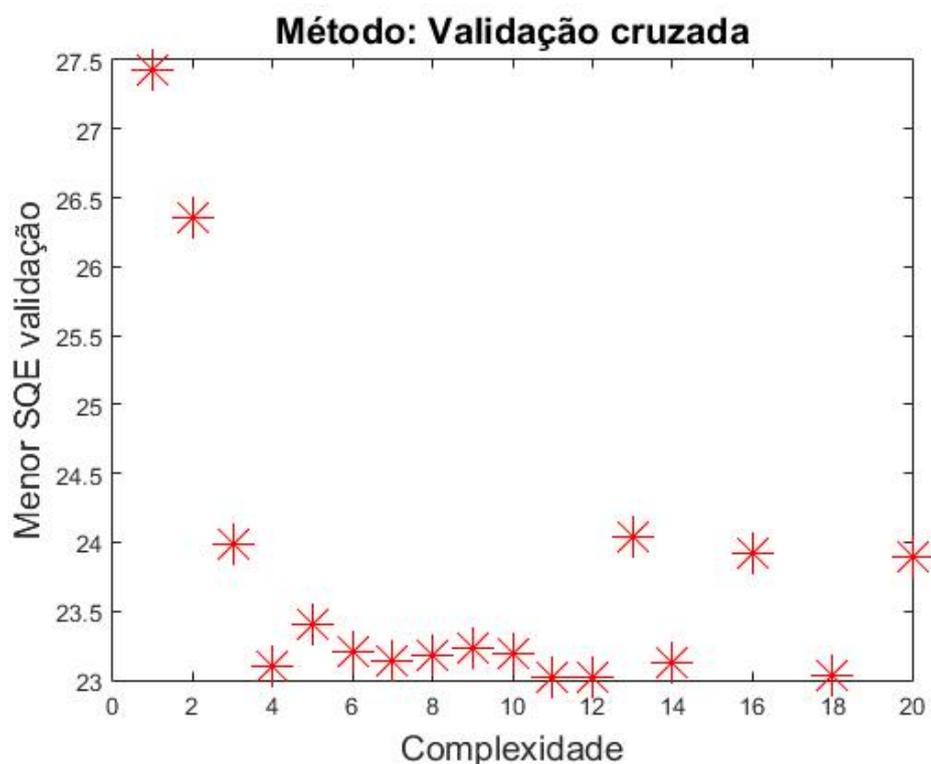


Figura 30: : Avaliação dos erros médios quadráticos por nível de complexidade, para o alcance de 24h, no modelo Passo Montenegro.

8.4 Avaliação de desempenho dos modelos de previsão

Tabela 17: Síntese das estatísticas de avaliação de desempenho modelo BC

avaliação/nni	alc na validação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87	0.81	0.70
NS -5	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.91	0.87	0.81	0.69
NS -6	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.95	0.93	0.91	0.87	0.81	0.69
E90 - 4	6.49	10.20	13.10	14.90	14.20	18.60	24.20	24.80	28.80	32.30	47.20
E90 - 5	6.12	10.10	12.70	14.00	13.90	20.80	24.30	33.70	29.20	31.80	48.90
E90 - 6	6.46	10.10	12.80	14.00	14.00	19.90	23.80	25.20	29.30	31.30	49.70
Mea - 4	5.86	7.92	9.78	11.70	13.20	15.80	20.00	22.50	25.90	31.90	41.10
Mea - 5	5.67	8.11	9.74	11.10	12.90	17.50	20.30	24.20	26.00	31.70	40.60
Mea - 6	5.81	8.18	9.94	11.20	13.00	16.90	19.90	22.60	25.90	31.50	41.50
avaliação/nni	alc na verificação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.77
NS -5	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.93	0.90	0.86	0.77
NS -6	1.00	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.94	0.92	0.90	0.86	0.77
E90 - 4	11.10	14.20	20.20	21.60	21.00	34.50	45.00	46.50	49.60	72.50	135.20
E90 - 5	10.50	13.80	20.50	19.00	20.40	32.80	43.90	42.80	49.80	71.20	137.40

