

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

**Tese de Doutorado**

**PREVISÃO POR CONJUNTO DE VAZÕES AFLUENTES A  
RESERVATÓRIOS EM GRANDES BACIAS  
HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS**

FERNANDO MAINARDI FAN

Porto Alegre, RS - Brasil

Maio de 2015

**FERNANDO MAINARDI FAN**

**PREVISÃO POR CONJUNTO DE VAZÕES AFLUENTES A  
RESERVATÓRIOS EM GRANDES BACIAS  
HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**ORIENTADOR: Walter Collischonn**

Banca Examinadora:

Dr. Dirceu Silveira Reis Junior, UnB  
Doutor pela Cornell University – Estados Unidos

Dr. Luis Gustavo Gonçalves de Gonçalves, INPE  
Doutor pela University of Arizona – Estados Unidos

Dr. Guilherme Fernandes Marques, IPH-UFRGS  
Doutor pela University of California– Estados Unidos

Porto Alegre, RS - Brasil

2015

## APRESENTAÇÃO

Esta Tese foi desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) sob a orientação do prof. Walter Collischonn do IPH-UFRGS. A pesquisa foi financiada com bolsa de Doutorado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - processo 141215/2013-5) nos períodos de Março de 2012 a Dezembro 2013, e Janeiro de 2015 até o momento da Defesa. E com período de Doutorado Sanduíche na Universität Duisburg-Essen (Alemanha) financiado com bolsa de estudos concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - processo 99999.011658/2013-04), sob a co-orientação do Dr. Dirk Schwanenberg, entre Janeiro de 2014 e Dezembro de 2014.

Uma parte dos resultados obtidos durante a realização desta pesquisa foi publicada nos trabalhos listados a seguir.

Artigos em periódicos:

- **FAN F. M.**; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. M. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study, *Journal of Hydrology*, Volume 519, Part D, 2014, Pages 2906-2919, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.038>.
- SCHWANENBERG, D. ; **FAN, F. M.** ; NAUMANN, S. ; KUWAJIMA, J. I. ; ALVARADO, R. ; REIS, A. A. . Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty. *Water Resources Management*, p. 10.1007/s11269-, 2015.
- **FAN, F. M.**; MELLER, A. ; COLLISCHONN, W. . Incorporação de filtro numérico de separação de escoamento na assimilação de dados para previsão de vazões utilizando modelagem hidrológica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2015 (in press).
- **FAN, F. M.**; SCHWANENBERG, D. ; COLLISCHONN, W.; WEERTS, A. Title: Verification of Inflow into Hydropower Reservoirs using Ensemble Forecasts of the TIGGE Database for Large Scale Basins in Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. EJRH-D-14-00159R1. 2015 (in press)

- **FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; JIMÉNEZ, K. Q.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D.; SIQUEIRA, V.** Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. *Journal of Flood Risk Management*. 2015 (in press).

Trabalhos em eventos:

- **FAN, F. M. ; SCHWANENBERG, D. ; COLLISCHONN, W. ; REIS, A. A. ; ALVARADO, R. ; SIQUEIRA, V. A. .** Decision Support on the Sediments Flushing of Aimorés Dam Using Medium-Range Ensemble Forecasts. In: EGU, 2015, Vienna - Austria. *Geophysical Research Abstracts*. Vienna: EGU, 2015. v. 17. p. 2959-2959.
- **SCHWANENBERG, D. ; FAN, F. M.; NAUMANN, S. ; KUWAJIMA, J. I. ; ALVARADO, R. ; REIS, A. A. .** Short-term Reservoir Optimization by Stochastic Optimization to Mitigate Downstream Flood Risks. In: HIC 2014 11th International Conference on Hydroinformatics, 2014, New York - USA. *HIC 2014 11th International Conference on Hydroinformatics*, 2014.
- **FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D. ; KUWAJIMA, J. I. ; REIS, A. A. ; COLLISCHONN, W. .** Ensemble Streamflow Predictions in the Três Marias Basin, Brazil. In: European Geosciences Union General Assembly 2014, 2014, Vienna. *Geophysical Research Abstracts*, 2014. v. 16. p. 14191-14191.
- **SCHWANENBERG, D.; REIS, A. A. ; KUWAJIMA, J. I. ; ALVARADO, R. ; FAN, F. M. .** Short-term Reservoir Optimization by Stochastic Optimization for Mitigation Downstream Flood Risks. In: European Geosciences Union General Assembly 2014, 2014, Vienna. *Geophysical Research Abstracts*, 2014. v. 16. p. 11462-11462.
- **FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. ; QUIROZ, K. ; SORRIBAS, M. V. ; BUARQUE, D. C. ; SIQUEIRA, V. A. .** Ensemble flood forecasting on the Tocantins River - Brazil. In: European Geosciences Union General Assembly 2014, 2014, Vienna. *Geophysical Research Abstracts*, 2014. v. 16. p. 1818-1818.
- **FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. ; QUIROZ, K. ; SORRIBAS, M. V. ; BUARQUE, D. C. ; SIQUEIRA, V. A. .** Flood Forecasting on the Tocantins River Using Ensemble Rainfall Forecasts and Real-Time Satellite Rainfall Estimates. In: 6th International Conference on Flood Management - ICFM6, 2014, São Paulo - SP. *PROCEEDING OF THE 6th International Conference on Flood Management - ICFM6*. Porto Alegre - RS: ABRH, 2014. p. PAP014692.
- **FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. ; BUARQUE, D. C. ; TUCCI, C. E. M. ; BOTELHO, L. C. M. .** DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA DISTRIBUÍDA PARA A REGIÃO DA UHE TRÊS MARIAS. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves - RS. *Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2013.

## AGRADECIMENTOS

É com muito prazer que apresento esta Tese, cujos desenvolvimentos iniciais surgiram no ano de 2011, com as primeiras versões dos sistemas de previsão para as bacias do Rio São Francisco e do Rio Tocantins. Este trabalho com certeza não poderia ter sido executado sem o apoio de muitas pessoas e instituições, às quais gostaria de dirigir meu sincero muito obrigado:

- Ao meu professor orientador, e também amigo, Walter Collischonn, por sempre apoiar com entusiasmo e acompanhar de perto o meu trabalho, e pela intensa transmissão de motivação na pesquisa com hidrologia;
- Ao meu orientador durante o meu período de Doutorado na Alemanha, Dirk Schwannenberg, por ter me proporcionado o contato com muitas tecnologias e pessoas que permitiram o desenvolvimento deste trabalho. E também pela grande parceria que formamos durante o período de contato mais próximo;
- Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas como um todo, e ao Governo Federal nas figuras da CAPES e do CNPQ, que concederam condições, estrutura física e as bolsas de estudos que me permitiram realizar este trabalho. Da mesma forma, agradeço a todas as pessoas que inconscientemente me auxiliaram e financiaram, e quem espero estar retribuindo com os resultados de meu trabalho;
- Aos meus colegas do grupo de pesquisa em Hidrologia de Grande Escala (HGE) no IPH durante o período de Doutorado: Paulo, Diogo, Rodrigo, Karen, Margarita, Katiucia, Mino, Ayan, Pedro, Siqueira, Anderson e Bibiana. Pela convivência excelente, por todos os debates e discussões de ideias, e por sempre me apoiarem e me ajudarem quando eu precisei. Tenho certeza que formamos uma grande equipe na história do grupo de pesquisa em termos de empenho e união;
- Aos meus colegas de trabalho na Universidade de Duisburg-Essen na Alemanha: Rodolfo, Julio, Viktoria, Timo, Daniel, Julian, JJ, Na'ama, Professor Andre Niemman. Pela parceria durante meu período na Universidade. Gostaria de dirigir um agradecimento especial aos colegas Rodolfo, Julio e Timo, e que me auxiliaram bastante em vários momentos em um País diferente.
- Ao Professor Juan Martin, por ser um excelente professor, ótimo companheiro de trabalho e também um grande amigo, sempre disposto a conversar e a ajudar, a quem sei que sempre posso contar e tenho grande admiração;

- Ao Professor Tucci, por ter me proporcionado o contato com projetos de previsão de vazão;
- Aos membros da minha banca de defesa de qualificação, pela atenção na correção do meu trabalho e sugestões de melhorias;
- À minha irmã, Laura e aos meus pais, Jorge e Isabel, que sempre me apoiaram incondicionalmente e nunca me deixaram faltar amor e carinho;
- E finalmente, à minha namorada Vilma, por todo o apoio durante a realização deste trabalho, inclusive durante o período que estive na Alemanha, pelo carinho, pelas conversas, e por alegrar meus dias com a sua companhia.

## RESUMO

A previsão com antecedência de curto e médio prazo da vazão em diferentes locais de bacias hidrográficas geralmente é benéfica ao permitir uma resposta antecipada a eventos hidrológicos como cheias, e a operação mais eficiente de obras hidráulicas como barragens. Atualmente, cada vez mais se tem reconhecida a importância da inclusão das incertezas na geração de previsões hidrológicas, feita através de previsões por conjunto (ou *ensemble*). Neste tipo de previsão são feitas inferências sobre cenários possíveis futuros através da consideração de, por exemplo, múltiplas trajetórias possíveis dos estados da atmosfera, que ao serem aplicadas em um modelo hidrológico resultam em distribuições de trajetórias de vazões. Várias aplicações recentes tem sugerido a possibilidade da tomada de melhores decisões para o futuro quando fundamentadas neste conhecimento das incertezas. No Brasil, um uso predominante de previsões hidrológicas é na operação de reservatórios de usinas hidroelétricas, que constituem a maior fonte de energia do País. As previsões nestes casos são utilizadas tanto para a operação normal do sistema nacional, feita de forma centralizada, como para a operação local das usinas em casos de cheia, onde é necessário velar pela segurança da barragem e pela atenuação de impactos a jusante e/ou a montante dos barramentos. Contudo, a forma como as previsões de vazão são geradas e usadas no cenário nacional não são baseadas em técnicas de previsão por conjunto, onde a própria pesquisa local sobre os potenciais benefícios destas formas de geração de previsões pode ser classificada como incipiente. Assim, o objetivo principal deste estudo é investigar benefícios em termos de qualidade e persistência do uso de previsões de afluência por conjunto para reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras em curto e médio prazo. Para cumprir com estes objetivos foram propostos ensaios de previsão de vazão por conjunto para três bacias hidrográficas brasileiras: Alto São Francisco, Doce, e Tocantins. O modelo hidrológico MGB-IPH foi aplicado para a execução de previsões retroativas (*hindcastings*) alimentado por dados de chuva provindos de três diferentes sistemas de previsão meteorológica por conjunto (ECMWF-pf, GEFS, e CPTEC-pf) e mais uma previsão determinística de referência (ECMWF-fc), todos disponíveis na base de dados denominada TIGGE. De uma forma geral, as previsões por conjunto, principalmente dos modelos ECMWF-pf e GEFS, se mostraram superiores em termos de qualidade e persistência na comparação com a previsão determinística. E o uso do Super Ensemble, formado pela combinação dos três modelos mostrou-se uma alternativa entre as melhores testadas, principalmente por ser também uma estratégia robusta. Para uma estratégia de defesa contra cheias, as análises indicam benefícios para a consideração dos membros superiores dos conjuntos, e já para uma estratégia de operação de reservatórios essa visão pode ser mais focada em vazões médias, as quais podem conter algum viés. Já a comparação entre as bacias mostrou que resultados não podem ser transportados de um local para outro, apesar de estarem no mesmo clima. Em relação às incertezas, notou-se que a modelagem hidrológica amplifica as incertezas na previsão na medida em que os estados do modelo da grande bacia evoluem. De qualquer forma, acredita-se que os resultados mostram que mais investimentos em técnicas de previsão por conjunto e suas aplicações são um caminho a ser seguido para ampliar os benefícios do uso de previsões hidrológicas.

**Palavras-chaves:** Previsão de vazão, Previsão por conjunto, Modelagem Hidrológica.

## ABSTRACT

Short to medium-term streamflow forecasts at different locations in a watershed are generally beneficial to allow an early response to hydrological events such as floods, and more efficient operation of hydraulic structures such as dams. Currently, an increasingly recognition has been given to the including of uncertainties in the generation of hydrological forecasts, what is usually made producing the so called Ensemble Forecast. In this kind of forecast inferences about possible future scenarios are made by considering, for example, multiple possible trajectories of the atmospheric states, which when applied to a hydrological model results in streamflow trajectories distributions. Several recent applications suggested the possibility of better decisions making based on this uncertainties knowledge. In Brazil, a predominant use of hydrological forecasts is for hydropower reservoirs operation, which are the largest source of energy for the country. Future inflows estimates in these cases are used either for normal operation of the national system, done centrally, as for local operation of the dams in cases of floods, where it is necessary to ensure the dam safety and the mitigation of impacts downstream and/or upstream. However, the currently technique used to generate the operational forecasts is not based on ensembles, and the Brazilian local research on the potential benefits of these forms of forecasts production can be classified as incipient. Thus, the aim of this Thesis was to investigate benefits in terms of quality and persistence of using short to medium-term ensemble inflow forecast for reservoirs located on large Brazilian river basins. To fulfill these objectives streamflow forecast tests have been proposed for three Brazilian river basins: Alto San Francisco, Doce, and Tocantins. The hydrological model MGB-IPH was applied to perform retroactive forecasts (*hindcastings*) within a period of tests forced by rainfall data from three different ensemble weather forecasting systems (ECMWF-pf, GEFs, and CPTEC-pf) and a deterministic prediction reference (ECMWF-fc), all available in the TIGGE archive. In general, the ensemble predictions, especially from ECMWF-pf and GEFs models, were superior in quality and persistence in comparison to the deterministic reference. And the use of the Super ensemble composed by the combination of the three ensemble models was shown to be among the results, and also a robust strategy. For a flood protection strategy, the analyzes indicate benefits in the consideration of the upper bounds of the ensembles, and for a reservoir operation strategy that vision could be more focused on average flow rates, which may contain some verified bias. The comparison between the basins results showed that one can not transport results and considerations from one location to another, despite being in the same climate region. Regarding uncertainties, it was noted that hydrological modeling amplifies the uncertainty in the forecasts, in some extent due to the large basin evolution of state variables. Anyway, it is believed that more investments in ensemble forecasting techniques and its applications shown to be a good way to make better use of forecasts.

**Keywords:** Hydrological forecasting, Ensemble forecasting, Hydrological Modeling.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	24
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	24
1.2. OBJETIVOS .....	28
1.2.1. Objetivo Geral .....	28
1.2.2. Objetivos Específicos.....	28
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	30
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	32
2.1. MÉTODOS DE PREVISÃO DE VAZÃO.....	32
2.1.1. Sistemas de previsão baseados em propagação de ondas de cheia .....	32
2.1.2. Sistemas de previsão baseados em modelos de transformação de chuva em vazão.....	34
2.1.3. Sistemas de previsão baseados em previsões quantitativas da precipitação.....	37
2.1.4. Previsões do tempo por Ensemble.....	39
2.1.5. Ensemble na hidrologia.....	45
2.2. USO DE PREVISÃO DE VAZÃO E O CENÁRIO BRASILEIRO .....	62
2.3. APRESENTAÇÃO DE PREVISÕES DE VAZÃO .....	66
2.4. VERIFICAÇÃO DE PREVISÕES HIDROLÓGICAS.....	68
2.5. MODELAGEM HIDROLÓGICA PARA PREVISÃO DE VAZÕES.....	77
2.5.1. Assimilação de Dados .....	77
2.5.2. O Modelo MGB-IPH .....	83
2.6. Comentários Finais Sobre a Revisão Bibliográfica .....	89
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	91
3.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	92
3.2. DADOS DE PREVISÃO METEOROLÓGICA .....	92
3.2.1. ECMWF-pf (ECMWF probabilístico, ou por ensemble) .....	93
3.2.2. ECMWF-fc (ECMWF determinístico) .....	94
3.2.3. GEFS (modelo ensemble do NCEP/NOAA).....	94
3.2.4. CPTEC-pf (CPTEC probabilístico, ou por ensemble) .....	95
3.2.5. Super Ensemble .....	96
3.3. PROCESSAMENTO DAS PREVISÕES DE CHUVA PARA USO NO MODELO HIDROLÓGICO ....	96
3.4. INTEGRAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DOS MODELOS E DADOS .....	97
3.5. RODADAS DAS PREVISÕES .....	98
3.6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS .....	99
<b>4. ESTUDOS DE CASO</b> .....	100
4.1. BACIA DO APROVEITAMENTO DE TRÊS MARIAS (ALTO RIO SÃO FRANCISCO) .....	100
4.1.1. Dados disponíveis.....	103
4.1.4. Calibração e verificação do modelo .....	104
4.1.4. Assimilação de Dados .....	108
4.1.5. Configuração do Experimento de Previsão.....	109
4.2. BACIA DO RIO DOCE .....	111
4.2.1. Dados disponíveis.....	113
4.2.3. Calibração e verificação do modelo .....	116
4.2.4. Assimilação de Dados .....	118
4.2.4. Configuração do Experimento de Previsão.....	119

4.3. BACIA DO RIO TOCANTINS ..... 120

4.3.1. Dados Disponíveis ..... 122

4.3.2. Calibração e verificação do modelo ..... 124

4.3.3. Assimilação de Dados ..... 126

4.3.4. Configuração do Experimento de Previsão ..... 127

5. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DAS PREVISÕES A VIESES NA PRECIPITAÇÃO PREVISTA ..... 129

5.1. BACIA DO ALTO SÃO FRANCISCO ..... 129

5.2. BACIA DO DOCE ..... 134

5.3. BACIA DO TOCANTINS ..... 138

6. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE CHUVA ..... 144

6.1. BACIA DO ALTO SÃO FRANCISCO ..... 145

6.1.1. Análise da climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles ..... 145

6.1.2. Erro Médio Absoluto ..... 147

6.1.3. Erro Médio Relativo ..... 150

6.1.4. Correlação (r) ..... 152

6.1.5. CRPS Médio ..... 155

6.1.6. Rank Histograms ..... 158

6.1.7. Brier Score (BS) ..... 160

6.1.8. Diagramas ROC ..... 161

6.1.9. *Reliability Diagrams* ..... 165

6.1.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do alto São Francisco ..... 169

6.2. BACIA DO RIO DOCE ..... 173

6.2.1. Análise da climatologia do desvio padrão dos ensembles ..... 173

6.2.2. Erro Médio Absoluto ..... 175

6.2.3. Erro Médio Relativo ..... 177

6.2.4. Correlação (r) ..... 180

6.2.5. CRPS Médio ..... 182

6.2.6. Rank Histograms ..... 184

6.2.7. Brier Score (BS) ..... 186

6.2.8. Diagramas ROC ..... 188

6.2.9. *Reliability Diagrams* ..... 191

6.2.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do Rio Doce ..... 195

6.3. BACIA DO RIO TOCANTINS ..... 198

6.3.1. Análise da climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles ..... 199

6.3.2. Erro Médio Absoluto ..... 200

6.3.3. Erro Médio Relativo ..... 203

6.3.4. Correlação (r) ..... 205

6.3.5. CRPS Médio ..... 207

6.3.6. Rank Histograms ..... 209

6.3.7. Brier Score (BS) ..... 211

6.3.8. Diagramas ROC ..... 212

6.3.9. *Reliability Diagrams* ..... 215

6.3.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do Rio Tocantins ..... 219

7. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE VAZÃO ..... 222

7.1. BACIA DO ALTO SÃO FRANCISCO ..... 222

7.1.1. Análises Visuais ..... 223

7.1.2. Análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles de vazão .....	234
7.1.3. Erro Médio Absoluto.....	236
7.1.4. Erro Médio Relativo.....	239
7.1.5. Correlação .....	241
7.1.6. CRPS Médio.....	244
7.1.7. Rank Histogram.....	246
7.1.8. Brier Score.....	249
7.1.9. Diagramas ROC.....	251
7.1.10. <i>Reliability Diagrams</i> .....	255
7.1.11. Forecast Convergence Score (FCS).....	259
7.1.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do alto São Francisco .....	260
7.1.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio São Francisco .....	264
7.2. BACIA DO RIO DOCE .....	267
7.2.1. Análises Visuais .....	267
7.2.2. Análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles de vazão .....	279
7.2.3. Erro Médio Absoluto.....	281
7.2.4. Erro Médio Relativo.....	283
7.2.5. Correlação .....	285
7.2.6. CRPS Médio.....	288
7.2.7. Rank Histogram.....	290
7.2.8. Brier Score.....	292
7.2.9. Diagramas ROC.....	294
7.2.10. <i>Reliability Diagrams</i> .....	298
7.2.11. Forecast Convergence Score (FCS).....	302
7.2.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do Rio Doce.....	303
7.2.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio Doce .....	308
7.3. BACIA DO RIO TOCANTINS.....	311
7.3.1. Análises Visuais .....	311
7.3.2. Análise do desvio padrão dos ensembles .....	322
7.3.3. Erro Médio Absoluto.....	323
7.3.4. Erro Médio Relativo.....	325
7.3.5. Correlação .....	327
7.3.6. CRPS Médio.....	329
7.3.7. Rank Histogram.....	331
7.3.8. Brier Score.....	333
7.3.9. Diagramas ROC.....	334
7.3.10. <i>Reliability Diagrams</i> .....	336
7.3.11. Forecast Convergence Score (FCS).....	339
7.3.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do Rio Tocantins ....	340
7.3.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio Tocantins ....	344
7.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS PARA AS TRÊS BACIAS DE ESTUDO DE CASO .....	345
7.5. DISCUSSÃO SOBRE A OPERACIONALIZAÇÃO DOS SISTEMAS PREVISÃO POR ENSEMBLE	348
8. CONCLUSÕES.....	351
8.1. RESPOSTAS DAS QUESTÕES LEVANTADAS.....	351
8.2. RECOMENDAÇÕES .....	361

<b>8.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>363</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>364</b>

## **ANEXOS**

**ANEXO A: Detalhes formas de apresentação de previsões.**

**ANEXO B: Detalhes sobre as métricas de avaliação da previsões.**

**ANEXO C: Documentação disponível no portal do TIGGE sobre os EPS utilizados neste trabalho.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Exemplo de como funciona um sistema de previsão baseado em propagação da onda de cheia. ....	33
Figura 2. Exemplo esquemático de previsão baseados em modelos de transformação de chuva em vazão. ....	35
Figura 3. Exemplo esquemático de sistema baseado em previsões quantitativas da precipitação. ....	38
Figura 4. Ilustração da forma como uma previsão determinística de uma variável meteorológica pode ser compreendida. ....	41
Figura 5. Ilustração de como uma previsão por ensemble de uma variável meteorológica feita a partir de múltiplas condições iniciais pode ser compreendida. ....	42
Figura 6. Exemplo esquemático de como uma previsão hidrológica por conjunto é realizada utilizando dados de previsão meteorológica por conjunta de chuva. ....	47
Figura 7. Exemplo de apresentação de resultado de uma previsão determinística. ....	67
Figura 8. Exemplo de um gráfico espagete com resultados de uma previsão por conjunto. ....	67
Figura 9. Representação esquemática do efeito da assimilação de dados sobre um hidrograma. Em “a” é apresentada uma previsão sem assimilação e em “b” é apresentada uma previsão com assimilação. ....	78
Figura 10. Ilustração das etapas de uma modelagem hidrológica onde a assimilação de dados pode ser aplicada. ....	80
Figura 11. Exemplo da utilização de um modelo ARMA(1,0), ou simplesmente AR1, com $\alpha_1 = 0,95$ para corrigir as saídas de uma previsão de vazão dada por QSIM usando as observações dadas por QOBS. ....	83
Figura 12. Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho. ....	91
Figura 13. Comparativo das quatro fontes de dados meteorológicos utilizadas para a região Sudeste do Brasil. ....	97
Figura 14. Localização da área de estudo e pontos de maior interesse para a previsão de vazões nesta bacia, que são a cidade de Pirapora e a UHE Três Marias. ....	101
Figura 15. Hidrograma da vazão afluente a Três Marias entre os anos de 2008 e 2009, calculado através do balanço hídrico e filtrado com uma média móvel de 12h. ....	102
Figura 16. Estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia do alto São Francisco. ....	103
Figura 17. Desempenho do modelo para a previsão de afluências de Três Marias com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de 2008 a 2010, com horizonte de previsão de cinco dias. ....	108
Figura 18. Localização da bacia do rio Doce, seus principais afluentes e localização da UHE Aimorés. ....	111
Figura 19. Série de vazões observadas afluentes à UHE Aimorés no período de testes: Julho de 2008 até Julho de 2013. ....	113
Figura 20. Estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia do rio Doce. ....	114

Figura 21. Desempenho do modelo para a previsão de afluências de Aimorés com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de 2008 a 2010, com horizonte de previsão de cinco dias. .... 118

Figura 22. Localização da bacia do rio Tocantins delimitada até a confluência com o rio Araguaia, seus principais afluentes e a localização das UHEs existentes na bacia. .... 120

Figura 23. Hidrograma da vazão afluente a UHE Estreito entre os anos de 2012 e 2014, com aplicação de filtro de média móvel de 12h para remoção do ruído. Valores menores do que zero representam falhas nos dados. .... 122

Figura 24. Postos fluviométricos existentes ..... 123

Figura 25. Desempenho do modelo para a previsão de afluências da UHE Estreito com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de Julho/2011 a Julho/2013, com horizonte de previsão de cinco dias. .... 127

Figura 26. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco. .... 130

Figura 27. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco. .... 130

Figura 28. Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco. .... 131

Figura 29. Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco. .... 131

Figura 30. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco. .... 132

Figura 31. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Doce. .... 134

Figura 32. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Doce. .... 135

Figura 33. Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Doce. .... 135

Figura 34. Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Doce. .... 136

Figura 35. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Doce. .... 136

Figura 36. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins. .... 139

Figura 37. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins. .... 139

Figura 38. Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins. .... 140

Figura 39. Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins. .... 140

Figura 40. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins. .... 141

Figura 41. Climatologia do desvio padrão das previsões de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. .... 146

Figura 42. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco. .... 148

Figura 43. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco. .... 148

Figura 44. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco. .... 148

Figura 45. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco. .... 150

Figura 46. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco. .... 151

Figura 47. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco. .... 151

Figura 48. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco. ....	153
Figura 49. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	153
Figura 50. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	153
Figura 51. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco. ....	156
Figura 52. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	156
Figura 53. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	156
Figura 54. Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	159
Figura 55. Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	159
Figura 56. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	160
Figura 57. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco. ....	161
Figura 58. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	162
Figura 59. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	163
Figura 60. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	167
Figura 61. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco. ....	168
Figura 62. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	174
Figura 63. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce. ....	175
Figura 64. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce. ....	175
Figura 65. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce. ....	176
Figura 66. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do rio Doce. ....	178
Figura 67. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do rio Doce. ....	178
Figura 68. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do rio Doce. ....	178
Figura 69. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce. ....	180
Figura 70. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce. ....	180
Figura 71. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce. ....	181
Figura 72. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce. ....	182

Figura 73. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce.....	182
Figura 74. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce.....	183
Figura 75. Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	185
Figura 76. Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	185
Figura 77. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce. ....	186
Figura 78. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce. ....	187
Figura 79. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.....	189
Figura 80. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.....	190
Figura 81. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	193
Figura 82. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	194
Figura 83. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de precipitação para a bacia do Rio Tocantins. ....	199
Figura 84. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins.....	201
Figura 85. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.....	201
Figura 86. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.....	201
Figura 87. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do rio Tocantins. ....	204
Figura 88. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do rio Tocantins. ....	204
Figura 89. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do rio Tocantins. ....	204
Figura 90. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins. ....	206
Figura 91. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins. ....	206
Figura 92. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins. ....	206
Figura 93. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins. ....	207
Figura 94. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins. ....	207
Figura 95. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins. ....	208
Figura 96. Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	210
Figura 97. Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	210



Figura 98. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.....	211
Figura 99. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.....	211
Figura 100. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins. ....	213
Figura 101. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce. ....	214
Figura 102. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.....	216
Figura 103. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.....	217
Figura 104. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 13/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	225
Figura 105. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 13/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	226
Figura 106. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 22/12/2010 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	229
Figura 107. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 22/12/2010 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	230
Figura 108. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 29/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	232
Figura 109. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 29/12/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1400m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	233
Figura 110. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Alto Rio São Francisco, no ponto da UHE Três Marias. ....	235
Figura 111. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados. ....	236
Figura 112. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando vazões maiores que 1400m <sup>3</sup> /s.....	237
Figura 113. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados. ....	239

Figura 114. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando vazões maiores que 1400m <sup>3</sup> /s.....	239
Figura 115. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados. ....	242
Figura 116. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando apenas com vazões maiores que 1400m <sup>3</sup> /s.....	242
Figura 117. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.....	244
Figura 118. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco apenas vazões maiores que 1400m <sup>3</sup> /s.....	244
Figura 119. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados. ....	247
Figura 120. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando apenas com vazões maiores que 1400m <sup>3</sup> /s.....	247
Figura 121. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de 1400m <sup>3</sup> /s.....	249
Figura 122. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de 2500m <sup>3</sup> /s.....	249
Figura 123. Resultados das curvas ROC com limiar de 1400m <sup>3</sup> /s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco. ....	252
Figura 124. Resultados das curvas ROC com limiar de 2500m <sup>3</sup> /s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco. ....	253
Figura 125. Reliability Diagram com limiar de 1400m <sup>3</sup> /s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.....	257
Figura 126. Reliability Diagram com limiar de 2500m <sup>3</sup> /s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.....	258
Figura 127. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de 1400m <sup>3</sup> /s.....	259
Figura 128. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 14/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	269
Figura 129. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 14/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.....	270
Figura 130. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....	273
Figura 131. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m <sup>3</sup> /s e 2500m <sup>3</sup> /s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.....	274
Figura 132. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 29/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A	

linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m<sup>3</sup>/s e 2500m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....276

Figura 133. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 29/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m<sup>3</sup>/s e 2500m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....277

Figura 134. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Rio Doce, no ponto da UHE Aimorés. ....279

Figura 135. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados. ....281

Figura 136. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s. ....281

Figura 137. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados. ....284

Figura 138. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s. ....284

Figura 139. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados. ....286

Figura 140. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando apenas com vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s. ....286

Figura 141. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados. ....288

Figura 142. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Doce apenas vazões maiores que 1600m<sup>3</sup>/s. ....288

Figura 143. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados. ....290

Figura 144. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando apenas com vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s. ....291

Figura 145. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s. ....292

Figura 146. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de 2500m<sup>3</sup>/s. ....293

Figura 147. Resultados das curvas ROC com limiar de 1600m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce. ....295

Figura 148. Resultados das curvas ROC com limiar de 2500m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce. ....296

Figura 149. Reliability Diagram com limiar de 1600m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce. ....300

Figura 150. Reliability Diagram com limiar de 2500m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce. ....301

Figura 151. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s. ....302

Figura 152. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 31/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....313

Figura 153. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 31/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....314

Figura 154. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 17/01/2013 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2012/2013. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....317

Figura 155. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....318

Figura 156. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 07/03/2014 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....320

Figura 157. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 07/03/2014 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble. ....321

Figura 158. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Rio Tocantins, no ponto da UHE Estreito. ....322

Figura 159. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados. ....324

Figura 160. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando vazões maiores que 7200m<sup>3</sup>/s. ....324

Figura 161. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados. ....326

Figura 162. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando vazões maiores que 7200m<sup>3</sup>/s. ....326

Figura 163. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados. ....327

Figura 164. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando apenas com vazões maiores que 7200m<sup>3</sup>/s. ....328

Figura 165. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados. ....329

Figura 166. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins apenas vazões maiores que 7200m<sup>3</sup>/s. ....329

Figura 167. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Tocantins considerando todos os dados. ....331

Figura 168. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando apenas com vazões maiores que 7200m<sup>3</sup>/s. ....332

Figura 169. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s. ....333

Figura 170. Resultados das curvas ROC com limiar de $7200\text{m}^3/\text{s}$ na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins. ....	335
Figura 171. Reliability Diagram com limiar de $7200\text{m}^3/\text{s}$ na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins. ....	338
Figura 172. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando o limiar de $7200\text{m}^3/\text{s}$ . ....	339

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Compilação de métricas usualmente aplicadas na verificação de previsões hidrometeorológicas (adaptada de Brown e Demargne (2013) e expandida pelo autor).....	71
Tabela 2. Métricas para avaliação de previsões de vazão utilizadas neste trabalho e organizadas segundo o usado em Brown <i>et al.</i> (2010). ....	73
Tabela 3. Postos telemétricos com dados horários de chuva e vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na região de estudo da bacia do rio São Francisco. ....	104
Tabela 4. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/12/2006 até 20/06/2011). ....	105
Tabela 5. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (19/06/2000 a 01/12/2006).....	107
Tabela 6. Postos telemétricos com dados horários de chuva e vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na região de estudo da bacia do rio Doce. ....	115
Tabela 7. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 15/07/2008 até 15/07/2013). ....	116
Tabela 8. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (15/07/2005 a 01/07/2008).....	117
Tabela 9. Características dos aproveitamento hidrelétricos na bacia do rio Tocantins. ....	121
Tabela 10. Pontos utilizados no modelo hidrológico. ....	124
Tabela 11. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/01/2008 até 09/05/2013). ....	125
Tabela 12. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (de 01/06/2013 até 01/06/2014). ....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS

AFFS: *African Flood Forecasting System*

ARMA: *Auto Regressive Moving Average*

BS: *Brier Score*

CEMADEN: Centro de Monitoramento de Desastres Naturais

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

CPTEC: Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

CRPS: *Continuous ranked Probability Score*

ECMWF: *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EFAS: *European Flood Alert System*

EMA: Erro Médio Absoluto

EMR: Erro Médio Relativo

EPS: Ensemble Prediction System

GEFS: *Global Ensemble Forecasting System* (modelo global de previsão por conjunto de previsão rodado no NCEP/NOAA).

GFS: Global Forecasting System (modelo global determinístico de previsão rodado no NCEP/NOAA).

GloFAS: *Global Flood Alert System*

HEPS ou H-EPS: Hydrological Ensemble Prediction System

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MCGA: Modelo de Circulação Geral Atmosférico (modelo meteorológico global rodado no CPTEC/INPE).

MCTI: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

MGB-IPH: Modelo de Grandes Bacias desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

NCEP: *National Centers for Environmental Prediction* dos Estados Unidos

NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration* dos Estados Unidos

NWP: *Numerical Weather Prediction* (previsão numérica do tempo)

ONS: Operador Nacional do Sistema

QPF: Quantitative Precipitation Forecast

ROC: *Realtive Operative Characteristic*

SACE: Sistema de Alerta Contra Enchentes operado pela CPRM.

SIN: Sistema Interligado Nacional

TIGGE :*THORPEX Interactive Grand Global Ensemble*

UHE: Usina Hidro Elétrica



# 1. Introdução

## 1.1. Contextualização

Uma previsão de vazão consiste na estimativa do escoamento em um determinado local de um curso de água com uma definida antecedência temporal. A utilização de um sistema operacional de previsão de vazão permite antecipar a ocorrência de eventos hidrológicos, apoiando a tomada de decisão e auxiliando na redução de impactos negativos associados.

De acordo com a antecedência com que previsões são realizadas elas podem ser definidas como de curto, médio ou longo prazo. A previsão é geralmente classificada como de curto e médio prazo quando o horizonte de previsão é de algumas horas até cerca de duas semanas (Tucci, 2005; Georgakakos e Krysztofowicz, 2001; Bravo *et al.*, 2009; Sene, 2010).

As previsões hidrológicas de curto e médio prazo, que são o foco deste trabalho, são uma componente chave de sistemas de alerta de cheias, que têm sido reconhecidos como uma das medidas mais efetivas de mitigação deste tipo de desastre natural (Alfieri *et al.*, 2012). As inundações figuram entre um dos tipos de desastres que causam maiores impactos em termos socioeconômicos em nível mundial (Moore *et al.*, 2005; Alfieri *et al.*, 2012), e os sistemas de alerta têm por objetivo prever cheias em pontos vulneráveis próximos de rios e emitir avisos aos responsáveis da defesa civil, à própria população residente, aos usuários de água, e aos operadores de obras hidráulicas na região afetada (Alfieri *et al.*, 2012; Moore *et al.*, 2005; Tachini, 2003).

No contexto Brasileiro, onde a geração hidroelétrica representa entre 70% e 80% da geração de energia elétrica do país (EPE, 2013), a previsão de curto e médio prazo de vazões afluentes a reservatórios é especialmente benéfica. Concomitante ao atendimento da demanda energética, o controle de cheias também faz parte do planejamento da operação das hidroelétricas que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), visando garantir a segurança estrutural das barragens e evitar impactos relacionados com cheias à jusante e à montante dos aproveitamentos. Neste sentido, existem várias restrições impostas à operação de hidroelétricas brasileiras (Kyrillos, 2006), que para serem cumpridas podem se fundamentar em previsões de vazão.

No Brasil, a operação normal dos reservatórios hidrelétricos é comandada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que faz a operação baseada em previsões de vazão de até 14 dias de antecedência (ONS, 2011a; 2011b; 2012a; 2012e; 2013a; 2013b; 2014; Zambon *et al.*, 2012, 2014a, 2014b; Costa *et al.*, 2014, Oliveira *et al.*, 2014). Contudo, em situações de cheias, a operação dos reservatórios é feita pelos agentes de geração locais, seguindo diretrizes estabelecidas pela ONS, onde a informação de previsões é útil para sustentar a tomada de decisão.

A principal forma de geração de previsões de vazão de curto e médio prazo com antecedências superiores ao tempo de concentração de uma bacia hidrográfica é a utilização de modelos hidrológicos com a inclusão de previsões de precipitação. Nestes termos, tradicionalmente utilizam-se informações de previsão de chuva providas de uma única fonte (uma única rodada de um modelo meteorológico), resultando em uma única trajetória possível para o futuro, o que caracteriza uma previsão determinística de vazão.

Estas previsões hidrológicas determinísticas com relativa frequência resultam em prognósticos de vazões futuras bastante distintas da realidade, já que o sistema de previsão de vazão contém diversas incertezas, como imperfeições nos modelos hidrológicos e meteorológicos, ou dados observados insuficientes.

Uma das principais incertezas neste procedimento está relacionada com as condições iniciais do modelo meteorológico utilizado, pois os modelos de previsão do tempo são bastante sensíveis às condições iniciais da atmosfera no momento em que são iniciados os cálculos da previsão, de tal forma que, se inicializados com condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco tempo simulam estados completamente diferentes da atmosfera (Lorenz, 1969). Mesmo que os modelos numéricos de previsão de tempo fossem perfeitos, esta dependência em relação às condições iniciais existiria, e pequenos erros na estimativa das condições iniciais poderiam levar a grandes erros na previsão.

Para lidar com este problema surgiu na meteorologia o conceito de previsão meteorológica por *ensemble*, ou por conjunto, que é uma técnica que procura explorar as incertezas associadas às condições iniciais e/ou deficiências na estrutura dos modelos meteorológicos (Georgakakos e Krzysztofowicz, 2001). Em uma previsão por conjunto, a partir de diferentes modelos meteorológicos ou de diferentes condições iniciais de um único modelo é gerado um conjunto de previsões, onde cada um dos membros do conjunto

---

representa uma possível trajetória dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão.

Recentemente, este conceito de incorporação de incertezas através de previsões por conjunto em curto e médio prazo vem também sendo adotado na hidrologia, principalmente através da aplicação de resultados de previsões por *ensemble* de variáveis meteorológicas em um modelo hidrológico tipo chuva-vazão para obter, da mesma forma, um conjunto de previsões de vazão (Cloke e Pappenberger, 2009).

Estas aplicações têm demonstrado benefícios em termos de qualidade de previsões, melhor entendimento das incertezas associadas aos prognósticos, melhores decisões operacionais, entre outros, no uso de previsões por conjunto em comparação com previsões determinísticas, o que inclusive tem motivado o desenvolvimento de diversos sistemas operacionais de previsão hidrológica por conjunto ao redor do mundo (Pappenberger *et al.*, 2013).

Todavia, apesar dos progressos recentes, existem ainda muitas questões pendentes relacionadas ao uso de previsões hidrológicas probabilísticas e sobre a necessidade do uso de abordagens que permitam avaliação da incerteza quanto à evolução de sistemas hídricos, importante para a análise de risco em sua operação.

Particularmente, pouco se sabe sobre o desempenho destas técnicas em grandes bacias tropicais, como no caso das bacias dos principais reservatórios hidrelétricos brasileiros, e quais poderiam ser seus reais benefícios em termos de qualidade e persistência de previsões de afluências para os mesmos.