E90 - 6	11.50	14.20	18.40	18.90	21.10	34.50	44.20	44.80	50.00	57.90	137.30
Mea - 4	7.85	10.70	13.60	17.10	18.10	23.20	29.40	31.80	36.90	45.00	58.40
Mea - 5	7.46	10.90	14.10	15.60	17.80	24.30	29.40	30.80	37.20	45.10	59.30
Mea - 6	7.94	10.90	13.40	15.60	18.50	24.20	29.20	31.50	36.80	43.80	59.40

Tabela 18: Síntese das estatísticas de avaliação de desempenho modelo PM

avaliação/nni	alc na validação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.88	0.80
NS -5	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.93	0.89	0.80
NS -6	1.00	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.93	0.89	0.80
E90 - 4	7.43	11.40	14.20	16.60	17.50	18.70	20.10	19.50	21.60	23.80	30.40
E90 - 5	7.51	10.90	14.00	16.60	17.40	18.00	19.70	19.10	21.90	23.50	30.90
E90 - 6	7.33	11.10	13.90	16.70	17.00	18.60	19.90	18.90	21.80	23.60	30.20
Mea - 4	4.82	7.04	8.93	10.20	11.70	12.50	13.10	13.90	14.70	17.90	23.80
Mea - 5	4.85	6.75	8.76	10.20	11.80	12.20	12.90	13.70	14.90	17.80	24.00
Mea - 6	4.78	6.90	8.73	10.20	11.70	12.60	13.00	13.70	14.80	17.90	23.90
avaliação/nni	alc na verificação										
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30
NS -4	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.93	0.88
NS -5	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.97	0.97	0.96	0.92	0.87
NS -6	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97	0.96	0.93	0.87
E90 - 4	10.40	17.80	19.50	20.20	20.40	22.80	26.20	26.10	28.10	36.00	55.80
E90 - 5	10.50	12.60	18.40	20.50	22.00	27.50	27.10	26.40	32.60	39.60	55.00
E90 - 6	9.94	13.60	18.60	21.80	23.30	22.10	25.30	27.20	32.20	33.60	52.40
Mea - 4	5.27	8.57	10.40	10.80	12.60	14.90	16.40	17.90	19.00	24.60	32.70
Mea - 5	5.34	6.88	9.99	11.10	13.70	14.80	16.10	18.30	19.30	25.80	33.60
Mea - 6	5.15	6.99	9.88	11.30	14.10	14.30	16.50	17.90	20.20	24.10	34.20

8.5 Relatório do posicionamento por ponto preciso e monografia do marco posto 8717000 (Barca do Cai)



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: N/A

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2015/11/24 12:41:00,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2015/11/24 16:45:00,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NOV702GG NONE
Órbitas dos satélites:¹	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	15,00
Sigma² da pseudodistância(m):	2,000
Sigma da portadora(m):	0,015
Altura da Antena³(m):	1,322
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	2,19 GPS
Resíduos da fase da portadora(cm):	1,27 GPS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (E a que deve ser usada)⁴	-29° 35' 24,2910"	-51° 23' 00,1682"	14,50	6726574.264	462872.719	-51
Na data do levantamento⁵	-29° 35' 24,2849"	-51° 23' 00,1691"	14,50	6726574.452	462872.695	-51
Sigma(95%)⁶ (m)	0,005	0,015	0,031			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	5,00					
Altitude Ortométrica (m)	9,50					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,450	1,000	0,030	0,050
Após 2 horas	0,300	0,800	0,015	0,025
Após 4 horas	0,200	0,500	0,006	0,015
Após 6 horas	0,180	0,400	0,004	0,010

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

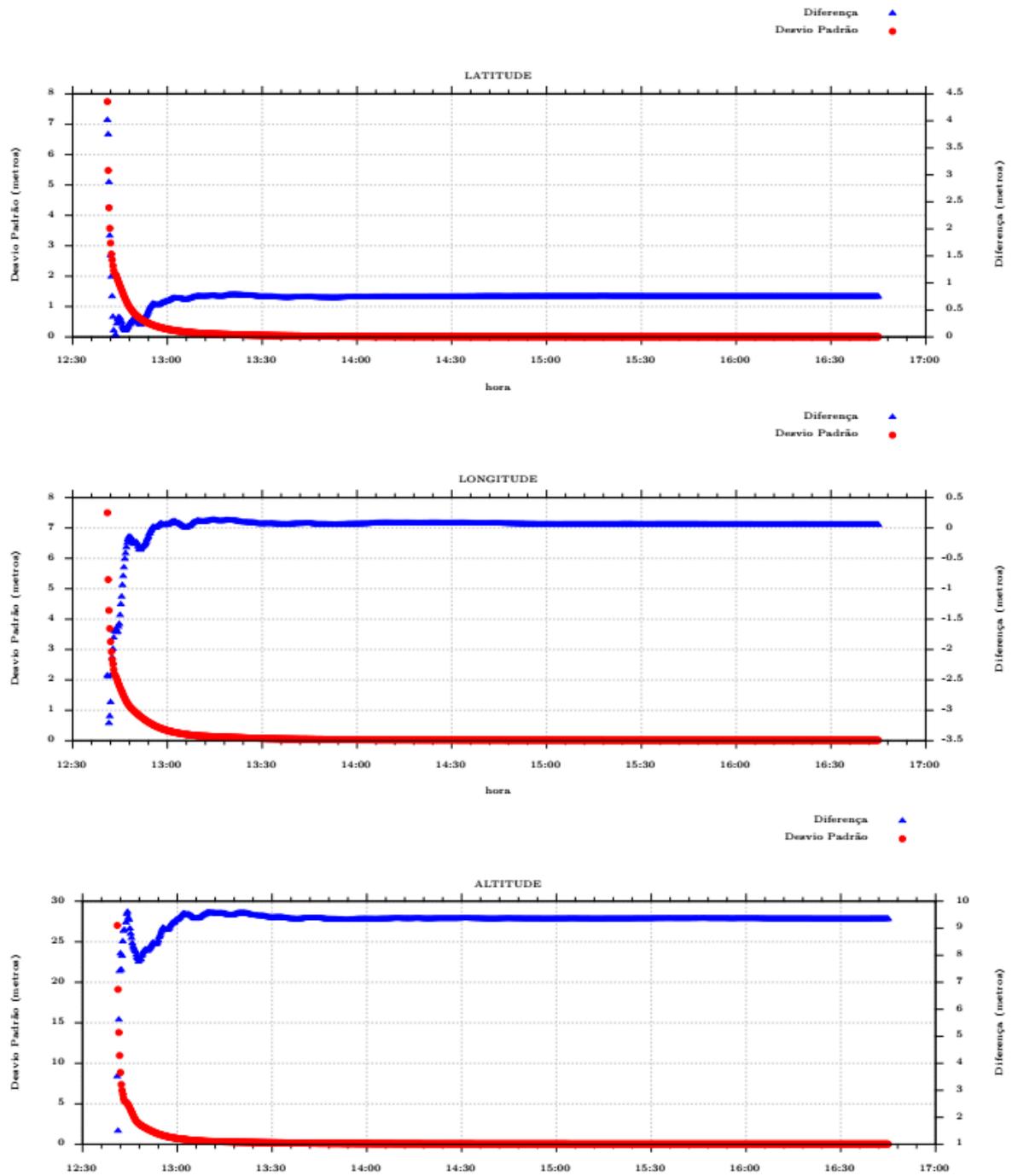
⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório dependem da qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário. Em caso de dúvidas, críticas ou sugestões contate: ibge@ibge.gov.br ou pelo telefone 0800-7218151. Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pelo Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCAN).

Processamento autorizado para uso do IBGE.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
00303280.150



MONOGRAFIA DO MARCO

Marco: PA001 **Estação:** 87170000 - Barca do Caí **Data da Ocupação:** 24/11/2015

Localização Cartográfica: MC 51° - Fuso 22 - Município de São Sebastião do Caí - RS