Também, não existe um retrato claro sobre a suficiência das incertezas consideradas para emitir previsões com qualidade, sobre a necessidade de pré-processamento de variáveis, sobre o desempenho de sistemas com diferentes fontes de dados meteorológicos e se sua combinação pode ser vantajosa, sobre como a modelagem hidrológica de grande escala pode transformar as incertezas, entre diversas outras questões.

Esta Tese de Doutorado se insere neste cenário, onde é proposta uma investigação de benefícios em termos de qualidade, persistência, combinação de informações, transposição de resultados, e propagação de incertezas dentro da modelagem hidrológica. Estes relacionados com previsões hidrológicas por conjunto derivadas da consideração de incertezas em previsões meteorológicas para bacias hidrográficas tropicais de larga escala. Têm-se como

---

estudos de caso sistemas de previsão de vazão de três bacias hidrográficas brasileiras que poderiam se beneficiar de previsões para a antecipação de cheias e para a operação de reservatórios de usinas hidrelétricas.

A investigação foi organizada visando tentar responder algumas das questões existentes sobre a geração e os benefícios do uso de previsões por conjunto, e em comparação com o uso de previsões determinísticas. Estas questões são detalhadas nos objetivos do trabalho.

É desejado que os resultados aqui obtidos sirvam para subsidiar escolhas e orientar sobre possíveis caminhos a serem seguidos no desenvolvimento de sistemas de previsão de vazão em curto e médio prazo no território brasileiro. Pois, se acredita que esta seja uma das primeiras grandes investigações sobre previsões de vazão por conjunto para grandes bacias hidrográficas tropicais e que engloba também aspectos relacionados com a combinação de modelos, propagação de incertezas, e comparação e bacias.

---

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar aspectos relacionados com a qualidade e aplicabilidade de previsões de vazão por conjunto de curto e médio prazo para a antecipação de cheias e de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras.

Espera-se testar a hipótese de que o uso de previsões hidrológicas por ensemble traz benefícios em termos de qualidade dos resultados na comparação com previsões determinísticas em bacias tropicais de grande escala para previsões de curto e médio prazo.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

Para cumprir com o objetivo geral proposto são abordados os seguintes objetivos específicos na forma de questões científicas:

- Quais adaptações são necessárias para o acoplamento entre sistemas de previsão meteorológica por conjunto a um modelo hidrológico de grande escala, na forma de um sistema de previsão hidrológica por ensemble de curto e médio prazo? Seria o esforço empreendido para o desenvolvimento de um sistema e a necessidade computacional para a geração de previsões hidrológicas por conjunto uma barreira que pode dificultar a sua aplicação?
  - Como é o desempenho dos diferentes modelos meteorológicos disponibilizados pelos centros CPTEC/INPE, NCEP/NOAA e ECMWF aplicados na previsão de vazão nas bacias hidrográficas estudadas? Existem diferenças relevantes em seus desempenhos para previsão hidrológica que podem ser relacionadas com características como o número de membros do conjunto, resolução espacial do modelo, ou método de geração de condições iniciais?
  - Como é o desempenho de previsões hidrológicas por conjunto em comparação com previsões hidrológicas determinísticas em bacias hidrográficas tropicais de grande
-

---

escala, considerando as incertezas meteorológicas no horizonte de previsão, em termos de métricas de qualidade e consistência?

- Quão adequadas são as previsões por conjunto para auxiliar na antecipação da ocorrência de cheias e na redução de risco de violação de restrições operativas de reservatórios? O que precisa ser alterado na estrutura de interpretação das previsões por conjunto em comparação com as determinísticas neste caso?
  - Quão adequadas são as previsões por conjunto em termos de erros médios e de abrangência das observações dentro de seus espalhamentos, visando seu uso em procedimentos de operação de reservatórios? O que precisa ser alterado na estrutura de interpretação das previsões por conjunto em comparação com as determinísticas neste caso?
  - É possível obter melhores resultados com a combinação dos dados dos múltiplos modelos meteorológicos por conjunto na forma de um conjunto maior, que neste caso consideraria também as incertezas relacionadas com a estrutura dos modelos meteorológicos?
  - Como o desempenho e as incertezas verificadas na previsão de chuva nas grandes bacias hidrográficas se propagam através do modelo hidrológico? É possível generalizar o desempenho observado na chuva média da bacia como sendo também o esperado na vazão? São necessárias efetivamente análises de vazão para a verificação do desempenho esperado? Ou as análises de chuva somente são suficientes?
  - A consideração apenas da incerteza na previsão meteorológica é suficiente para um bom desempenho no curto e médio prazo? Outras incertezas nas previsões podem ser fontes de erro relevantes para serem consideradas neste tipo de aplicação?
  - Quais são as implicações dos resultados no contexto de iniciativas científicas internacionais como o HEPEX (*The Hydrological Ensemble Prediction Experiment*) e o TIGGE (*THORPEX Interactive Grand Global Ensemble*)?
-

### **1.3. Organização do Trabalho**

Para responder aos objetivos desta Tese foi proposto o desenvolvimento de uma série de experimentos de modelagem numérica relacionados com previsão de vazão por conjunto em algumas bacias hidrográficas brasileiras de grande escala. Estas bacias foram selecionadas previamente em função dos potenciais benefícios no uso de previsões para a antecipação de cheias e para a operação de reservatórios, e da disponibilidade de dados telemétricos para o desenvolvimento de sistemas de previsão de vazão experimentais.

O objetivo dos experimentos foi responder as questões investigadas nesta Tese. A metodologia usada e os resultados obtidos em cada uma das investigações conduzidas são apresentados nos capítulos deste texto.

No Capítulo 02 deste trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto de previsão de vazões e suas aplicações, o que são previsões hidrológicas por conjunto, e resultados de outros estudos recentes sobre o assunto. Também, no mesmo capítulo, são apresentadas metodologias utilizadas para a apresentação de previsões de vazão e de avaliação estatística de seus resultados. Estes conceitos foram utilizados nas investigações realizadas, e o seu entendimento é importante para compreender os resultados obtidos.

No Capítulo 03 é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, com detalhes sobre os procedimentos seguidos nos experimentos realizados, e como seus resultados foram avaliados.

No Capítulo 04 são apresentados os estudos de caso utilizados nesta investigação, acompanhados dos resultados obtidos para a calibração do modelo hidrológico para cada bacia estudada, e de detalhes dos experimentos de previsão exclusivos de cada uma das bacias.

No Capítulo 05 do trabalho são apresentados resultados para análises de sensibilidade das previsões de vazão em função da existência de vieses nas previsões de chuva nas bacias hidrográficas utilizadas como estudo de caso, e é feita uma análise crítica destes resultados.

No Capítulo 06 do trabalho são apresentados os resultados obtidos para as análises de previsão de chuva nas bacias hidrográficas utilizadas como estudo de caso, e é feita uma análise crítica destes resultados.

---

No Capítulo 07 são apresentados os resultados obtidos para as análises de previsões de vazão nas bacias hidrográficas utilizadas como estudo de caso, é feita uma discussão sobre os mesmos, são apresentadas as discussões relacionando os resultados de chuva com os de vazão, e as discussões de comparação entre bacias.

No Capítulo 08 são apresentadas as conclusões do trabalho, com as respostas para as perguntas propostas nos objetivos.

---



## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1. Métodos de Previsão de Vazão

A antecipação da condição de vazão em rios é muito valiosa para a mitigação de impactos negativos de eventos hidrológicos, pois permite a emissão de alertas, tomada de decisão de operação de obras hidráulicas, execução de planos de resposta a emergências, entre outras preparações.

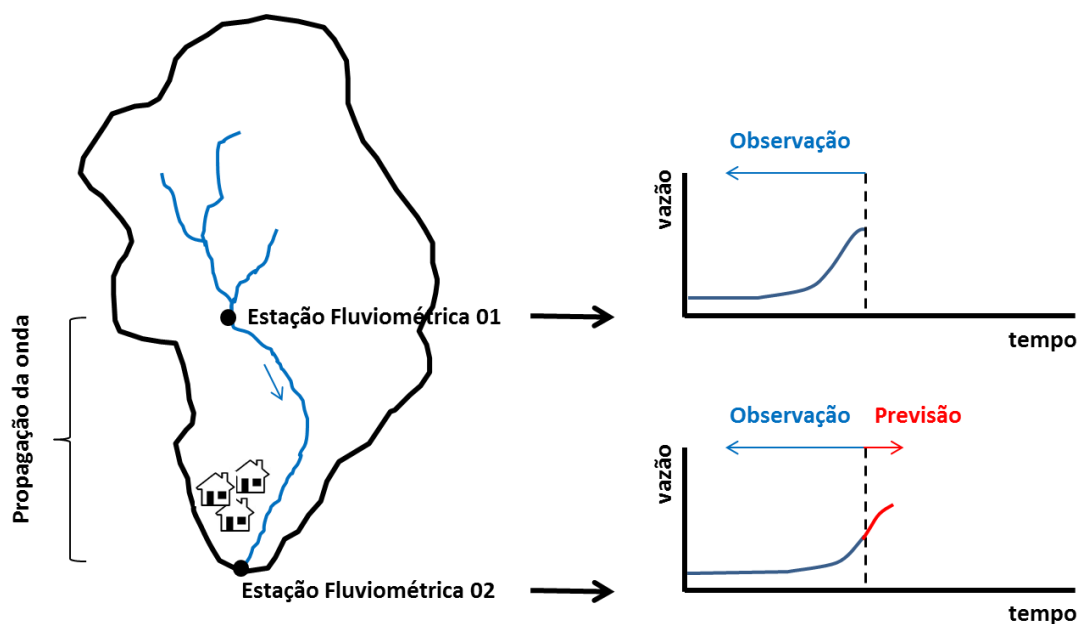
Para prover previsões de vazão acertadas e em tempo apropriado é necessário prever o comportamento de um sistema natural complexo, modificado por ações humanas, que é uma bacia hidrográfica. Além disso, as previsões devem ser feitas utilizando informações incompletas e incertas de variáveis hidrológicas (Pagano *et al.*, 2014).

Para cumprir com a tarefa de geração de previsões de vazão em tempo real, ou previsão em tempo atual, diversas metodologias foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Dependendo da escala da bacia, do tempo de deslocamento da onda de cheia, dos recursos disponíveis, e dos resultados necessários, a previsão de vazão pode ser feita utilizando metodologias baseadas em: (i) propagação de ondas de cheia; (ii) transformação de chuva em vazão; e (iii) transformação de chuva em vazão com informação adicional de previsão quantitativa de precipitação (Tucci e Collischonn, 2003; Sene, 2010).

Para cada uma destas técnicas é dada uma breve introdução nas seções a seguir.

#### 2.1.1. Sistemas de previsão baseados em propagação de ondas de cheia

Sistemas de previsão fundamentados na propagação de ondas de cheia são baseados na utilização de informações de variáveis hidrológicas medidas, nível ou vazão, em pontos localizados em rios a montante do ponto de interesse para previsão. A Figura 1 apresenta um exemplo esquemático deste tipo de previsão.



**Figura 1. Exemplo de como funciona um sistema de previsão baseado em propagação da onda de cheia.**

Na Figura 1 vemos um exemplo em que a onda de cheia que está sendo observada na Estação Fluviométrica 01 a montante é propagada para a Estação Fluviométrica 02 a jusante, onde se tem interesse na previsão de vazões por causa da população residente nas proximidades do rio.

A propagação da onda de cheia entre os pontos pode ser realizada utilizando modelos de regressão simples, modelos baseados em dados (como redes neurais artificiais), ou modelos de propagação de vazão baseados nas equações de Saint-Venant e suas simplificações (Tucci, 2005)

Este tipo de método de previsão tem sido utilizado com sucesso em grandes sistemas fluviais, como o rio Tocantins (Solomon *et al.*, 1986) e o rio São Francisco (Paiva e Acioli, 2007), onde boa parte da onda de cheia se forma na porção superior da bacia, e o tempo de viagem da onda de cheia até o ponto de interesse é relativamente longo (Tucuruí, no caso do rio Tocantins; e Sobradinho, no caso do rio São Francisco).

Muitos os sistemas de alerta de cheias operacionais no Brasil normalmente adotam este tipo de solução. Este é o caso, por exemplo, do sistema de previsão de cheias do rio Itajaí-SC (Pinheiro, 2003; Cordero *et al.*, 2011), do sistema de previsão do rio Doce-MG (Castilho e Oliveira, 2001; Castilho e Davis, 2003), e do sistema de alerta hidrológico na bacia do rio Caí-RS (Pedrollo *et al.*, 2011), estes dois últimos mantidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

A vantagem dos métodos de previsão baseados na propagação de cheias é que, em geral, apresentam os menores erros, porque dependem exclusivamente de variáveis que podem ser medidas com precisão relativamente alta, como o nível da água ou a vazão em seções transversais do rio localizadas a montante do ponto de interesse (Bartholomes e Todini, 2005).

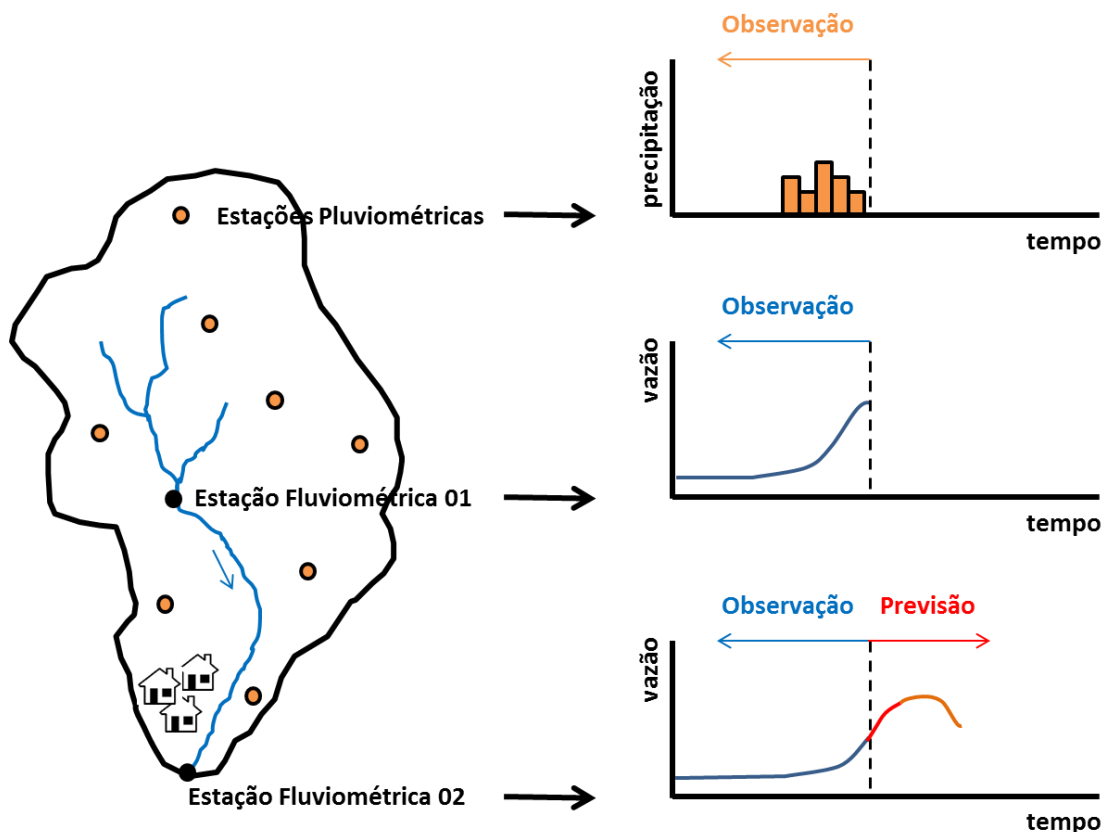
A principal desvantagem destes métodos, no entanto, é que a antecedência máxima em que é possível obter previsões úteis é limitada pelo tempo de viagem da onda de cheia ao longo do trecho entre os pontos de monitoramento a montante, e o ponto de interesse a jusante (Bartholomes e Todini, 2005). Em grandes rios, como o Tocantins e o São Francisco, este tempo de viagem pode ser de alguns dias, ou até mais de uma semana. Em rios menores, especialmente em regiões montanhosas, por outro lado, este tempo de viagem é de poucas horas. Por exemplo, no modelo de previsão de cheias do rio Itajaí, desenvolvido para a cidade de Rio do Sul por Cordero *et al.* (2011), o curto tempo de viagem da onda de cheia ao longo do rio limitou a antecedência das previsões ao máximo de 8 horas.

### **2.1.2. Sistemas de previsão baseados em modelos de transformação de chuva em vazão**

Para contornar a limitação dos sistemas baseados na propagação da onda de cheias podem ser incorporados nos sistemas de previsão dados de precipitação, medidos em postos pluviométricos com transmissão automática de dados, estimados por radar, ou estimados através de satélites.

A informação de chuva observada permite aumentar o horizonte nas previsões de vazão ao permitir considerar no sistema de previsão também a componente do ciclo hidrológico relacionada com geração do escoamento causada pela chuva na bacia (Bartholomes e Todini, 2005).

A Figura 2 apresenta um exemplo esquemático deste tipo de previsão, onde vemos um exemplo em que a vazão é prevista na localidade da Estação Fluviométrica 02 através de uma combinação da propagação da onda de cheia e vazão gerada pela chuva observada antes do início da previsão.



**Figura 2. Exemplo esquemático de previsão baseada em modelos de transformação de chuva em vazão.**

Uma das abordagens consagradas para obter essas previsões é a utilização de modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão conceituais ou de base física (Collischonn, 2001). Os modelos chuva-vazão procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, através de equações baseadas nos processos físicos envolvidos (Tucci, 2005).

A incorporação de dados de precipitação não é uma exclusividade do uso de modelos hidrológicos destes gêneros. Contudo, os modelos hidrológicos conceituais ou de base física fornecem resultados baseados em equações que tentam simular os processos físicos, e assim permitem a extrapolação das previsões para além do domínio dos dados observados com maior consistência metodológica, o que também é um benefício em relação aos métodos que utilizam somente a informação de vazão e estatísticas para a realização das previsões (Tucci, 2005; Sene, 2010).

Aqui cabe ressaltar que existem diferentes tipos de modelos hidrológicos de transformação chuva-vazão, o que também se reflete na forma como podem ser feitas as previsões. Se o modelo é do tipo concentrado, que representa uniformemente a bacia

hidrográfica, então as previsões são feitas apenas baseadas na chuva observada, e não usam os dados de vazão existentes em locais intermediários da bacia. Já se os modelos hidrológicos são do tipo distribuídos ou do tipo semi-distribuídos, que consideram etapas intermediárias do ciclo hidrológico na bacia, como a propagação de vazões, é possível também levar em conta os dados das vazões intermediárias observadas. Esta diferenciação é importante por que às vezes os sistemas de previsão que utilizam chuva são também subdivididos entre os que usam exclusivamente a chuva, e os que usam dados de chuva e vazão (Tucci, 2005; Meller, 2012).

Este tipo de método de previsão não é muito comum no Brasil em sistemas operacionais, embora vários trabalhos tenham avaliado sua efetividade (Brigido et al., 2009; Brun e Tucci, 2001; Bertoni *et al.*, 1992). Um dos principais obstáculos existentes no Brasil ao uso de modelos de transformação de chuva em vazão para a previsão de cheias é a baixa densidade dos postos pluviométricos com transmissão automática, e a baixa disponibilidade de dados de radares meteorológicos, o que afeta a estimativa da chuva média numa bacia e de sua distribuição espacial (Pinheiro, 2003; Andreolli *et al.*, 2004). Já em países com uma boa cobertura de estimativas de chuva por radar, este tipo de previsão é bastante utilizado (Moore *et al.*, 2005; Bremicker *et al.*, 2006).

A vantagem dos sistemas de previsão baseados em dados de precipitação, em relação aos sistemas baseados apenas em propagação, é que é possível aumentar a antecedência das previsões. O aumento da antecedência tende a ser proporcional ao tempo de concentração da bacia.

A desvantagem dos métodos baseados na transformação de chuva em vazão, em relação aos sistemas baseados apenas em propagação, é que a incerteza das previsões aumenta quando são incluídas as novas variáveis. Isto ocorre porque a modelagem de transformação de chuva em vazão usualmente apresenta mais erros do que a modelagem exclusiva da propagação, e porque a precipitação real que atinge a bacia pode ser apenas estimada de forma aproximada, e nunca é conhecida com total precisão (Andreolli *et al.*, 2004).