Coordenadas Geodésicas - SIRGAS 2000

$\phi =$ 29° 35' 24,2910" S
 $\lambda =$ 51° 23' 00,1682" W

Coordenadas UTM - SIRGAS 2000

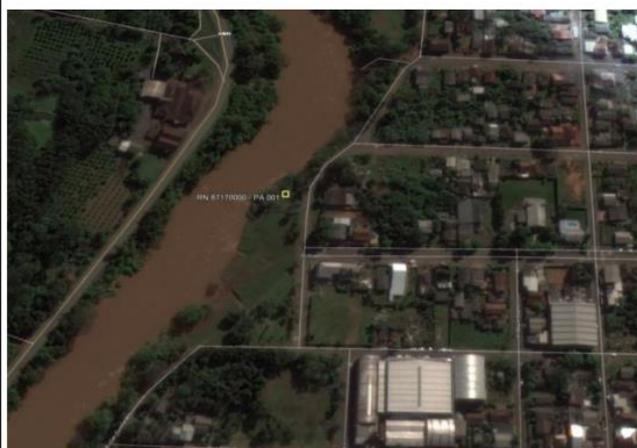
N= 6726574,264 m
 E= 462872,719 m

helip = 14,500 m Ondulação Geoidal = 5,00 m horto = 9,500 m

Transporte de Cota

RN de Referência: RN 10402 horto = 9,646 m

CROQUI



FOTO



Materialização/Itinerário

Marco de concreto piramidal 8 x 12 x 60 cm, com chapa metálica numerada, localizado na Estação Barca do Caí - 87170000, em São Sebastião do Caí - RS. Localiza-se na zona urbana perto de uma bomba de captação da CORSAN. Seguindo pela Rua Tiradentes, em direção ao Rio Caí, a direita, ao final da rua encontra-se o marco materializado.

Responsável Técnico

EMANUEL DUARTE SILVA

Pesquisador em Geociências

GIANA GRUPIONI REZENDE

Analista em Geociências

LUCIANO TRASEL

Técnico em Geociências

8.6 Relatório de posicionamento por ponto preciso e monografia do marco posto 87270000 (Passo Montenegro)



Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: N/A

Início: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2015/11/26 15:53:30,00
Fim: AAAA/MM/DD HH:MM:SS,SS	2015/11/26 19:57:15,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	NOV702GG NONE
Órbitas dos satélites: ¹	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	15,00
Sigma² da pseudodistância(m):	2,000
Sigma da portadora(m):	0,015
Altura da Antena³(m):	1,310
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	1,25 GPS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,97 GPS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-29° 42' 04,0154"	-51° 26' 28,7150"	12,57	6714251.272	457309.516	-51
Na data do levantamento ⁵	-29° 42' 04,0093"	-51° 26' 28,7159"	12,57	6714251.460	457309.491	-51
Sigma(95%)⁶ (m)	0,004	0,011	0,026			
Modelo Geoidal	MAPGEO2015					
Ondulação Geoidal (m)	5,03					
Altitude Ortométrica (m)	7,54					

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,450	1,000	0,030	0,050
Após 2 horas	0,300	0,800	0,015	0,025
Após 4 horas	0,200	0,500	0,006	0,015
Após 6 horas	0,180	0,400	0,004	0,010

¹ Órbitas obtidas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCAN).

² O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.