Além disso, dependendo do tempo de resposta, o ganho de antecedência nas previsões que pode ser obtido aplicando um modelo de transformação chuva-vazão apenas com chuva observada é relativamente pequeno, e pode não ser suficiente para as ações necessárias.

### 2.1.3. Sistemas de previsão baseados em previsões quantitativas da precipitação

Quando o tempo de antecedência desejado para um sistema de previsão é maior do que o tempo de concentração da bacia, aproximadamente, é importante considerar no modelo de previsão de cheias além da precipitação já ocorrida aquela que ainda pode ocorrer no futuro.

Assim, os sistemas de previsão baseados em previsões quantitativas da precipitação são necessários para estender o horizonte de previsão e superar a limitação dos modelos baseados apenas nas observações.

Os tipos de modelos a serem utilizados nestes casos são os mesmos utilizados em sistemas de previsão baseados na chuva observada, porém levando em conta os dados de chuva observados até o instante atual (momento em que se inicia a previsão), e mais os dados de chuva prevista a partir do instante atual até o final do horizonte da previsão (Habets *et al.*, 2004; Bremicker *et al.*, 2006; Price *et al.*, 2012).

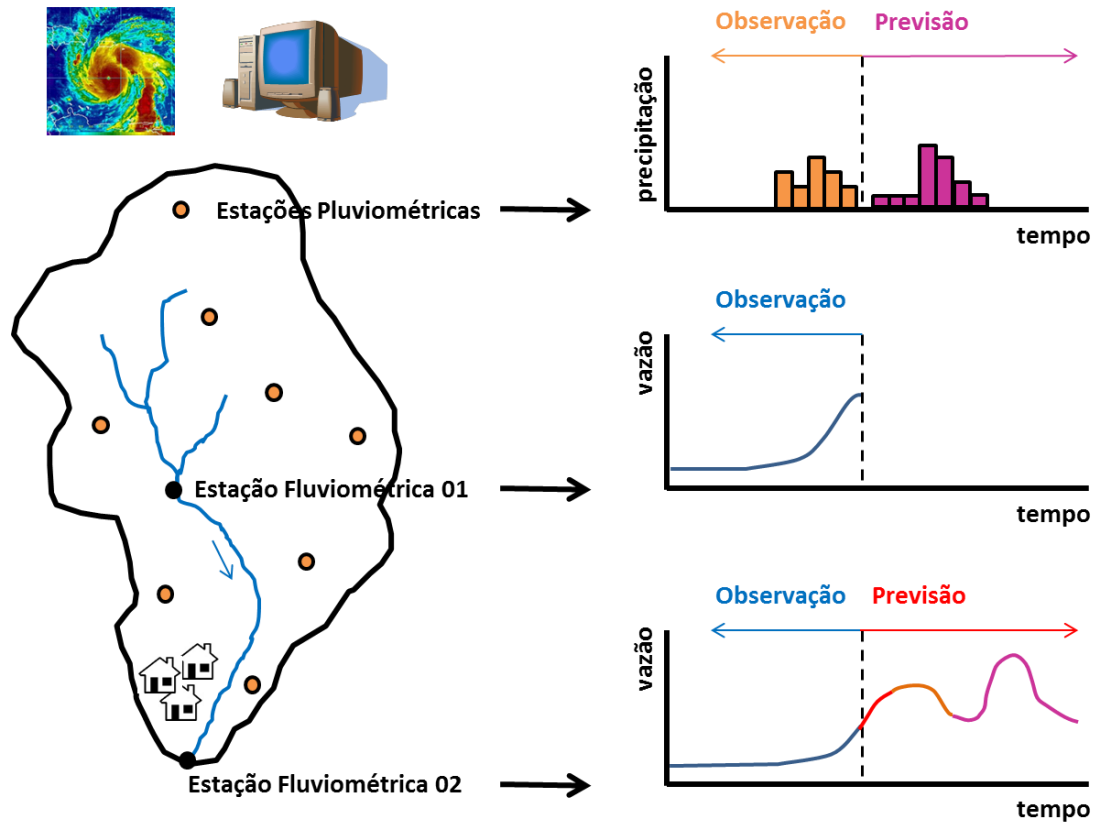
Esta chuva prevista é chamada de previsão quantitativa de precipitação, ou *quantitative precipitation forecast (QPF)*. A Figura 3 apresenta um exemplo esquemático de como funciona um sistema de previsão que utiliza também informações de QPF.

No exemplo da Figura 3 a vazão é prevista na localidade da Estação Fluviométrica 02 através de uma combinação da propagação da onda de cheia do posto Fluviométrico 01, chuva observada antes do início da previsão pela rede telemétrica, e chuva prevista no horizonte de previsão por um modelo meteorológico de previsão do tempo. Esta configuração pode ser obtida com a utilização de um modelo hidrológico distribuído, por exemplo.

As estimativas de chuva futura podem ser obtidas a partir da extrapolação dos padrões de chuva recentes, identificados por radar, a partir de uma técnica denominada “*nowcasting*”, que geralmente gera resultados com boa qualidade para antecedências de 12h à 24h (Vivoni *et al.*, 2006).

Outra forma de obter a previsão quantitativa de precipitação é a partir de modelos numéricos de previsão do tempo (Collier e Krzysztofowic, 2000; Cloke e Pappenberger, 2009). Este tipo de modelo meteorológico resolve equações complexas que descrevem a evolução da atmosfera para um determinado horizonte de previsão a partir de múltiplas variáveis meteorológicas (Collier e Krzysztofowic, 2000; Chou *et al.*, 2007; Pagano *et al.*,

2014). Uma previsão numérica do tempo feita com um modelo é geralmente abreviada como NWP, que significa *Numerical Weather Prediction*.



**Figura 3. Exemplo esquemático de sistema baseado em previsões quantitativas da precipitação.**

Os modelos meteorológicos utilizados podem ser classificados de acordo com a sua área de abrangência. Os modelos que simulam o tempo de todo o globo terrestre são chamados de modelos globais, e usualmente a sua resolução espacial é pouco detalhada, na ordem de dezenas de quilômetros, para permitir as simulações em tempo hábil.

Os modelos meteorológicos que simulam apenas uma região do globo, como somente a América do Sul, são chamados de modelos regionais, ou modelos de área limitada (Du *et al.*, 1997; Ramos da Silva *et al.*, 2009). Estes modelos usualmente possuem menor resolução espacial que os modelos globais, e geralmente isto permite que eles levem em conta em suas formulações processos que são representados de forma mais simplificada nos modelos globais, e uma descrição detalhada do terreno, como em termos de uso do solo e topografia. Como nestes modelos apenas uma parte do globo é simulada, é comum o uso de informações de modelos globais em suas condições de contorno.

As previsões de vazão que utilizam a previsão quantitativa de chuva tem a grande vantagem de permitir estender a antecedência da previsão hidrológica até pouco mais que o horizonte de previsão em que as QPF estão disponíveis. Este horizonte tipicamente varia entre 3 e 15 dias.

A principal desvantagem da utilização de previsões hidrológicas baseadas em previsões numéricas do tempo é que elas apresentam uma incerteza muito grande nestes horizontes maiores de previsão. A principal origem da incerteza neste caso é, em geral, a previsão de precipitação, e quanto maior é o horizonte de previsão, maior é a incerteza (Cuo *et al.*, 2011).

No Brasil, previsões quantitativas de precipitação baseadas em modelos meteorológicos tem se tornado cada vez mais utilizadas, visando a redução dos erros e a extensão da antecedência da previsão de vazões afluentes a reservatórios, tendo se tornado operacionais nos procedimentos de previsão do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e em sistemas de suporte a decisão para alguns reservatórios em caso de cheias (Chou *et al.*, 2007; Guilhon *et al.*, 2007; Castanharo *et al.*, 2007; Collischonn *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2007; Bravo *et al.*, 2008; Bravo *et al.*, 2009; Fan *et al.*, 2013).

No entanto, pode-se afirmar que nos sistemas de previsão para alerta de cheias brasileiros as previsões de precipitação ainda são pouco utilizadas. Possivelmente um dos motivos é a grande incerteza associada às previsões quantitativas de chuva obtidas com modelos numéricos de previsão do tempo, conforme discutido no próximo item.

#### **2.1.4. Previsões do tempo por Ensemble**

Conforme comentado, um dos principais problemas em previsões hidrológicas baseadas em informações de modelos meteorológicos é a grande incerteza existente nas previsões do tempo, onde os resultados de duas previsões meteorológicas feitas com uma diferença de horas podem variar significativamente (Buizza *et al.*, 1999; Mendonça, 2002; Cloke e Pappenberger, 2009; Vivoni *et al.*, 2006; Cuo *et al.*, 2011)

Isto acontece por que a solução do sistema de equações que descrevem os movimentos atmosféricos dentro de modelos meteorológicos de previsão do tempo é muito sensível às condições iniciais fornecidas no começo dos cálculos de integração. Ou seja, se os modelos meteorológicos são inicializados com condições iniciais ligeiramente diferentes, em pouco



tempo eles simulam estados completamente diferentes da atmosfera (Zhang *et al.*, 1999; Mendonça, 2002; Cuo *et al.*, 2011).

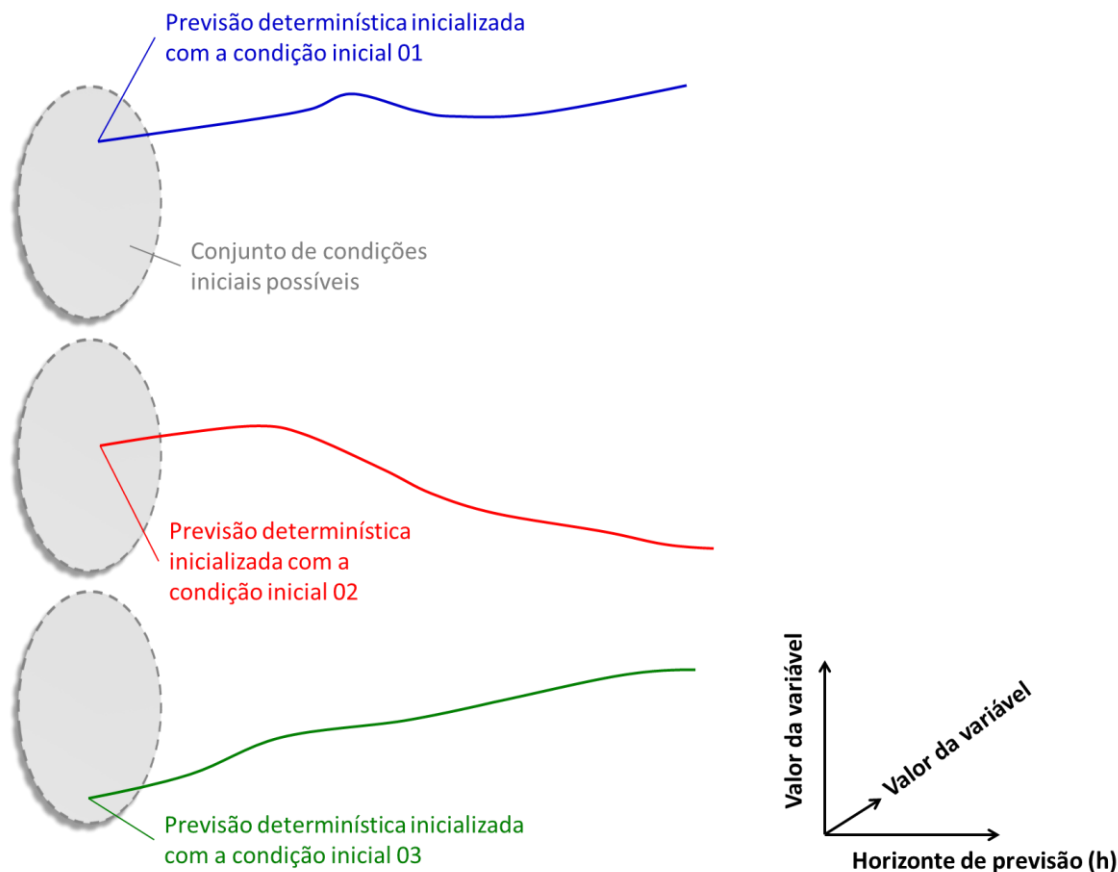
Esta dependência sensível em relação às condições iniciais foi observada pela primeira vez por Lorenz (1963, 1965, 1969). Ele foi o primeiro cientista a perceber a importância de tais fenômenos, que são atualmente chamados de "caóticos" devido a este comportamento irregular.

Ou seja, sabe-se que os modelos numéricos não conseguem reproduzir todos os fenômenos que influenciam a evolução das condições atmosféricas, o que já seria suficiente para limitar o prazo e a qualidade de previsões. Entretanto, esta descoberta mostrou que melhorar a capacidade dos modelos de previsão de tempo na descrição dos processos por si só não é suficiente para obter boas previsões, e que é necessário levar em conta também toda a incerteza associada com as observações utilizadas na geração da condição inicial da simulação (Buizza, 1997; Mendonça e Bonatti, 2002; Buizza *et al.*, 2008).

Em outras palavras, mesmo que os modelos meteorológicos de previsão do tempo fossem perfeitos, os erros inerentes às observações utilizadas no momento de geração da condição inicial poderiam levar a uma previsão irreal depois de alguns dias.

E esta verificação das condições iniciais exatas da atmosfera é uma tarefa praticamente impossível, por exemplo, conforme ponderado pelo próprio Lorenz (1969), é muito difícil sabermos em um dado instante de tempo como todas as borboletas do mundo estão batendo suas asas.

A Figura 4 mostra de forma ilustrativa como uma previsão determinística de uma variável meteorológica pode ser compreendida. Nela, utilizamos uma única condição inicial (a que acreditamos ser a mais correta possível) dentre um conjunto de condições iniciais que seriam possíveis. Isto resulta em uma única trajetória para a variável no horizonte de previsão. Contudo, se ela for iniciada com condição inicial ligeiramente diferente dentro do conjunto de possibilidades podemos ter resultados com trajetórias bem distintas na previsão.



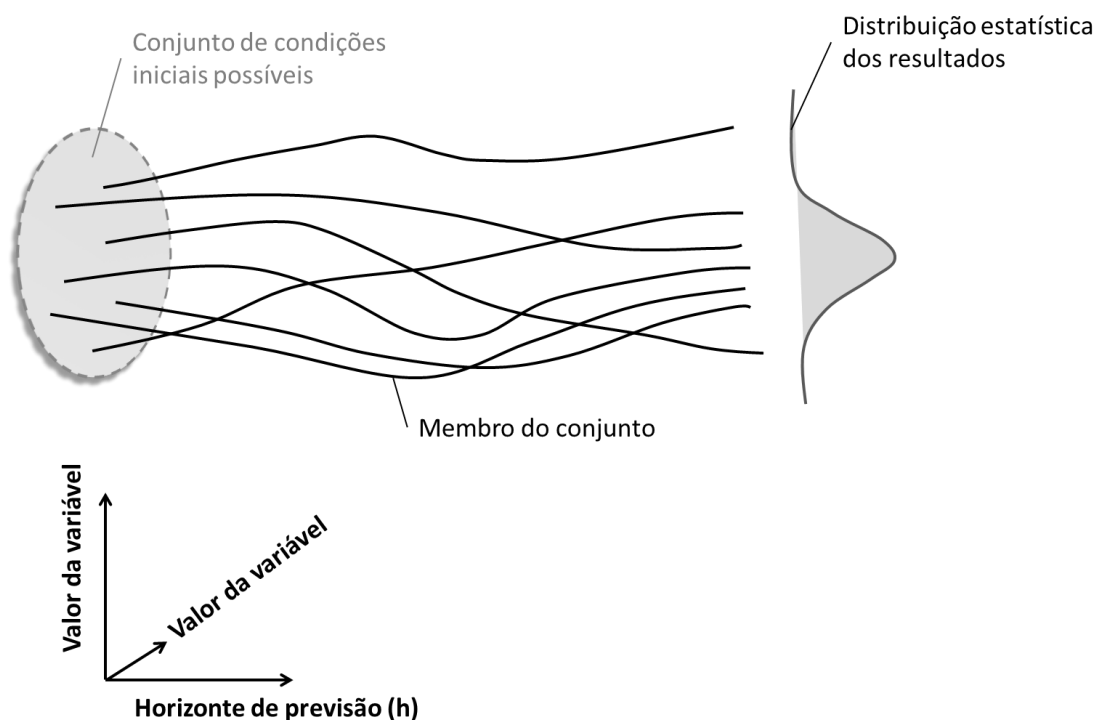
**Figura 4. Ilustração da forma como uma previsão determinística de uma variável meteorológica pode ser compreendida.**

Para contornar este problema, surgiu nas ciências atmosféricas o conceito de previsão por conjunto, ou por *ensemble* (nome em inglês, mas também utilizado na literatura em português), que procura explorar as incertezas associadas às condições iniciais e/ou deficiências dos modelos numéricos de previsão de tempo na forma de valor agregado para as previsões.

Em previsões por conjunto, a partir de diferentes modelos meteorológicos, diferentes parametrizações, ou de diferentes condições iniciais de um único modelo, são geradas várias previsões, denominadas "membros", onde cada um dos membros do conjunto representa uma possível trajetória dos processos atmosféricos ao longo do horizonte de previsão. A previsão probabilística ou por conjunto tem sido usada operacionalmente na previsão meteorológica desde a década de 1990 (Buizza *et al.*, 1999).

A Figura 5 mostra de forma ilustrativa como uma previsão por ensemble de uma variável meteorológica feita a partir de múltiplas condições iniciais pode ser compreendida. Nela, são usadas diversas condições iniciais (da forma que acreditamos ser a melhor amostra

possível) dentre um conjunto de condições iniciais que seriam possíveis. Ou seja, o modelo é rodado várias vezes, cada vez com uma condição inicial diferente. Isto resulta em um conjunto de trajetórias para a variável no horizonte de previsão.



**Figura 5. Ilustração de como uma previsão por ensemble de uma variável meteorológica feita a partir de múltiplas condições iniciais pode ser compreendida.**

As previsões por conjunto, ao contrário das previsões determinísticas, permitem uma interpretação mais ampla dos resultados previstos. Com elas teoricamente é possível fazer inferências sobre quais são as trajetórias mais prováveis da variável a partir da maior concentração dos membros, é possível estimar a probabilidade de ocorrência de eventos de interesse hidrológico (como a chuva total acima de um valor de referência), e é possível verificar qual é a predictabilidade da atmosfera a partir do espalhamento dos membros (Buizza, 2008).

Basicamente o que se busca com as previsões por ensemble é que a inclusão das incertezas na geração de resultados permita dizer que as melhores decisões possíveis estão sendo tomadas, ou de que as piores decisões não estão sendo tomadas.

Estas vantagens e o relativo sucesso do uso de previsão por conjunto motivou diversos centros de previsão meteorológica a adotar este tipo de metodologia, incluindo o Brasil (Buizza, 2008; Mendonça e Bonatti, 2002; Reis *et al.*, 2007; Mendonça e Bonatti, 2009)

No cenário internacional, o ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) foi um dos centros de previsão meteorológica pioneiros em desenvolver um sistema de previsão por ensemble, ou *Ensemble Prediction System* (EPS), operacional desde 1992 (Molteni *et al.*, 1996).

No EPS do ECMWF é utilizado um modelo meteorológico global e as incertezas nas condições iniciais são representadas através de um conjunto de 50 previsões rodadas a partir de estados um pouco diferentes da atmosfera, que são próximos da que é considerada a melhor estimativa das condições iniciais verdadeiras. Além disso, cada uma destas previsões é rodada utilizando uma pequena alteração na parametrização do modelo meteorológico, representando também a influência das incertezas do modelo nas previsões. Também é emitida uma previsão determinística utilizando a melhor estimativa considerada das condições iniciais e parametrização do modelo meteorológico, chamada de previsão controle (ou membro controle do conjunto).

Outro EPS operacional desde 1996 é o mantido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos (Hamil *et al.*, 2004; Hamil *et al.*, 2008; Hamill *et al.*, 2013; Gneiting *et al.*, 2005). O nome do modelo é GEFS (*Global Ensemble Forecasting System*). A configuração original do EPS do NCEP consiste no uso de um modelo meteorológico global GEFS para a geração de previsões com 23 membros a partir de condições iniciais perturbadas tendo como base a melhor estimativa considerada. Adicionalmente, também é emitida uma previsão controle de alta resolução usando as melhores condições iniciais consideradas, a esta previsão de controle chama-se GFS (*Global Forecasting System*).