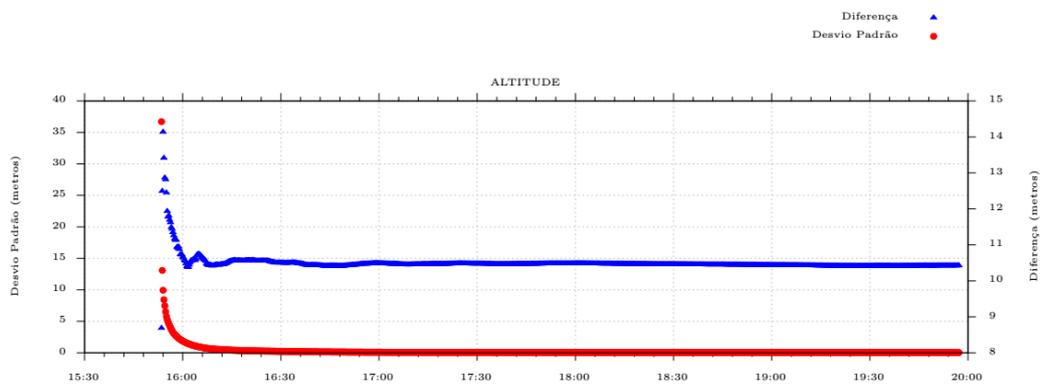
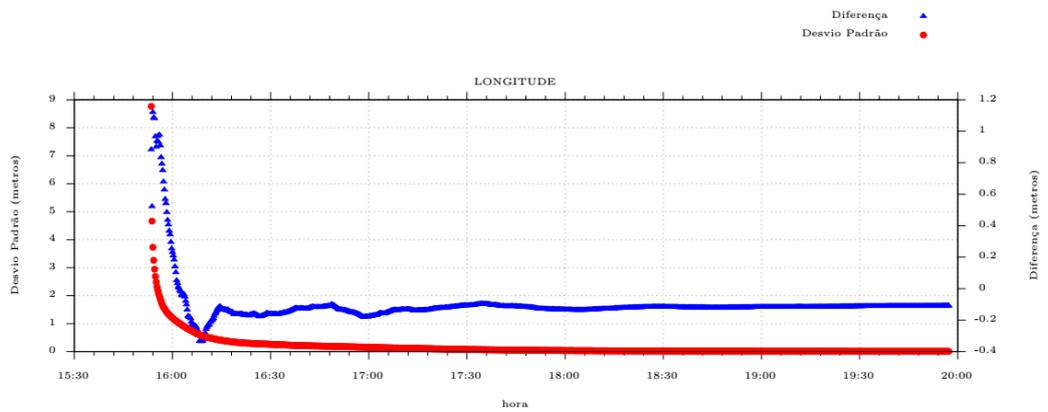
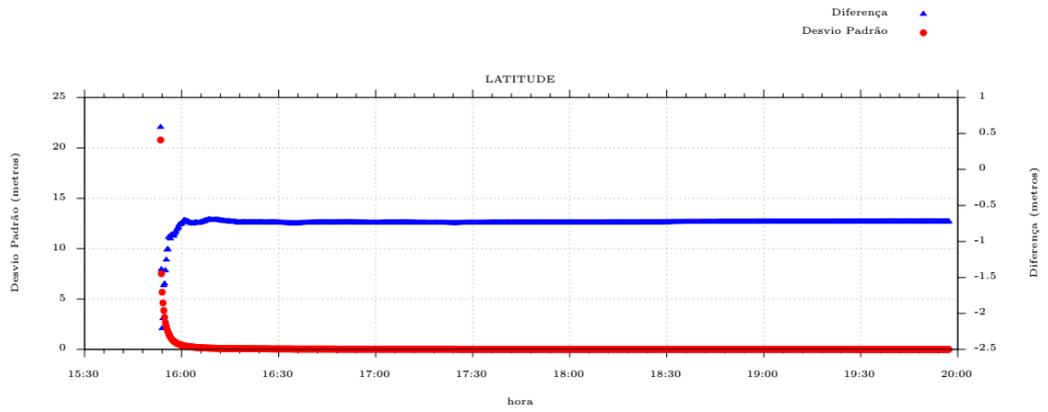
³ Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).

⁴ A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento, utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.

⁵ A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.

⁶ Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Desvio Padrão e Diferença da Coordenada a Priori
00303300.15O



		Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral		Ministério de Minas e Energia		GOVERNO FEDERAL  PÁTRIA EDUCADORA	
MONOGRAFIA DO MARCO							
Marco: PA002		Estação: 87270000 - Passo Montenegro		Data da Ocupação: 26/11/2015			
Localização Cartográfica: MC 51° - Fuso - Montenegro - RS							
Coordenadas Geodésicas - SIRGAS 2000				Coordenadas UTM - SIRGAS 2000			
$\phi =$	29 °42' 04,0154" S			N=	6714251,272 m		
$\lambda =$	51 °26' 28,7150" W			E=	457309,516 m		
helip =	12,570 m		Ondulação Geoidal =	5,030 m		horto =	7,540 m
Transporte de Cota							
RN de		RN 8133		horto =		7,284 m	
		RN 8755		horto =		7,906 m	
CROQUI				FOTO			
							
Materialização/Itinerário							
<p>Marco de concreto piramidal 8 x 12 x 60 cm, com chapa metálica numerada, localizado na Estação Passo Montenegro - 87270000, na zona rural de Montenegro - RS. Partindo de Montenegro, seguindo pela RS 240, percorra por aproximadamente por 2,5 km até chegar numa estrada não pavimentada, por onde vai percorrer ainda aproximadamente por 6 km. O marco encontra-se na propriedade depois da porteira a esquerda, próximo a cerca.</p>							
Responsável Técnico							
EMANUEL DUARTE SILVA Pesquisador em Geociência							
GIANA GRUPIONI REZENDE Analista em Geociências							
RICARDO DUARTE DE OLIVEIRA Analista em Geociências							

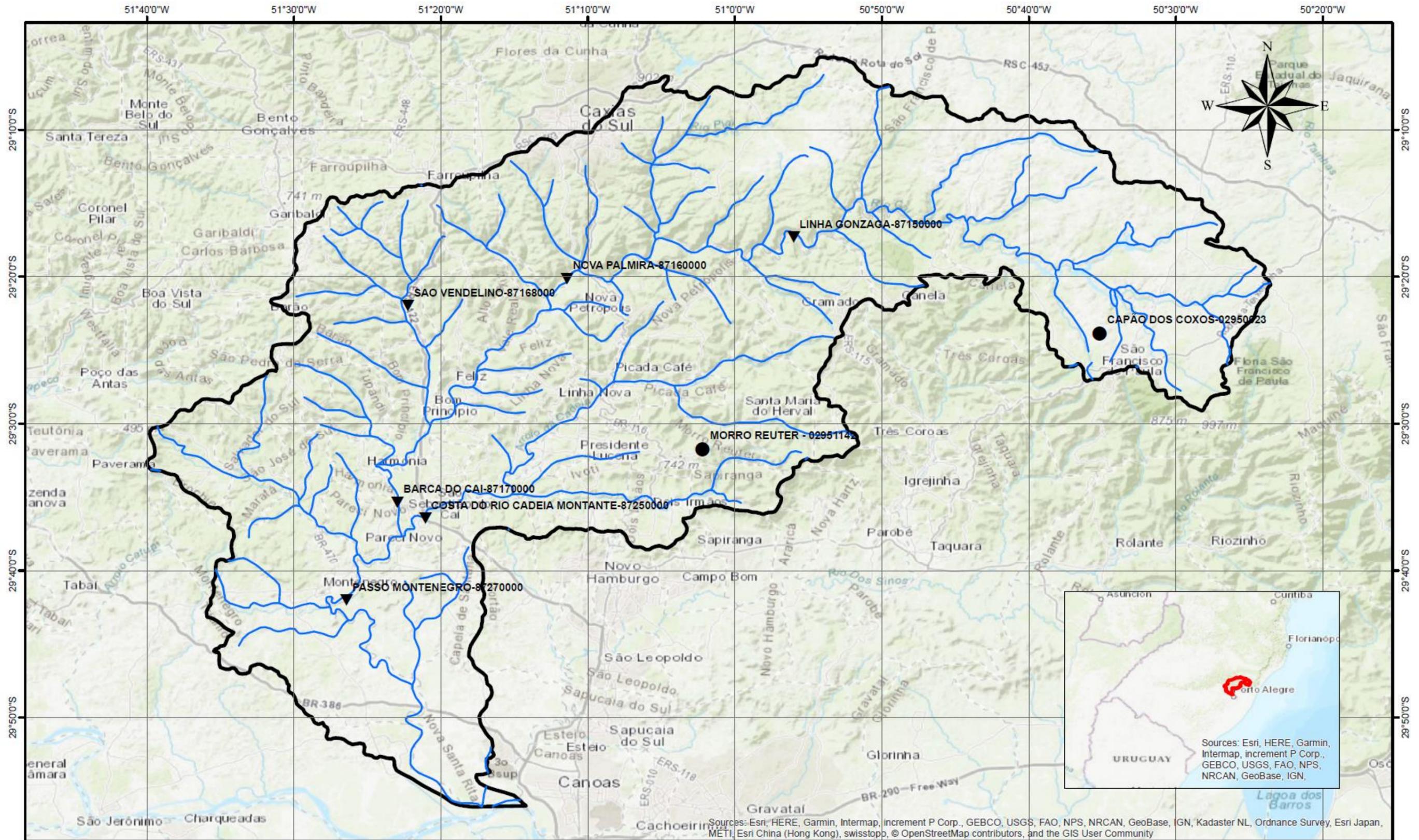
8.7 Tabela de referência para conteúdo do imóvel padrão