Deste a sua implementação diversas pesquisas foram feitas com o GEFS visando melhorias, e recentemente o centro passou a emitir também previsões baseadas em uma nova configuração do modelo chamado de GEFS v2 (Hamill *et al.*, 2013) Esta nova versão possui 10 membros no conjunto, mais a previsão controle. Atualmente previsões com as duas versões do modelo podem ser acessadas através dos portais da NOAA na internet.

No Brasil, o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) opera desde 2001 um sistema de previsão global do tempo por ensemble. Este sistema de previsão teve origem no trabalho de Coutinho (1999), que demonstrou a possibilidade de aplicação da previsão de tempo global por ensemble com o modelo de circulação geral atmosférico (MCGA) do CPTEC, e seus potenciais benefícios para a previsão de curto e médio prazo para diversas regiões do globo, especialmente para a

América do Sul. Segundo o próprio CPTEC, Este trabalho pode ser considerado um avanço significativo dentro da meteorologia do Brasil (CPTEC, 2014).

O EPS baseado no MCGA do CPTEC possui 15 membros, sendo um de controle (a partir da condição inicial sem perturbações) e 14 a partir de análises perturbadas.

Também, recentemente o CPTEC tem feito avanços com a geração de previsões por conjunto utilizando o modelo regional Eta (Solman *et al.*, 2013; Bustamate e Chou, 2008). Dentre os produtos sendo testados neste sentido pode-se encontrar atualmente no portal de previsões numéricas do CPTEC (<http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/>) um ensemble com 3 dias de horizonte de previsão, 5km de resolução espacial, e que abrange o sul do Brasil. Outro produto é um ensemble com 5 dias de horizonte de previsão, 40km de resolução espacial, que abrange toda a América do Sul.

Ainda no Brasil, a FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) emprega operacionalmente um sistema de previsão por ensemble de chuva desde 2001, porém não em escala de curto e médio e médio prazo, mas sim mensal e sazonal. Esta previsão utiliza uma cascata de modelos. Dados de previsão climática gerados pelo modelo de circulação global ECHAN4.5 são utilizados para alimentar dois modelos regionais de clima, o Regional Spectral Model (RSM) e o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). Posteriormente, ainda, elas são interpoladas para uma grade de 10 km x 10km e utilizadas como dados de entrada de um modelo hidrológico concentrado, do tipo chuva-vazão, para gerar a previsão de aflúências em locais de interesse (Reis *et al.*, 2007).

Além destes centros citados, muitos outros centros de previsão meteorológica ao redor do mundo produzem operacionalmente previsões do tempo por ensemble, a maioria delas usando modelos globais. Dentre estes centros, pode-se destacar: *Canadian Meteorological Center (CMC)*, *United Kingdom Meteorological Office (UKMO)*, *Fleet Numerical Meteorological and Oceanography Center (FNMOC)*, *Meteo France*, *Japanese Meteorological Agency (JMA)*, *China Meteorological Agency (CMA)*, *German National Weather Service (DWD)* e *Korea Meteorological Agency (KMA)*. Todos estes diferentes EPS e suas respectivas performances para a previsão do tempo já foram alvo de avaliação por muitos trabalhos, por exemplo: Hamill *et al.* (2000), Wei and Toth (2003), Buizza *et al.* (2005), Bowler (2006), Wei *et al.* (2006, 2008), Leutbecher e Palmer (2008), Park *et al.* (2008), e Bougeault *et al.* (2010).

Dados de rodadas de alguns destes EPS estão disponíveis em períodos que começam partir de 2006-2008 até a atualidade através dos portais do projeto TIGGE (*THORPEX*

*Interactive Grand Global Ensemble*). Esta iniciativa, descrita por Bougeault *et al.* (2010) consistiu em um grande esforço para reunir uma base de dados de previsões por ensemble emitidas por diferentes centros ao redor do mundo de forma que eles ficassem acessíveis para a realização de pesquisas científicas. Atualmente o TIGGE conta com dados de EPS provenientes de cerca de 11 centros de previsão. Entre eles, estão disponíveis dados do EPS do CPTEC, do EPS do ECMWF, e do GEFS do NCEP/NOAA.

Os objetivos do TIGGE compreendem o entendimento mais aprofundado das contribuições de observações, condições iniciais, e aspectos estruturais para os erros em previsões, e permitir a investigação da combinação de ensembles. E com esta base de dados aberta espera-se acelerar o processo de desenvolvimento de modelos e sistemas de previsão. Além da descrição apresentada por Bougeault *et al.* (2010) o trabalho de Park *et al.* (2008) também trás um estudo interessante sobre o desempenho dos modelos disponíveis na base de dados para o hemisfério norte do globo terrestre.

Uma lista de publicações científicas que usam a base de dados do TIGGE é continuamente atualizada online desde 2005 e disponível no endereço: <http://tigge.ecmwf.int/references.html>. É válido ressaltar que não existe nenhuma publicação nesta lista com o uso da base de dados para a América do Sul.

### **2.1.5. Ensemble na hidrologia**

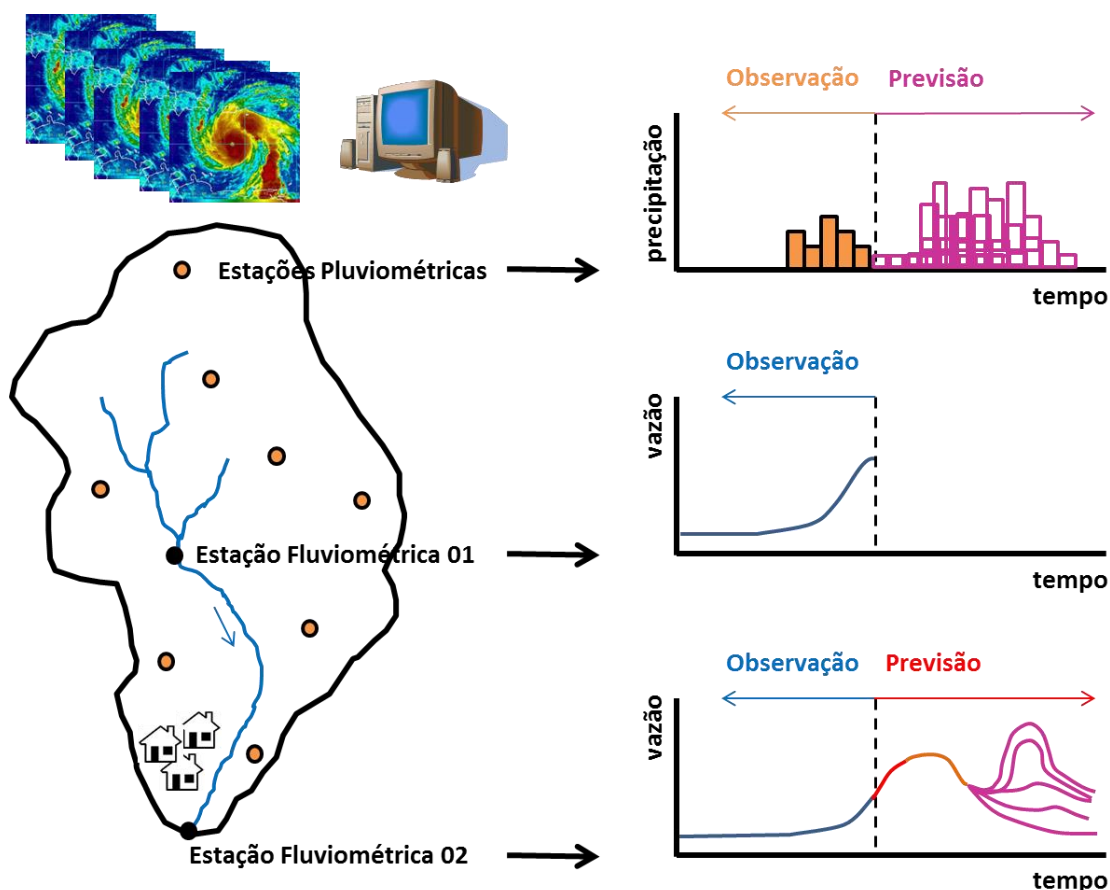
Motivado pelo sucesso da utilização de EPSs na meteorologia, ao longo dos últimos 15 anos começaram esforços de incorporação de ensembles nas metodologias de previsão de vazão, dando origem aos chamados sistemas de previsão hidrológica por ensemble, ou *Hydrologic Ensemble Prediction Systems* (HEPSs) (Demeritt *et al.*, 2007; Cloke e Pappenberger, 2009; Gouweleeuw *et al.*, 2005; Pietroniro *et al.*, 2007).

A estratégia adotada é reconhecer a incapacidade de prever com exatidão a quantidade de chuva que irá atingir uma bacia hidrográfica (e outras variáveis, como temperatura), e adotar uma postura de quantificação da incerteza da previsão através de um conjunto de cenários futuros para a vazão (Pappenberger e Brown, 2013). Basicamente, o que se deseja é dar um passo a mais no uso dos dados atmosféricos e aproveitar o conhecimento das incertezas nas variáveis meteorológicas para a geração dos possíveis cenários futuros de escoamento.

O objetivo de um HEPS (ou H-EPS) é fornecer informações sobre a incerteza das previsões hidrológicas, propondo, para cada intervalo de tempo de previsão, um conjunto de soluções a partir do qual se pode estimar a distribuição de probabilidade da variável prevista (Velázquez *et al.*, 2011).

Ainda, conforme comentado por Xuan *et al.* (2009), ao utilizarmos saídas de modelos de previsão numérica do tempo como entrada em modelos hidrológicos estamos aplicando operações de mudança de escala (como interpolação de dados de chuva) e propagando as incertezas através de sistemas não lineares (bacias hidrográficas), e assim estamos alterando elas de uma forma que não facilmente previsível. Por este motivo, na medida em que previsões do tempo por ensemble ficam disponíveis, é de especial interesse para o avanço da hidrologia a investigação do potencial e das implicações do uso de previsões por ensemble como entradas na modelagem hidrológica.

A Figura 6 apresenta um exemplo esquemático de como uma previsão hidrológica por conjunto é realizada utilizando dados de previsão meteorológica por conjunto de chuva. Nela, a vazão é prevista na localidade da Estação Fluviométrica 02 através de uma combinação da propagação da onda de cheia do posto Fluviométrico 01, chuva observada antes do início da previsão pela rede telemétrica, e chuva prevista no horizonte de previsão por um conjunto de previsões emitidas por um modelo meteorológico de previsão do tempo. Esta configuração pode ser obtida com a utilização de um modelo hidrológico distribuído e de dados de previsão de chuva provindos de um EPS, formando o chamado de H-EPS.



**Figura 6.** Exemplo esquemático de como uma previsão hidrológica por conjunto é realizada utilizando dados de previsão meteorológica por conjunta de chuva.

Recentemente, além da incerteza meteorológica, outras incertezas têm sido também agregadas em sistemas de previsão hidrológica por ensemble, como as incertezas na parametrização, nas condições iniciais, e na estrutura de modelos hidrológicos (Abebe e Price, 2003; Fraley e Raftery, 2010; Velázquez *et al.*, 2011; Franz e Hogue, 2011; He *et al.*, 2012; Demirel *et al.* 2013; Bourdin e Stull, 2013). Com isso, espera-se estar abrangendo nas previsões um maior número de fontes de erros. Embora, reconhecidamente a incerteza provinda da natureza caótica das previsões meteorológicas seja a mais importante de todas (Krzysztofowicz, R., 2001; Pappenberger *et al.*, 2005; Cloke e Pappenberger., 2009; Cuo *et al.*, 2011; Pappenberger *et al.*, 2011).

Um grande número de estudos de caso de avaliações do uso de previsões por conjunto pode ser encontrado na literatura científica recente. Uma boa revisão sobre o assunto foi apresentada por Cloke e Pappenberger (2009). A seguir, alguns destes estudos recentes sobre previsão de vazão por conjunto e seus principais resultados são descritos.



### 2.1.5.1. Estudos recentes de avaliação de previsões por ensemble

Um primeiro exemplo de pesquisa sobre o uso de previsões hidrológicas a partir previsões por ensemble de chuva é o trabalho de Rounin (2007). O autor avaliou o desempenho de um modelo hidrológico acoplado com as saídas do EPS do ECMWF para duas pequenas bacias hidrográficas na Bélgica. O autor fez análises estatísticas e uma análise utilizando um esquema de custos, e como resultado verificou que as previsões por ensemble tem melhor desempenho que alternativas determinísticas para a detecção da ocorrência de cheias, o que pode significar ganhos econômicos para usuários quando usado um limiar de probabilidade de ocorrência de eventos extremos adequado.

Em outro exemplo, os autores Olsson e Lindstrom (2007) fizeram uma avaliação de previsões diárias operacionais durante 18 meses para 45 pequenas bacias hidrográficas (tamanho médio de 647 km<sup>2</sup>) monitoradas pelo *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI), na Suécia. As previsões por ensemble foram geradas utilizando resultados do EPS do ECMWF para alimentar o modelo hidrológico HBV. Em uma primeira avaliação os autores notaram que as previsões continham um viés negativo na detecção de cheias, e falta de espalhamento no conjunto. Mas após a aplicação de uma técnica simples de ajuste e remoção de viés das previsões os resultados melhoraram, tornando as previsões apropriadas para a detecção de cheias. Os autores também remararam que a amostragem de outras incertezas, além da meteorológica, pode ser útil na melhora dos resultados, e que a resolução do modelo meteorológico pode ser inadequada para a área das bacias testadas.

No trabalho de Verbunt *et al.* (2007) é realizada a análise de um sistema de previsão por ensemble que utiliza as previsões do ECMWF (processadas por um esquema de *downscaling* chamado *Lokal Modell*) e o modelo hidrológico distribuído chamado PREVAH para a geração de previsões com 5 dias de antecedência. A área de estudo é a região alpina da bacia do rio Reno, com 34.550km<sup>2</sup>, na Europa. Foram estudadas duas cheias que ocorreram nos anos de 1999 e 2002 na região, onde previsões determinísticas resultaram em falhas. Enquanto isso, os resultados obtidos com a utilização de previsões por ensemble promoveram efetivamente indicações com da ocorrência da cheia. Os autores também mostraram análises de resultados viáveis reduzindo o número de membros do conjunto através de técnicas estatísticas.

Komma *et al.* (2007) realizaram uma investigação do desempenho de previsões por ensemble com 48h de antecedência para a bacia do rio Kamp (622km<sup>2</sup>) na Áustria. O

conjunto de dados usado na avaliação compreendeu cheias com 500 e 1000 anos de tempo de retorno. Foi utilizado um modelo hidrológico distribuído e dados de precipitação provindos do modelo meteorológico regional ALADIN e do modelo global do ECMWF. Como resultado, os autores verificaram que as incertezas nos horizontes de previsão mais distantes são ampliadas na medida em que se propagam no modelo hidrológico, enquanto que em horizontes de previsão mais curtos (até cerca de 12h) os resultados são pouco incertos, já que são mais dependentes de dados observados. Assumindo que todos os membros do conjunto são equiprováveis, a análise estatística dos resultados dos autores mostrou que o espalhamento do conjunto não poderia ser considerado adequado, e isso foi atribuído à consideração apenas das incertezas meteorológicas no sistema de previsão. Contudo, as análises relacionadas com identificação de eventos extremos empreendidas mostraram que o sistema de previsão por ensemble é um indicador útil para a antecipação de cheias em horizontes superiores às 12h.

Pappenberger *et al.* (2008) avaliaram o uso das previsões meteorológicas disponíveis na base de dados do TIGGE como entrada para o modelo hidrológico do EFAS - European Flood Alert System (Thielen *et al.*, 2009) para o estudo de caso de uma cheia que aconteceu em Outubro de 2007 na Romênia. Os resultados obtidos mostraram que um aviso sobre a cheia em questão poderia ter sido emitido com 8 dias de antecedência, e que previsões subsequentes seriam persistentes na emissão do aviso. Segundo os autores, esta avaliação para um evento ilustra o potencial da base de dados do TIGGE e de ensembles compostos por combinações de diversos EPS (Grand-ensembles) na redução do impacto socioeconômico de cheias.

Também trabalhando com o EFAS, Younis *et al.* (2008) avaliou o desempenho do sistema para a verificação da ocorrência de uma cheia na primavera de 2006 (março a abril), na porção tcheca da bacia do Rio Elba, com uma área total de 51.413km<sup>2</sup>. Nas previsões de vazões, o modelo hidrológico foi alimentado por três previsões meteorológicas - duas determinísticas providas pelo *German National Weather Service* (DWD) e uma por conjunto e pelo ECMWF (*European Center for Medium Range Weather Forecasting*). Os resultados indicaram que o EFAS foi capaz de detectar sinais da ocorrência do evento de cheia com 8 a 10 dias de antecedência. O valor agregado do uso de previsões por ensemble é ilustrado no trabalho através de mapas de probabilidade de excedência, diagramas que mostram a probabilidade de excedência de eventos extremos, e hidrogramas. No caso dos hidrogramas obtidos, apesar de terem previstos bem a superação da cota limite de inundação para o

principal período da inundação (entre 29 março e 8 abril de 2006), as previsões subestimaram os picos dos eventos e promoveram uma propagação mais rápida da onda de cheia do que aquela realmente observada.

Já no trabalho de Jaun e Ahrens (2009) os autores testaram um HEPS baseado em previsões meteorológicas do sistema COSMO-LEPS (Fundel *et al.*, 2009), um modelo regional com 10km de resolução para a Europa que utiliza como condições de contorno os resultados do ensemble do ECMWF. Na componente hidrológica os autores utilizaram o modelo distribuído PREVAH. O sistema foi testado para a bacia do alto Rio Reno, com uma área total de 34.550 km<sup>2</sup>, dividido em 23 subbacias com tamanhos entre 9.000 e 16.000km<sup>2</sup>, em um experimento de realização de previsões retroativas (*hindcasting*) para os anos de 2005 e 2006. Como resultado foi verificado que as previsões hidrológicas por ensemble cobriram as incertezas durante diferentes situações climáticas com espalhamento apropriado, e que elas mostraram-se superiores em desempenho na comparação com previsões determinísticas com base em métricas de avaliação.

No trabalho de Renner *et al.* (2009) os autores efetuaram uma análise de previsões por ensemble para a bacia do Rio Reno até a fronteira entre Holanda e Alemanha (160.000 km<sup>2</sup>). Foram utilizadas como entradas meteorológicas os dados do EPS global do ECMWF e do EPS regional COSMO-LEPS. O modelo hidrológico utilizado foi o HBV calibrado pelo SMHI. Os resultados foram avaliados através de medidas de desempenho e os autores verificaram que o sistema de previsão de vazão por ensemble apresenta desempenho superior que a climatologia para a realização de previsões, e que o EPS regional do COSMO-LEPS apresenta melhores resultados do que o uso do EPS global do ECMWF para múltiplos tamanhos de subbacias. Esta última constatação, segundo os autores, reforça a necessidade da elaboração de modelos de previsão do tempo regionais de alta resolução. Também, os autores destacam a importância da verificação de previsões por ensemble, uma vez que os seus usuários podem utilizar elas para definir seus níveis de confiança nos resultados.

Na pesquisa de Velázquez *et al.* (2009) os autores realizaram o primeiro ensaio de verificação do EPS do *Meteorological Service of Canada*, que consiste em um modelo global com resolução espacial de 100km e 20 membros, para a realização de previsões hidrológicas em cinco bacias hidrográficas no Canadá com áreas entre 355 e 5.820 km<sup>2</sup>. As análises foram feitas para um período de chuvoso de 2007 com 3h de passo de cálculo, 3 dias de horizonte de previsão, e com uma técnica de correção remoção de viés nas saídas do modelo hidrológico. Os resultados mostraram superioridade do ensemble na comparação com uma previsão

determinística em termos de erros, especialmente para as previsões com maior horizonte (72h). Também, foi verificada pouca dispersão do ensemble nos intervalos de tempo iniciais, o que foi atribuído ao fato da única fonte de incerteza usada no sistema ser a meteorológica.