Compartimento	Descrição do bem	Valor do bem	Percentual de dano por profundidade de submersão			
			0.5	1	1.5	2
Sala de estar	Sofá de 2 lugares	699	100	100	100	100
	Sofá de 3 lugares	899	100	100	100	100
	Mesa de centro	224	100	100	100	100
	Estante Home Theater	589	90	60	100	100
	Armário baixo	495	100	100	100	100
	Ar-condicionado Split - 18,000 Btu"s (Quente/Frio)	2656	0	0	0	100
	Ventilador - 30 cm	64.9	0	100	100	100
	Televisão de 49" LED	1999	100	100	100	100
	Micro system	759	50	100	100	100
	Notebook	1999	100	100	100	100
	Mesinha	129	100	100	100	100
	Telefone	82	100	100	100	100
	Luminária de mesa	28.29	100	100	100	100
Sala de jantar	Conjunto de mesa e 6 cadeiras	999.9	10	50	100	100
	Armário baixo (buffet)	513.05	100	100	100	100
Quarto casal	Ar-condicionado Split - 12,000 Btu"s (Quente/Frio)	1680	0	0	0	100
	Ventilador - 30 cm	64.9	0	100	100	100
	Cama box de casal	264.9	90	90	100	100
	Colchão de casal - D33 - Espuma	489.9	90	90	100	100
	Armário duplex	264.9	100	100	100	100
	Televisão de 40" LED	1499	100	100	100	100
	Cômoda	259	60	60	100	100
	Telefone	82	100	100	100	100
	Mesa de cabeceira (2 unidades)	229	100	100	100	100
	Luminária de mesa	28.29	100	100	100	100
	Quarto solteiro	Cama de solteiro Box	269.9	90	90	100
Colchão de solteiro - D33		329	90	90	100	100
Armário duplex		264.9	100	100	100	100
Cômoda		259	60	60	100	100
Mesa de cabeceira		114.5	100	100	100	100
Luminária de mesa		28.29	100	100	100	100
Rádio relógio		123.18	100	100	100	100
Mesa de estudo		249	100	100	100	100
Cadeira		249	100	100	100	100
Ar-condicionado Split - 9,000 Btu"s (Quente/Frio)		1418	0	0	0	100
Ventilador - 30 cm		64.9	0	100	100	100
Cozinha e área de serviço		Cozinha modulada	1299.9	100	100	100
	Conjunto de mesa e 4 cadeiras	619.9	33	60	100	100
	Fogão - 4 bocas	646.92	10	40	100	100
	Depurador	259	0	0	0	100

Compartimento	Descrição do bem	Valor do bem	Percentual de dano por profundidade de submersão			
			0.5	1	1.5	2
	Forno elétrico	459.9	30	60	100	100
	Micro-ondas	289.9	0	0	50	100
	Geladeira Frost-Free	1598.99	60	80	100	100
	Torradeira (Sanduicheira Grill)	85	0	50	100	100
	Liquidificador	59.89	0	50	100	100
	Batedeira	79.8	0	50	100	100
	Lavadora de louças	1639	50	50	100	100
	Cafeteira	57.58	0	50	100	100
	Lavadora de roupas - 8 kg	945.2	70	70	100	100
	Ferro de passar roupas	82	0	100	100	100
	Aspirador de pó	164.16	50	50	100	100

Fonte: Adaptado de Fadel (2015)

8.8 Mapa do Sistema de Alertas Hidrológicos da Bacia do Rio Caí



Legenda:

-  Delimitação da bacia
-  Fluviométrica
-  Pluviométrica
-  Hidrografia

Escala	Data	Execução
1:430.000	Abril/2019	Emanuel Duarte Silva Pesquisador em Geociências



SECRETARIA DE
GEOLOGIA, MINERAÇÃO
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Mapa do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí

CPRM - Superintendência Regional de Porto Alegre

Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community

Sources: Esri, HERE, Garmin, Intermap, increment P Corp., GEBCO, USGS, FAO, NPS, NRCAN, GeoBase, IGN, Kadaster NL, Ordnance Survey, Esri Japan, METI, Esri China (Hong Kong), swisstopo, © OpenStreetMap contributors, and the GIS User Community