Os autores Xuan *et al.* (2009) realizaram um estudo de previsão por ensemble em um pequena bacia hidrográfica (135km<sup>2</sup>), bem monitorada, do rio Blue, no sudoeste do Reino Unido. Os autores utilizaram o modelo hidrológico distribuído GBDM e previsões de chuva provindas do processamento de um modelo meteorológico regional que utiliza o ECMWF como condição de contorno. Dentre seus principais resultados, os autores destacaram que as previsões hidrológicas utilizando QPF foram muito similares aos resultados de previsões usando observações no horizonte de previsão, que o desempenho do sistema foi bom para diferentes condições climáticas, e que mesmo assim em alguns casos o viés das previsões foi significativo, existindo espaço para possíveis melhorias no sistema.

No trabalho de Bergh e Roulin (2010) é apresentado o H-EPS desenvolvido no *Royal Meteorological Institute* (RMI) da Bélgica para as bacias dos rios Meuse e Scheldt (na Europa, com áreas entre 590 e 2440km<sup>2</sup>) baseado no modelo hidrológico denominado SCHEME e em previsões do ECMWF, com 9 dias de antecedência. Os resultados do modelo foram avaliados para um experimento de *hindcasting* entre fevereiro de 2006 e março de 2009. Os autores concluíram que as previsões possuem um bom desempenho até o horizonte de previsão mais distante e que possui valor econômico agregado através de uma métrica específica de avaliação de perdas econômicas relativas com a detecção de cheias.

Em Velásquez *et al.* (2010) os autores investigaram o uso de múltiplos modelos hidrológicos, e de ensembles de variáveis atmosféricas (EPS do ECMWF), através de experimentos envolvendo o uso de 17 modelos hidrológicos concentrados para 1061 pequenas bacias de cabeceira na França. Os resultados mostraram que as previsões com o ensemble de modelos hidrológicos, apesar de algumas imperfeições, tem vantagem sobre o uso de previsões com apenas um modelo em termos de medidas de desempenho.

Thiemig *et al.* (2010) avaliaram a viabilidade da condução de previsões por ensemble com até 10 dias de horizonte de previsão em dois locais no leste da África, em um local na bacia do rio Juba (166.000 km<sup>2</sup>) e outro na bacia do rio Shabelle (207.000km<sup>2</sup>). Basicamente o experimento consistiu em reproduzir a tecnologia do sistema EFAS (Thielen *et al.*, 2009) para as bacias Africanas, e verificar o resultado de previsões por conjunto utilizando o EPS do ECMWF. Segundo os autores, os resultados obtidos mostraram que o sistema de previsão

desenvolvido foi capaz de prever cerca de 85% dos casos de cheia avaliados com boa acurácia e antecedência.

Em He *et al.* (2010) os autores testaram o uso da base de dados do TIGGE para previsões de cheias de Julho-Setembro de 2008 na bacia do alto rio Huai (30672km<sup>2</sup>), localizada na região centro-oeste da China. Segundo os autores, os resultados foram previsões satisfatórias, dando um sinal claro da ocorrência da cheias com até dez dias de antecedência.

No trabalho de Bao *et al.* (2011) os autores também utilizaram a base de dados do TIGGE para rodar previsões por conjunto. A partir de dados de cinco EPS presentes na base do TIGGE (CMC,CMA, ECWMF, UKMO, NCEP) acopladas com o modelo distribuído chamado Grid-Xinjiang. Foram testadas previsões de um evento de cheia durante o mês de julho de 2007 na bacia do Rio Xixian (8.826km<sup>2</sup>), na China. As previsões de cheia com o modelo foram realizadas com intervalo de tempo de 6h e horizonte de 10 dias. Os resultados obtidos demonstram que os dados do TIGGE acoplados ao modelo hidrológico são uma ferramenta promissora na emissão de alertas de cheia, promovendo previsões de vazões comparáveis à vazão observada em termos de desempenho. Os autores descrevem ainda que o uso simultâneo de todos os EPSs que compõem o TIGGE nem sempre apresentou melhor desempenho nas previsões de cheia do que o modelo alimentado por um único EPS.

No trabalho de Addor *et al.* (2011) é mostrada uma avaliação do H-EPS para a bacia do rio Sihl (336 km<sup>2</sup>), que flui através de Zurique (Suíça) e está operacional desde 2008. Foram utilizados dados do modelo meteorológico regional determinístico COSMO-7 e do probabilístico COSMOLEPS como forçantes de um modelo hidrológico. Os resultados de diversas métricas usadas pelos autores indicaram benefícios no uso das previsões por ensemble. Também os autores verificaram que os dois principais eventos chuvosos na bacia durante o período de avaliação foram em geral subestimados.

Focados em avaliar um evento específico de cheia, Boucher et al (2011) avaliaram previsões para a bacia do rio Gatineau (26.785 km<sup>2</sup>) no Canadá. Foram utilizadas previsões de dois modelos, o SEF (regional) e o GEM (global), ambas emitidas pela agência ambiental do Canadá, com 8 membros e mais uma previsão de controle cada, como entrada do modelo hidrológico HYDROTEL. Os autores concluíram que com a utilização de algum pós-processamento as previsões por ensemble são superiores as previsões determinísticas, mesmo as previsões determinísticas tendo uma resolução espacial maior.

Na pesquisa de Verdake e Werner (2011) os autores buscaram avaliar quais são os benefícios de sistemas de previsão por ensemble para a estimativa da ocorrência de cheias. O

estudo de caso é feito para a bacia *White Cart Water* (106 km<sup>2</sup>) na Escócia. Como principais conclusões os autores verificaram que a utilização de previsões probabilísticas combinadas com uma regra adequada de emissão de alarmes, mesmo que o sistema seja imperfeito, permitem resultados com melhor desempenho que previsões determinísticas. Também, os autores remarcam que o horizonte de previsão ótimo não é sempre exatamente o maior horizonte de previsão que um sistema pode prover, mas sim que ele é uma função da função de benefícios e custos local e da incerteza das previsões.

No trabalho de Schellekens *et al.* (2011) os autores avaliaram o desempenho do uso do EPS regional chamado MOGREPS (*Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System*) para a previsão de cheias na bacia do Rio Tâmis, no Reino Unido. A versão do MOGREPS utilizada possui 24 membros, resolução de 24 km e horizonte de previsão de três dias. O modelo hidrológico utilizado foi o TCM (*Thames Catchment Model*), com um procedimento de correção de saídas. Como conclusões os autores citaram que as previsões de precipitação por conjunto do MOGREPS resultaram em boas previsões de cheia em toda a região do Tâmis, mostrando benefício em relação ao uso de previsões determinísticas. A frequência de alarmes falsos no período avaliado foi baixa e eventos menores, abaixo dos limites de alerta, também foram bem previstos.

Como um dos primeiros estudos que avaliaram o uso de previsões por ensemble para a operação de reservatórios em tempo real, Zhao *et al.* (2011) apresentaram através de um estudo de caso hipotético a comparação entre o benefício do uso de previsões por conjunto e de previsões determinísticas. Os autores verificaram que a informação da incerteza nas previsões impacta significativamente a operação. Os autores chegaram ao resultado de que o uso de previsões por ensemble resulta na operação do reservatório quase com a mesma eficiência do uso de previsões perfeitas, o que foi melhor que o uso de previsões determinísticas.

Randrianasolo *et al.* (2011) focaram suas pesquisas na previsão por ensemble para pequenas bacias sem dados, na França. Baseadas na calibração e na assimilação de dados de bacias vizinhas.

No trabalho de Boucher *et al.* (2012) os autores também fizeram uma avaliação do uso de previsões por ensemble para a operação de reservatórios. Eles empregaram uma ferramenta de suporte a decisão para simular a produção de hidroeletricidade durante um evento de cheia na bacia do Rio Gatineau no Canadá, o mesmo apresentado em Boucher *et al.* (2011). Os resultados do trabalho mostraram que é possível obter melhores resultados de operação do

reservatório durante uma cheia através da utilização de previsões por ensemble. Contudo, também ficou claro que o desempenho das previsões por ensemble também depende da qualidade das previsões, que nem sempre foram melhores que as determinísticas. Adicionalmente, os resultados da análise estatística de previsões feitas pelos autores não foram compatíveis com os resultados de operação do reservatório em termos de qual é o melhor sistema. Os autores conjecturaram que talvez as métricas de análise de desempenho não sejam suficientes para ditar completamente sobre a utilidade de previsões em questões operacionais, por que talvez elas não consigam captar toda a complexidade destes tipos de problemas.

Na pesquisa apresentada por Zhao *et al.* (2012), os autores apresentaram uma avaliação de previsões de cheias por conjunto na bacia do Rio Huaine (China), também utilizando dados da base do TIGGE. Foram avaliados três EPS meteorológicos: *European Center for Medium Range Weather Forecasting-ECMWF* (51 membros), *US National Centers for Environmental Prediction-NCEP* (21 membros) e do *Canadian Meteorological Centre-CMA* (15 membros). Também foi usada uma previsão determinística do *German National Weather Service (DWD)*. O modelo hidrológico utilizado foi o *three-layer variable infiltration capacity (VIC-3L)*. Os resultados mostraram que o desempenho das previsões por conjunto considerando individualmente cada EPS foi superior ao da previsão determinística, especialmente nas previsões com o horizonte mais distante de 72h. Entre os três EPSs utilizados nas previsões de cheia, o do ECMWF apresentou os melhores resultados. Outro resultado interessante foi que a previsão que utiliza os membros de todos os EPSs foi melhor que qualquer um dos EPSs considerados individualmente. Os autores também destacaram que a previsão da ascensão dos hidrogramas em geral foi melhor que a previsão da recessão.

Em Bourdin e Stull (2013) os autores apresentam um estudo de previsões de vazões afluentes a um reservatório de usina hidrelétrica na bacia do rio Cheakamus (721km<sup>2</sup>) no Canadá. O sistema de previsão utilizado contou com NWP de múltiplos modelos meteorológicos ligados a múltiplos modelos hidrológicos através de diferentes esquemas de *downscaling*. Cada um dos modelos hidrológicos utilizados foi rodado com diferentes condições iniciais e com vários conjuntos de parâmetros considerados ótimos. Além disso, cada membro do conjunto gerado passou por um processo de remoção de viés. O grande objetivo de um sistema de previsão tão complexo foi amostrar todas as incertezas possíveis do processo, e incluí-las nos resultados. Os autores concluíram que a inclusão de todas as

incertezas aumentou a resolução e a capacidade de discriminação de eventos do sistema, e que a remoção de viés permitiu utilizar o máximo potencial do sistema.

No trabalho de Demirel *et al.* (2013) também foi estudado qual o efeito da incerteza do modelo hidrológico, seus parâmetros, seus dados de entrada, e suas condições iniciais para a geração de previsões por ensemble. Os autores geraram previsões com 10 dias de antecedência para o rio Moselle (27.262 km<sup>2</sup>) na Europa. Foram utilizados dois modelos hidrológicos (GR4J e HBV) cujos parâmetros usados foram estimados através do método *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE). O resultado do estudo mostrou que as incertezas nos parâmetros do modelo hidrológico foram as mais importantes para a geração do conjunto, e que as incertezas nos dados de entrada foram menos importantes e tiveram menos efeito nas previsões. O objetivo do sistema era prever vazões baixas.

Em Regonda *et al.* (2013) os autores propuseram uma medida diferente para a geração de previsões de vazão por conjunto. Os autores avaliaram a utilização de métodos estatísticos para a geração de ensembles a partir de previsões determinísticas produzidas operacionalmente pelo U.S. *National Weather Service* (NWS) *River Forecast Centers* (RFCs). Os resultados dos autores indicaram que as previsões geradas desta forma são confiáveis, exceto para bacias muito pequenas dentro da área de estudo.

Mais recentemente, Alfieri *et al.* (2014) apresentaram uma avaliação completa das previsões de vazão advindas do EFAS para vários locais da Europa. Segundo os autores, as métricas de desempenho mostraram que as previsões possuem destreza para médias e pequenas bacias da região com até dez dias de antecedência. E para bacias menores e montanhosas os resultados ainda não são muito adequados.

Os autores Silvestro e Rebora (2014), também recentemente, apresentaram um estudo que consistiu em uma série de experimentos sintéticos de previsão de vazão visando avaliar não somente a incerteza na previsão meteorológica, mas também a incerteza nas condições iniciais de umidade do solo e no tamanho do ensemble para pequenas e médias bacias (entre 10 e 10.000km<sup>2</sup> segundo os autores). Como conclusões, eles inferiram que estas características podem afetar significativamente as previsões, mas que isto é sempre dependente de uma série de fatores além dos analisados. Como as características do evento testado.

O trabalho de Bennett *et al.* (2014) apresenta um sistema de previsão denominado SCHEF (*System for Continuous Hydrological Ensemble Forecasting*), capaz de gerar previsões de vazão por ensemble com até 9 dias de horizonte de previsão, e que é a nova



ferramenta básica de simulação a ser usada pelo *Australian Bureau of Meteorology*. Segundo os autores, as previsões são particularmente boas entre 1 e 6 dias de horizonte, e que a quantificação das incertezas é melhor nos maiores horizontes de previsão.

E Zhao e Zhao (2014) apresentam em sua pesquisa técnicas de combinação de previsões por ensemble de curto e de médio prazo e seu uso em modelos de otimização.

#### **2.1.5.2. Estudos recentes de avaliação de previsões por ensemble no Brasil**

Todos estes trabalhos discutidos se concentraram em pesquisas realizadas na Europa, América do Norte, China, Austrália, e África. No Brasil, e em toda a América do Sul de uma forma geral, as pesquisas envolvendo previsões de vazão por conjunto com curto e médio prazo podem ser classificadas como incipientes.

Os primeiros esforços, bastante preliminares, de geração de previsões hidrológicas por conjunto para bacias brasileiras podem ser encontrados nos trabalhos de Calvetti (2011), Calvetti *et al.* (2013), e Calvetti e Pereira Filho (2014). Neles, os autores apresentam a geração de previsões meteorológicas utilizando 10 diferentes composições de processos de microfísica e convecção do modelo meteorológico WRF. Estes dados foram então usados como entradas no modelo hidrológico TopModel, preparado para a simulação da bacia do rio Iguaçu até União da Vitória (24.000km<sup>2</sup>), no Estado do Paraná. O horizonte de previsão foi, em geral, de 120h. A avaliação das previsões foi realizada para alguns eventos de cheia entre os anos de 2005 e 2009, fazendo uso principalmente de verificações visuais e de medidas de desempenho simples como erros no tempo e na magnitude das vazões de pico dos hidrogramas. Os autores inferiram que os erros do conjunto médio foram menores que cada uma das previsões determinística individualmente, mostrando a vantagem da previsão por conjunto sobre as determinísticas.

Recentemente, foram apresentados por Meller (2012), Collischonn *et al.* (2013), e Meller *et al.* (2014) resultados de análises de previsão de vazão por conjunto de curto prazo tendo como estudo de caso uma bacia de médio porte localizada na região sudeste do Brasil, a bacia do Rio Paraopeba (12.150 km<sup>2</sup>). Estes estudos podem ser considerados os mais completos atualmente existentes sobre o tema relacionado com estudos de caso locais.

Nestes trabalhos a metodologia utilizada para a geração de previsões por conjunto consistiu no uso de previsões de precipitação constantes na base de dados do Laboratório de

Meteorologia Aplicada a Sistemas Regionais de Tempo (MASTER-IAG/USP), associada à modelagem chuva-vazão com o modelo hidrológico MGB-IPH. A antecedência das previsões foi de 72h (3 dias). Os experimentos foram realizados durante três períodos chuvosos entre os anos de 2008 e 2011.

Como parâmetro de referência na avaliação do desempenho das previsões por conjunto foi utilizada uma previsão hidrológica determinística, baseada em uma previsão de precipitação única obtida da combinação ótima de diversas saídas de modelos meteorológicos, com diferentes condições iniciais e parametrizações.

O principal resultado das investigações foi que, para as previsões de eventos do tipo dicótomos, que consideram a superação ou não de níveis ou vazões limite de alerta, as previsões por conjunto mostraram superioridade em relação à previsão determinística, sendo possível obter na maior parte dos casos analisados um aumento na proporção de detecções corretas da ocorrência do evento de cheia mantendo as taxas de alarmes falsos em níveis reduzidos. Esse benefício foi, de modo geral, maior em maiores antecedências e maiores vazões limite de alerta, situações mais importantes num contexto de prevenção de cheias.

Nas conclusões é discutido que a utilização da abordagem probabilística são promissoras para a detecção e antecipação de cheias, apresentando benefício sobre previsões determinísticas. E que possíveis linhas de investigação que surgem como perspectiva futura são:

- avaliação de abordagens que considerem outras fontes de incerteza nas previsões de cheia por conjunto, tais como incertezas nas condições iniciais do modelo hidrológico ou em sua estrutura/parâmetros, ou ainda o uso de métodos para correção de erros sistemáticos e do espalhamento do conjunto nos dados de entrada (e.g. previsões de precipitação) ou nos resultados da previsão de vazões;
- avaliação de Sistemas de Previsão por Conjunto (EPSs) que possuam maior resolução temporal/espacial e com um maior número de membros.
- investigação dos benefícios associados ao uso das previsões de cheia por conjunto na otimização da operação de reservatórios

### 2.1.5.3. *Resumo dos benefícios atualmente considerados para a previsão por Ensemble*

Todos os trabalhos citados como exemplo, e mais outras pesquisas recentes relacionadas com o uso de ensembles, tem demonstrado o valor agregado do uso de previsões hidrológicas por conjunto para horizontes de aproximadamente três a quinze dias. De uma forma geral, os benefícios podem ser sumarizados como:

- Previsões probabilísticas geralmente tem desempenho melhor que previsões determinísticas em termos de estatísticas de quantificação de erros e métricas econômicas (Roulin, 2007; Bartholomes *et al.*, 2009).
- Previsões por conjunto permitem a quantificação da incerteza no futuro, medida através do espalhamento dos membros do conjunto, se a previsão for bem calibrada (Scherrer *et al.*, 2004; Olsson e Lindstrom, 2008).
- Previsões por ensemble permitem a distinção entre eventos extremos que tem maior possibilidade de ocorrer e eventos extremos que tem menor possibilidade de ocorrer (Buizza, 2008; Golding, 2009).
- Previsões de vazão por ensemble são menos sujeitas a inconsistências, medidas pelo grau de concordância entre previsões sucessivas do que previsões determinísticas (Buizza, 2008; Pappenberger *et al.*, 2011).
- Previsões de cheias por conjunto podem levar a melhores decisões relacionadas a aspectos operacionais de hidrologia, como a operação de obras hidráulicas, ou execução de planos de emergência, para diferentes estudos de caso testados (Boucher *et al.*, 2012; Ramos *et al.*, 2013; McCollor and Stull, 2008; Verkade e Werner, 2011; Dietrich *et al.*, 2009; Dale *et al.*, 2012).
- A quantificação das incertezas associadas aos diferentes cenários tem sido colocada como útil na diminuição da emissão de falsos alertas evitando assim a perda de credibilidade dos sistemas (Roulin, 2007; Boucher *et al.*, 2011).
- As previsões por ensemble podem ser consideradas cientificamente mais honestas, pois permitem a emissão de alertas de cheia considerando seu risco, promovem a tomada de decisões de maneira mais racional (Krzysztofowicz, 2001).

Todavia, acredita-se também que para que estes benefícios sejam alcançados são necessários estudos sérios de verificação das previsões por ensemble, pois não é apenas o fato

da previsão ser por ensemble que faz ela superior, mas também ela deve possuir uma qualidade adequada e suas fraquezas devem ser devidamente conhecidas.

#### ***2.1.5.4. Desafios e iniciativas científicas de suporte ao desenvolvimento de previsões hidrológicas por conjunto***

A despeito das vantagens, a previsão hidrológica por conjunto conta atualmente também com uma série de desafios a serem superados, que seriam (Schaake *et al.*, 2006; Cloke e Pappenberger, 2009, Ramos *et al.*, 2010; Boucher *et al.*, 2011, Meller, 2012, Pagano *et al.*, 2014):

- A montagem de um experimento ou de um sistema de previsão por conjunto é muito mais custosa e complexa que a elaboração de um para previsões determinísticas, uma vez que o volume de dados trabalhado é significativamente maior, exige grande espaço de armazenamento, e rotinas computacionais capazes de lidar com toda a complexidade imposta pelas múltiplas dimensões trabalhadas;
- A quantidade de dados disponíveis para a realização de experimentos de alta complexidade é limitada. Isto acontece por diversos motivos, incluindo: pouco tempo de existência da linha de pesquisa, custos proibitivos de tecnologia, tempo e mão de obra especializada para a preparação de reanálises de versões específicas de modelos, e a grande quantidade de armazenamento computacional. Por estes motivos muitos estudos de previsão por ensemble avaliam apenas previsões para eventos específicos;
- A interpretação dos resultados de previsões probabilísticas, que exige a análise de espalhamento, concentração de membros, e cenários mais prováveis, é mais complexa que a interpretação de resultados de previsões determinísticas.
- A aceitação por parte de operadores de sistemas de previsão e por parte de tomadores de decisão de sistemas de previsão por conjunto ainda não é completada, principalmente pela falta de conhecimento da matéria e pela maior dificuldade na interpretação e uso dos resultados.
- Os EPSs usados como entrada na previsão de cheias por conjunto nem sempre apresentam desempenho suficiente, possivelmente necessitando aumento em sua resolução, maior número de membros e do tratamento de erros sistemáticos e de espalhamento.

- Não se tem uma compreensão completa do benefício e da necessidade da consideração de todas as incertezas existentes no processo de previsão nos H-EPS a serem desenvolvidos.
- Não existem atualmente estudos de caso suficientes para uma consideração completa do real valor das previsões hidrológicas alimentadas por EPSs, tanto em termos de janela de tempo investigada quanto em termos de localidades. E deve-se considerar ainda que isto pode depender de cada caso.

A superação de algumas destas dificuldades é um dos focos apontados como necessários na realização de mais pesquisas relacionadas com previsões por conjunto (Cloke e Pappenberger, 2009, Ramos *et al.*, 2010).

Ainda, muitas das pesquisas desenvolvidas na atualidade sobre previsão de vazões por conjunto são motivadas ou tem suporte de iniciativas científicas, onde a mais notória ultimamente é o projeto HEPEX – *The Hydrologic Ensemble Prediction Experiment*, apresentado por Schaake *et al.* (2007).

O HEPEX é um projeto especificamente designado para hidrólogos, meteorologistas, e usuários de previsões para incentivar a resposta de questões técnicas e científicas e promover o rápido desenvolvimento da área de pesquisa em previsão hidrológica por conjunto. A iniciativa foi lançada em Março de 2004 em um encontro no centro europeu de previsões de médio prazo (ECMWF) e desde então vem se destacando na organização de workshops e seções de apresentações em diversos eventos internacionais. O HEPEX também mantém um portal na internet (<http://hepex.irstea.fr/>) onde a comunidade participante interage e semanalmente são postadas novidades relacionadas com o tema.

As áreas de pesquisa de interesse do HEPEX são:

1. Processamento de dados de entrada;
2. Técnicas de modelagem e processamento usando ensembles;
3. Assimilação de dados;
4. Pós-processamento;
5. Verificação de previsões;
6. Comunicação de previsões e tomada de decisão.

Outras iniciativas científicas que apoiaram a realização de previsões por conjunto são a quarta fase do MAP (*Mesoscale Alpine Program*) denominada de *D-PHASE-Demonstration*

*of Probabilistic Hydrological and Atmospheric Simulation of flood events in the Alpine region* (Zappa *et al.*, 2008; Rotach *et al.*, 2012), o RAPHAEL Project (*Runnoff and Atmospheric Processes for Flood Hazard Forecasting and Control*) (Bacchi e Ranzi, 2003) e o COST731 (Rossa *et al.*, 2011).

#### **2.1.5.5. Sistemas de previsão hidrológica por conjunto operacionais na atualidade**

Motivados pelos benefícios mostrados pelas pesquisas recentes e pelas mobilizações relacionadas com as iniciativas científicas, um número crescente de sistemas operacionais de previsão hidrológica por conjunto tem entrado em atividade ao redor do mundo. Pappenberger *et al.* (2013), através da iniciativa HEPEX, realizaram uma compilação de sistemas operacionais de previsão de vazão por ensemble existentes ao redor do planeta.

Dentre os sistemas apresentados por Pappenberger *et al.* (2013), acredita-se que é interessante destacar os sistemas de escala continental EFAS e EFFF, e o sistema global GloFAS. Os sistemas EFAS (Europa) e EFFF (África) rodam utilizando uma configuração muito similar, e o grande objetivo deles é servir para orientar sobre a ocorrência de cheias em um nível continental, apoiando ações que incluem a rodada de mais modelos locais com melhor resolução espacial. Dentre um dos alertas recentes emitidos pelo EFAS com sucesso inclui-se a cheia com mais de 100 anos de tempo de retorno que aconteceu em Maio de 2014 no sudoeste Europeu (península Balcãs). O sistema emitiu alertas com até 4 dias de antecedência. Durante este evento de cheia mais de 500 mil pessoas tiveram que ser evacuadas de suas casas (Thielen *et al.*, 2014).

Já o GloFAS, apresentado pela primeira vez por Alfieri *et al.* (2013), roda executando previsões para todo o globo terrestre e o seu objetivo é auxiliar na tomada de decisão relacionada com grandes cheias em grandes cursos de água, principalmente em países que não tem sistemas de monitoramento e previsão por conjunto bem estabelecidos. Até o momento os resultados emitidos pelo GloFAS não são baseados no modelo hidrológico calibrado, e sim na própria capacidade de superação de estatísticas calculadas com base na série histórica simulada pelo próprio modelo. A calibração do modelo deve ser uma das próximas etapas do trabalho de seus desenvolvedores, para melhorar a representação de alguns locais.

Entre os usuários dos resultados do GloFAS é está o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) do Brasil. Em parceria com os desenvolvedores do GloFAS, o CEMADEN recebe as previsões do sistema através de uma página dedicada. Segundo Alfieri et al (2013) os resultados por enquanto são experimentais.

## 2.2. Uso de previsão de vazão e o cenário brasileiro

Nos itens anteriores foi apresentada uma revisão sobre como podem ser geradas previsões de vazões, qual a importância e os benefícios da geração de previsões por conjunto, estudos de caso de pesquisa, e sistemas operacionais de previsão por ensemble existentes ao redor do mundo.

De uma forma geral, todas as evidências levantadas pelas pesquisas recentes relacionadas com previsão por ensemble apontam que elas apresentam benefícios em relação a previsões determinísticas, podendo ser consideradas como o estado-da-arte no tema de geração de previsões de curto e médio prazo, para horizontes de aproximadamente até 15 dias.

Isto tem se refletido no desenvolvimento de sistemas operacionais, onde até recentemente a abordagem determinística predominava. Atualmente já existem diversos sistemas que utilizam a previsão de cheias por conjunto em modo operacional e pré-operacional. Incluindo sistemas que cobrem grandes áreas, como países e continentes.

Contudo, também é possível verificar que a maioria dos sistemas operacionais e investigações relacionadas com previsão por ensembles existentes foram conduzidas para regiões de clima temperado, predominantemente na Europa e Estados Unidos, e também algumas iniciativas existem para a Austrália e África. No Brasil, e em toda a América do Sul de forma geral, a pesquisa relacionada com previsões de vazão por conjunto é incipiente.

Além dos ensaios preliminares de Calvetti (2011) e dos experimentos de previsão de cheias com curto prazo de Meller (2012), os únicos resultados disponíveis em território brasileiro seriam os do modelo GloFAS, que além de serem experimentais possuem muitas limitações, como o modelo hidrológico não ser calibrado e a resolução espacial grosseira só permitir resultados para grandes cheias de grandes rios.

Assim, muito pouco se sabe na realidade sobre o possível desempenho e utilidade de previsões por ensemble para as diversas peculiaridades de bacias localizadas no Brasil, por exemplo, relacionadas com:

- i. o clima tropical e o desempenho de modelos meteorológicos na região para previsão de precipitação focada na previsão de vazões;
- ii. as condições e as limitações impostas pela cobertura de monitoramento hidrometeorológico em tempo real (tipicamente menor em países em desenvolvimento);
- iii. a propagação de incertezas e outros efeitos associados a grande escala de bacias hidrográficas (bacias com áreas superiores a 50.000km<sup>2</sup> são pouco estudadas, por exemplo);
- iv. desempenho de previsões por conjunto para horizontes de previsão maiores do que 120h (5 dias) para estas bacias.
- v. desempenho de diferentes modelos meteorológicos e sua relação com características específicas do modelo (número de membros, resolução espacial) e características das bacias hidrográficas;
- vi. a utilização de modelos hidrológicos comumente usados no cenário nacional e se as incertezas meteorológicas são suficientes para previsões confiáveis;
- vii. os potenciais benefícios de previsões para a operação de reservatórios de geração de energia hidroelétrica, tanto em termos de volumes médios afluentes como também para o uso no controle de cheias e diminuição do risco de rompimento de restrições.

As previsões de vazão são basicamente utilizadas no contexto brasileiro para dois propósitos: (i) a programação da operação de reservatórios de usinas hidrelétricas; e (ii) a previsão de cheias para locais de risco. Onde, entre estes dois, o uso predominante é o relacionado com a operação de reservatórios.

No Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Em situações normais de vazão, o ONS utiliza previsões de vazões médias diárias com antecedências de até 14 dias para a programação da geração de energia hidrelétrica no sistema. Estas previsões são geradas pela própria ONS para algumas usinas, e para as demais usinas os próprios agentes de geração (responsáveis pelas usinas) são os responsáveis em fazê-las (ONS, 2011a; 2011b; 2012a; 2012b; 2012c; 2012d; 2012e; 2013a; 2013b; 2013c; 2014; Zambon *et al.*, 2012, 2014a, 2014b; Costa *et al.*, 2014, Oliveira *et al.*, 2014).



As formas como as previsões são geradas nestes casos variam bastante. Muitas usinas ainda utilizam modelos de previsão com pouca base física, como o PREVIVAZH, que é um modelo baseado na desagregação de previsão semanal a partir da tendência inferida das últimas vazões passadas e de séries sintéticas diárias de vazões naturais (Guilhon *et al.*, 2007; ONS, 2011a; 2011b; 2012a; 2012b; 2012c; 2012d; 2013a; 2013b; 2013c; 2014; Zambon *et al.*, 2012, 2014a, 2014b; Costa *et al.*, 2014, Oliveira *et al.*, 2014).

Visando melhorar a qualidade de previsões, recentemente a ONS organizou um trabalho de avaliação de diferentes alternativas para a previsão de vazões médias diárias a aproveitamentos hidroelétricos do SIN (Guilhon *et al.*, 2007). Os aproveitamentos hidroelétricos considerados estavam localizados nas bacias dos rios Iguaçu, Paraná e Paranaíba. No trabalho foram testados diversos métodos de previsão, abrangendo desde modelagem física com modelos conceituais concentrados e distribuídos, passando por metodologias híbridas e modelos estocásticos diversos, até técnicas de inteligência artificial e mineração de dados.

Ao final do trabalho, chegou-se a conclusão de que os modelos avaliados tiveram um desempenho superior ao Previvaz. Também, concluiu-se que a informação de previsão de precipitação resultou em um ganho de qualidade para a previsão de vazões (Guilhon *et al.*, 2007).

Principalmente depois deste trabalho, cada vez mais tem sido adotada uma maior diversidade de modelos para a previsão de vazão afluente a usinas hidrelétricas brasileiras. Também tem aumentando o uso da informação de previsões do tempo advinda de modelos meteorológicos. Por exemplo, na bacia do rio São Francisco, na UHE Três Marias, é usado um modelo baseado em redes neurais apresentado por Gomes *et al.* (2010). Já na bacia do rio Paranaíba, para a UHE São Simão, é usado o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH (Collischonn *et al.*, 2007). Para as bacias das UHEs Campos Novos e Barra Grande também é utilizado o modelo MGB-IPH (Fan *et al.*, 2014b). Ainda assim, todos estes modelos utilizam previsões determinísticas.

Em casos onde a situação da vazão afluente aos reservatórios do SIN não é considerada normal, e sim em estado de atenção, alerta ou emergência (definidas a partir da ocupação de volumes de espera e violação de restrições hidráulicas), a operação dos reservatórios não é mais controlada pela ONS, e sim feita pelos agentes de geração locais, seguindo algumas diretrizes estabelecidas pela ONS (ONS, 2011a; 2011b; 2012a; 2012b;

2012c; 2012d; 2012e; 2013a; 2013b; 2013c; 2014; Zambon *et al.*, 2012, 2014a, 2014b; Costa *et al.*, 2014, Oliveira *et al.*, 2014).

Nestes casos, a informação de previsões também é especialmente útil para sustentar a tomada de decisão, ainda mais quando se tratam de situações de altas vazões onde cada hora antecipada de um evento pode significar importantes ganhos no tempo para manobras com comportas.

Justamente para estes cenários, muitas hidroelétricas brasileiras financiam o desenvolvimento e utilizam sistemas de previsão de vazão específicos, que possam fornecer resultados detalhados, como em intervalo de tempo horário, e assim subsidiar a tomada de decisão operacional, e mitigar o risco de rompimento de restrições. Exemplos de sistemas de previsão desenvolvidos para estes fins são apresentados em Fan *et al.*, (2012), Fan *et al.* (2013) e Fan *et al.* (2014a). Novamente, apesar de estes sistemas utilizarem informação de chuva prevista, ela é apenas determinística.

Além deste uso preponderante no setor elétrico, a previsão de cheias associadas com impactos sociais, econômicos e sanitários tem ganhado espaço no cenário brasileiro. Isto por que inundações tem causado grandes danos ao país nas últimas décadas, onde de acordo com o Banco de Dados Internacional de Desastres EM-DAT (CRED, *Université Catholique de Louvain, Brussels*, [www.emdat.be/](http://www.emdat.be/), 2012), o Brasil está entre os dez países mais atingidos por inundações no mundo.

Espera-se nos próximos anos um número crescente de sistemas de alertas contra cheias no país, com a recente criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que tem como objetivo desenvolver, testar e implementar sistemas de previsão de ocorrência de desastres naturais em áreas suscetíveis de todo o Brasil. Como ainda é um centro recente, o CEMADEN não possui sistemas operacionais relacionados com cheias de rios.

A maior parte dos sistemas de previsão de cheias em operação atualmente no Brasil é mantida pela CPRM. Atualmente, ela opera sistemas para as bacias dos seguintes rios: Doce (MG), Cai (RS), Taquari (RS), Parnaíba (Piauí), Muriaé (RJ e MG); Negro (AM), Acre (AC), e Branco (RR). A CPRM mantém um portal na internet (<http://www.cprm.gov.br/>) chamado SACE - Sistema de Alerta Contra Enchentes, onde podem ser acessadas as previsões recentes: Os modelos usados, conforme explicados anteriormente, são baseados em dados observados, com horizonte de previsão geralmente curto, menor que três dias. Dentro destas antecedências, geralmente eles possuem resultados considerados muito bons.

Outro sistema de previsão em operação contra cheias é o do rio Itajaí, mantido pelo comitê de bacias do rio Itajaí no Estado de Santa Catarina, com resultados divulgados em: <http://www.comiteitajai.org.br/alerta/>. Esse modelo também possui um pequeno horizonte de previsão (Pinheiro, 2003; Cordero *et al.*, 2011).

Em termos técnicos de realização de previsões de cheias no cenário brasileiro, pode-se considerar que ainda existem muitas possibilidades a serem avaliadas, e métodos a serem testados. Apesar da eficiência demonstrada, o uso de previsões baseada em modelos meteorológicos, e mais ainda, por ensemble, ainda não faz parte do cenário operacional.

Este avanço relativamente lento do desenvolvimento tecnológico e científico em território nacional em comparação com outros locais do mundo é de certa forma antagônico com o grande benefício esperado que previsões de vazão com boa qualidade podem trazer para a tomada de decisão e a diminuição do impacto de eventos hidrológicos locais.

Assim, pode-se afirmar que o Brasil é muito dependente dos seus recursos hídricos para a geração de energia, ao mesmo tempo em que cheias ainda causam danos a populações ribeirinhas em múltiplas regiões. E mesmo assim pouco se conhece sobre o desempenho da utilização de técnicas de previsão consideradas estado-da-arte para auxiliar na operação de reservatórios e antecipar cheias nos cursos de água de bacias hidrográficas brasileiras.

### **2.3. Apresentação de Previsões de Vazão**

Uma característica fundamental para uma previsão de vazão é que ela seja completamente compreendida pelos seus usuários, isto inclusive motiva a realização de pesquisas focadas na investigação sobre a melhor forma de apresentação de resultados de previsões de vazão (Pagano *et al.*, 2014).

No caso de previsões determinísticas, a apresentação de resultados pode ser feita de uma maneira simples, como um hidrograma que mostra qual a trajetória prevista para a vazão, como o hidrograma exemplo na Figura 7.

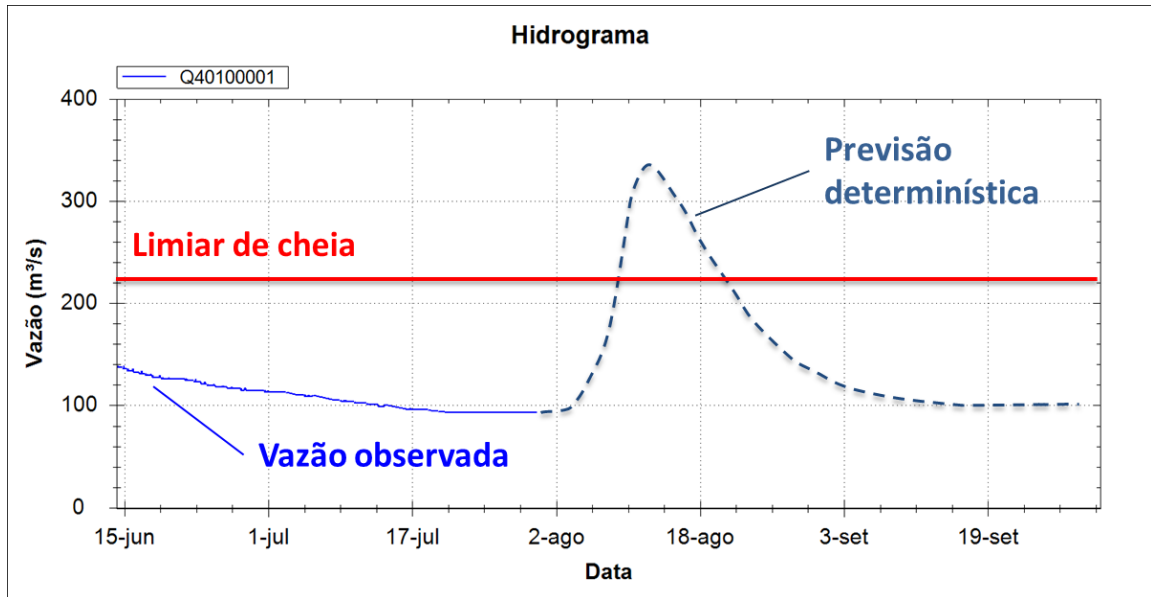


Figura 7. Exemplo de apresentação de resultado de uma previsão determinística.

No caso de previsões por conjunto, é comum a apresentação de um gráfico similar, contudo ao invés de este mostrar uma única trajetória possível para o futuro, são apresentadas todas as trajetórias previstas. Este tipo de gráfico é chamado de “gráfico espaguete”, e um exemplo é apresentado na Figura 8. No caso apresentado na figura considera-se a condição inicial perfeitamente conhecida, e cada um dos hidrogramas no período de previsão é obtido por com base em uma previsão meteorológica diferente.

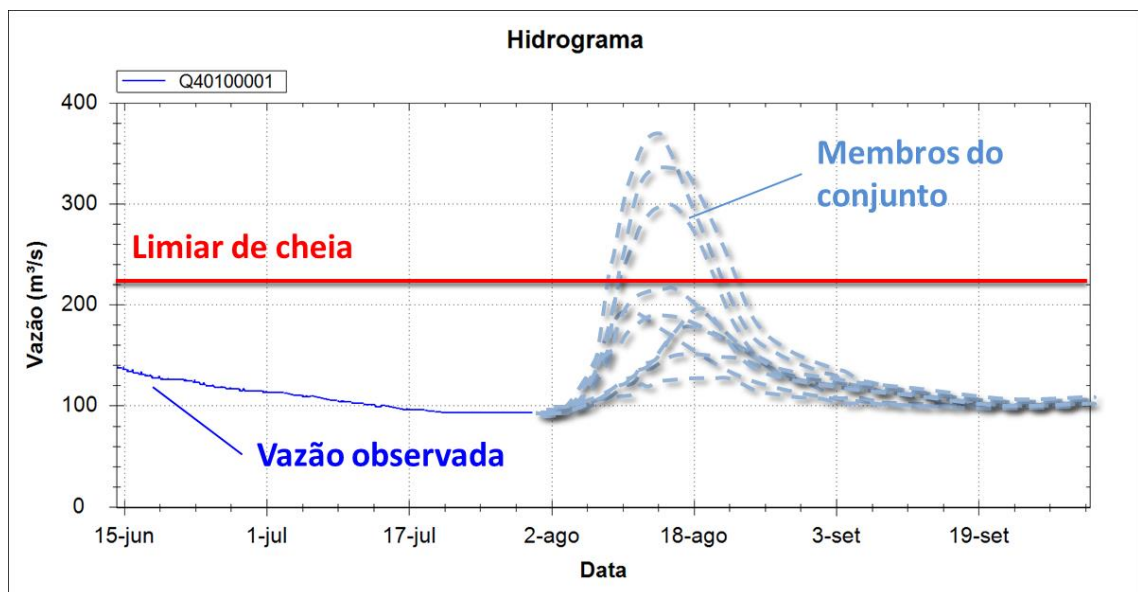


Figura 8. Exemplo de um gráfico espaguete com resultados de uma previsão por conjunto.

O diagrama de espaguete é uma forma muito comum de apresentar resultados e possui a vantagem de permitir que os usuários visualizem todos os membros da previsão e a partir desta inspeção tomem suas próprias conclusões as incertezas.

Esta é a forma de apresentação das previsões de vazão por conjunto adotada neste trabalho. Contudo, também existem outras formas, que são apresentadas no ANEXO A O assunto de verificação de previsões hidrológicas é tratado de forma mais aprofundada a seguir.

## 2.4. Verificação de Previsões Hidrológicas

Chama-se de verificação de previsões o processo de avaliar o desempenho de um sistema de previsão. Todos os tipos de sistema de previsão, determinísticos ou por ensemble, podem estar sujeitos a diferentes tipos de erros, por exemplo, erros sistemáticos como um viés. Inclusive, previsões hidrológicas operacionais podem ser consideradas incompletas caso o seu desempenho é desconhecido, ou não é comunicado para os usuários finais.

Essa avaliação da qualidade normalmente consiste em diagnosticar qual é o grau de correspondência entre as previsões e uma referência, tipicamente dada por observações. Mas também podem ser usadas outras referências, como saídas de modelos hidrológicos, caso o objetivo for isolar alguma fonte de erro específica.

A verificação permite investigar aspectos importantes de previsões, como quão adaptadas são as previsões para uma determinada aplicação (se elas possuem as características mínimas desejadas), quais são as principais fontes de incertezas e erros, quais são as fraquezas da previsão, e onde deve ser investido conhecimento para superá-las.

Neste sentido, previsões de vazão por ensemble contém mais informação que previsões determinísticas, pois as previsões por ensemble contém também a informação das incertezas em seus resultados. Por isto a verificação completa de previsões por conjunto deve considerar sua função de distribuição (empírica ou ajustada), medidas de tendência central, a integral dos erros da distribuição, e pontos relacionados com a probabilidade de ocorrência de eventos.

Em geral, a verificação de previsões por ensemble baseada somente em medidas de tendência central é inadequada, pois negligencia informações importantes relacionadas com incertezas trazidas pelo conjunto, como o espalhamento dos membros.

Existem muitos atributos a serem avaliados sobre a qualidade de previsões, sendo os principais (Wilks, 2006, Jolliffe and Stephenson, 2003):

- **Viés (*bias*):** desvios sistemáticos entre as previsões e as referências. Quando aparecem constantemente nas previsões são chamados de viés de primeira ordem.
- **Acurácia (*accuracy*):** diferença entre a previsão e a observação, que seria basicamente o erro da previsão.
- **Correlação (*correlation*):** relação linear entre previsões e observações.
- **Destreza (*skill*):** medida comparativa de desempenho entre o sistema avaliado e outro sistema de previsão utilizado como referência. Mede-se qual a “destreza” ou valor agregado do sistema em comparação a referência.
- **Confiança (*reliability*):** também conhecida como viés condicional tipo I. É a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades dadas pelas previsões. Por exemplo, um sistema não possui viés condicional quando considerando todos os eventos previstos com 10% de probabilidade de ocorrência eles aconteceram exatamente 10% das vezes.
- **Resolução (*resolution*):** descreve a habilidade de um sistema de previsão em diferenciar eventos observados caso estes sejam organizados em diferentes frequências de distribuição. Ou seja, o sistema tem boa resolução se durante períodos um pouco mais chuvosos ele prevê cheias com um pouco mais de probabilidade, e durante períodos um pouco menos chuvosos ele prevê cheias com um pouco menos de probabilidade. Outra forma de entender o conceito de resolução é pensar que ela é a quantificação da resposta para a seguinte pergunta: “diferentes distribuições de probabilidade de resultados de um sistema de previsão de vazão são compatíveis com diferentes distribuições de probabilidade de eventos observados que diferem ligeiramente entre si?”
- **Discriminação (*discrimination*):** capacidade do sistema de previsão em prever a ocorrência de um evento discreto (dicotomo), como a ultrapassagem ou não de dado(s) limiar(es).
- **Agudeza (*sharpness*):** medida da tendência de um sistema em prever probabilidades extremas (~0% ou ~100%), ou seja, se ele é “agudo” quando sugere a ocorrência de eventos insinuando sempre pequenas ou altas probabilidades. Um sistema é pouco “agudo” se indica probabilidades extremas com pouca frequência.

Em geral, muitos destes atributos são importantes para que um sistema de previsão seja útil para usuários finais. Contudo, para algumas aplicações particulares algumas características são mais importantes que outras. Como para a proteção contra cheias a capacidade de discriminação é fundamental. Já para a programação da geração de energia hidrelétrica é importante que não exista muito viés nas previsões, ou seja, que os volumes previstos no longo termo sejam compatíveis com os observados.

Para permitir a avaliação destes atributos de desempenho de previsões existe um grande número de métricas. Estas métricas tem origem na meteorologia, onde o tema de previsão por ensemble nasceu, e atualmente são também muito utilizadas para avaliar previsões hidrológicas (Brown *et al.* 2010, Bradley e Schwartz, 2011; Liu *et al.*, 2011).

Algumas destas métricas somente são aplicáveis para previsões de valor único, que seriam as previsões determinísticas, ou uma redução da previsão por conjunto para uma medida de tendência central, como a média, por exemplo.

Outras métricas usam também a probabilidade das previsões, o que permite explorar melhor algumas características das previsões por conjunto.

Ainda, algumas destas estatísticas são focadas em eventos discretos (isto é, eventos definidos pela excedência de um limiar), como a ocorrência ou superação de um dado limiar de cheia.

Na Tabela 1, adaptada de Brown e Demargne (2013), é apresentada uma compilação de métricas usualmente aplicadas na verificação de previsões hidrometeorológicas, bem como o enquadramento das mesmas em relação ao atributo de qualidade medido, e ao tipo de previsão que se aplica.

No presente trabalho alguns dos nomes das métricas são mantidos na forma original em inglês. Embora existam algumas traduções na literatura em português.

Tratando-se de referências atuais sobre o assunto relacionado com métricas a serem usadas operacionalmente em previsões de vazão, é interessante ressaltar que o *The Joint Working Group on Forecast Verification Research do World Weather Research Programme* (WWRP) e o *Working Group on Numerical Experimentation* mantém atualmente na internet uma página de referência (<http://www.cawcr.gov.au/projects/verification/>) descrevendo métricas padrão, bem como novas estatísticas recém-desenvolvidas para serem usadas de forma operacional.

**Tabela 1. Compilação de métricas usualmente aplicadas na verificação de previsões hidrometeorológicas (adaptada de Brown e Demargne (2013) e expandida pelo autor).**

Atributo de Qualidade	Nome da Métrica	Tipo de Previsão	Evento Discreto?
Erro	Mean Absolute Error	Valor único	Não
	Mean Square Error	Valor único	Não
	Root Mean Square Error	Valor único	Não
	Mean Continuous Rank Probability Score (CRPS)	Ensemble	Não
	Brier Score	Ensemble	Sim
	Critical Success Index (ou Threat Score)	Ambas	Sim
Viés	Relative Mean Error (ou Relative Bias)	Valor único	Não
	Frequency Bias	Ambas	Sim
Correlação	Pearson Correlation Coefficient	Valor único	Não
	Spearman Rank Correlation	Valor único	Não
Destreza	Mean Absolute Error Skill Score	Valor único	Não
	Mean Square Error Skill Score	Valor único	Não
	Mean Continuous Rank Probability Skill Score	Ensemble	Não
	Brier Skill Score	Ensemble	Sim
	Equitable Threat Score (ou Gilbert Skill Score)	Ambas	Sim
Confiança (Viés tipo I)	Mean CRPS Reliability	Ensemble	Não
	Brier Score Reliability	Ensemble	Sim
	Reliability Diagram	Ensemble	Sim
	Rank Histogram	Ensemble	Sim
	Success Ratio	Ambas	Sim
Resolução	Mean CRPS Resolution	Ensemble	Não
	Brier Score Resolution	Ensemble	Sim
Discriminação	Relative Operating Characteristic Score	Ambas	Sim
	Relative Operating Characteristic Diagram	Ambas	Sim
	Probability Of Detection (ou Taxa de Acertos)	Ambas	Sim
	Probability Of False Detection (ou Taxa de Alarmes Falsos)	Ambas	Sim
Agudeza	Forecast Frequency Histogram	Ensemble	Sim

Nota: Os nomes das métricas foram mantidos como sendo os originais em inglês.



Uma previsão de vazão além da propriedade “qualidade”, que é avaliada através do uso das métricas citadas, também pode ter duas outras propriedades segundo Murphy (1993): “consistência” e “valor”. A consistência seria dada pela diferença entre uma previsão feita por um modelo e os resultados esperados segundo o julgamento da pessoa executando a previsão. Ela teria, portanto, o fator humano associado, que é a expectativa do previsor. Esta propriedade de consistência foi depois tratada de forma complementar por Pappenberger *et al.* (2011) que consideram a consistência como sendo o grau de concordância entre previsões consecutivas. Ou seja, previsões consistentes seriam aquelas cuja decisão não muda entre uma previsão feita em um intervalo de tempo, e outras feitas imediatamente depois.

Já o atributo “valor”, segundo Murphy (1993), é dado pelo grau de utilidade das previsões em termos econômicos ou outros tipos de benefícios mensuráveis. Por exemplo, se previsões de dois modelos possuem qualidade distinta, mas ambas permitem o mesmo ganho econômico quando aplicadas a um uso específico (como aflúências a reservatórios), então elas possuem o mesmo “valor”.

Segundo mostrado também pelo próprio Murphy (1993), estas três características estão intimamente conectas, e geralmente uma previsão que apresenta melhores resultados em termos de alguma delas, também tende a apresentar melhores resultados em termos das demais.

Na presente pesquisa, diversas destas métricas foram selecionadas para a realização da verificação de previsões de precipitação e vazão em termos de qualidade. Procurou-se escolher um conjunto de medidas de desempenho capaz de descrever todos os atributos de previsões, e que são relativamente bem conhecidas e amplamente utilizadas em pesquisas relacionadas com a avaliação de previsões determinísticas e por conjunto, como: Regonda *et al.* (2013), Renner *et al.* (2009), Velázquez *et al.* (2009); Addor (2011), Younis (2008), Bradley e Schwartz (2011), Pagano (2014). Estas referências bibliográficas, além de Brown *et al.* (2010), Hersbach (2000), Jolliffe e Stephenson (2012), Stanski *et al.* (1989), e Wilks (2006), também são as mesmas consultadas para a elaboração das explicações detalhadas das estatísticas, apresentadas a seguir neste texto.

As métricas utilizadas no presente trabalho são apresentadas na Tabela 2. Elas são apresentadas em uma ordem seguindo a mesma organização de Brown *et al.* (2010), onde primeiro são introduzidas métricas relacionadas a avaliação exclusiva de previsões de valor único (determinísticas), seguidas de métricas relacionadas com distribuição dos resultados.

**Tabela 2. Métricas para avaliação de previsões de vazão utilizadas neste trabalho e organizadas segundo o usado em Brown *et al.* (2010).**

Tipo de Previsão	Métrica
Valor único (estatísticas exclusivas para avaliações determinísticas)	Erro Médio Absoluto, Erro Médio Relativo, Coeficiente de Correlação
Distribuição do conjunto	<i>Brier Score, Mean Continuous Ranked Probability Score, Relative Operating Characteristic, Reliability Diagram, Rank Histogram</i>

Além da qualidade, as previsões foram avaliadas em termos de consistência, mas seguindo o conceito apresentado por Pappenberger *et al.* (2011), que considera a consistência como sendo o grau de concordância ente previsões consecutivas. Esta definição é oportuna, pois permite o uso de uma estatística denominada Forecast Convergence Score (FCS) para a sua verificação em termos numéricos, que também é apresentada por Pappenberger *et al.* (2011). Esta mesma métrica é usada na presente pesquisa.

A avaliação da característica “valor” das previsões não está incluída no escopo desta pesquisa, onde se considera que a sua verificação é uma etapa posterior às demais verificações, e onde devem ser utilizados modelos de simulação e otimização da operação de reservatórios para o cálculo dos benefícios em termos econômicos (ou energéticos) propriamente ditos com o uso das previsões. Todavia, como os três tipos de características das previsões tendem a estar conectados (Murphy, 1993), acredita-se que as verificações aqui apresentadas tendam a dar informações úteis relacionadas com resultados que seriam esperados em termos de valor das previsões.

Uma descrição de cada uma destas métricas selecionadas para serem utilizadas no presente trabalho é apresentada com detalhe no ANEXO B incluindo forma de cálculo, apresentação dos resultados, e interpretação destes. A seguir, é feita uma breve introdução sobre o significado de cada uma das métricas e como seus resultados devem ser interpretados:

- Erro Médio Absoluto (EMA): mede a diferença absoluta entre previsões e observações correspondentes para cada um dos horizontes de previsão. No caso de previsões de vazão por ensemble, o conjunto de previsões deve ser

sumarizado em uma única previsão determinística, onde comumente é utilizada a média aritmética do conjunto. Quanto mais próximo o valor de EMA estiver de zero, melhores são os resultados das previsões, pois menores são as diferenças entre previsões e observações.

- Erro Médio Relativo (EMR): mede a diferença média entre previsões e observações correspondentes para cada um dos horizontes de previsão, dividida pelo valor da vazão observada. No caso de previsões de vazão por ensemble, para calcular o EMR o conjunto de previsões também deve ser sumarizado em uma única previsão determinística, como a média. Quanto mais próximos os valores de EMR estiverem de zero, melhores são considerados os resultados das previsões, pois menores são as diferenças entre previsões e observações.
- Coeficiente de correlação ( $r$ ): mede o grau de associação linear entre os valores observados e os valores previstos. No caso de previsões de vazão por ensemble, também é necessário sumarizar o conjunto em uma única previsão determinística para calcular o coeficiente de correlação. O valor de  $r$  para uma perfeita associação linear é um. Zero indica que não existe associação linear e valores negativos indicam que existe uma associação linear inversamente proporcional.
- Brier Score (BS): é uma métrica para a avaliação de eventos dicretos e que considera a distribuição das previsões por conjunto. O BS mede o erro médio quadrático da probabilidade de uma previsão para a ocorrência de um evento determinado, como a excedência de um limiar de vazão que define uma cheia. As unidades de erro são dadas em probabilidades ao quadrado. Uma previsão perfeita, que sempre acerta a ocorrência ou a não ocorrência do limiar definido, sempre terá um BS igual à zero. É importante não confundir o BS com o Brier Skill Score (BSS), que também é uma métrica comumente utilizada. O BSS, conforme mostrado por Murphy (1986) é uma métrica derivada do BS que serve para comparar dois modelos. O BSS não foi usado neste trabalho.
- *Mean Continuous Ranked Probability Score* (CRPS médio): é uma estatística que resume a qualidade de uma previsão probabilística contínua em um único número, através da comparação da integral dos quadrados das diferenças entre a função de probabilidades acumuladas das previsões e respectivas observações. O valor numérico do CRPS médio não é diretamente interpretável

em termos de erro na previsão por si só, mas pode ser utilizado para fins comparativos entre duas previsões por conjunto ou entre previsões por conjunto e determinísticas. Este último caso se deve ao fato dos seus valores serem exatamente iguais ao Erro Médio Absoluto (EMA) para previsões determinísticas. Quanto mais próximo o valor de CRPS médio estiverem de zero, melhores são os resultados das previsões.

- **Rank Histogram:** também conhecido como *Talagrand Histogram*, é uma medida simples, do espalhamento de previsões por conjunto. Ele consiste em uma contagem do percentual de casos em que os valores observados ficaram posicionados entre os membros da previsão por conjunto. Ele é computado para cada um dos horizontes de previsão. Cada posição entre os membros do conjunto é denominada de uma classe (ou *bin*), e o número de classes é sempre igual ao número de membros da previsão por conjunto mais um. Contudo, quando a o número de membros, e conseqüentemente de classes, é muito grande, não é incomum que os resultados sejam agrupados para serem apresentados em um menor número de classes. O formato do histograma versa então sobre o espalhamento das previsões por conjunto. Altas frequências em ambas as caudas do histograma (formado de “U”) são um indicativo de falta de espalhamento Um histograma com formato de “triângulo” (também chamado de “U invertido”) simboliza um possível excesso de espalhamento nas previsões. Outros formatos, como “L” e “L invertido”, são indicativos de viés positivo e negativo, respectivamente, nas previsões de vazão por conjunto.
- **Relative Operating Characteristic diagram** (diagrama ROC): também mede a qualidade de uma previsão para a ocorrência de um evento discreto, como a excedência de um limiar de uma cheia. Para a sua compisição, em cada um dos horizontes de previsão são calculados dois índices: o POD (*Probability of Detection*) e o POFD (*Probability of False Detection*). Os valores desejados de POD para um sistema perfeito são iguais a unidade. Ou seja, que o modelo sempre acerte a ocorrência do limiar. Da mesma fora, os valores desejados para POFD são iguais à zero. Ou seja, que o meu modelo nunca emite alarmes falsos. No caso de previsões por ensemble, os índices de POD e POFD são calculados para diferentes percentis que compõem que compõem a previsão por conjunto.

- Reliability Diagram (diagrama de confiança): é um diagrama que mede o viés condicional tipo I de um conjunto de previsões para um evento discreto, como a excedência de um limiar. Um diagrama diferente é computado para cada um dos horizontes de previsão. No eixo das abscissas (eixo “x”) do diagrama são plotadas as probabilidades de o evento avaliado ser excedido na previsão de vazão. No eixo das ordenadas do diagrama (eixo “y”) são plotadas as probabilidades condicionais observadas da ocorrência do evento, dadas as probabilidades de previsão definidas no eixo “x”. De acordo com a teoria por trás do reliability diagram, um evento deve ser observado com a mesma probabilidade de ocorrência que as probabilidades de ocorrência previstas pelo sistema de previsão ao longo de uma grande amostra. Isto significa que um reliability diagram perfeito deve ser uma linha com inclinação de quarenta e cinco graus, e que desvios desta linha representam diferentes tipos de erros.
- Forecast Convergence Score (FCS): O FCS usado neste trabalho é uma medida de consistência entre previsões consecutivas apresentada por Pappenberger *et al.* (2011). O FCS mostrado pelos autores é baseado no Brier Score (BS), por que ele é uma medida relacionada com a ocorrência de um evento discreto (ultrapassagem de um limiar) e sua unidade de medida é dada pela diferença ao quadrado das probabilidades de ocorrência do evento. Porém, a comparação é feita entre previsões com dois instantes de tempo iniciais diferentes (no Brier Score ela é feita com a observação). O raciocínio por trás do FCS é bem simples: quando duas previsões consecutivas indicam a mesma decisão em termos de probabilidades (por exemplo, 10% de chance de ultrapassagem do limiar) elas são consistentes, e, portanto, o valor do FCS é zero. Contudo, caso elas apresentem uma diferença entre suas decisões, o valor do FCS será maior do que zero e proporcional às diferenças nas probabilidades indicadas elevadas ao quadrado. Assim, quando mais próximas de zero for o valor do FCS, mais consistentes são as previsões consecutivas entre si. É importante destacar que esta não é uma métrica de avaliação de qualidade das previsões, ao contrário das demais citadas até o momento. Tanto que ela nem é baseada em dados observados, apenas nas próprias previsões. E sim ela é uma métrica de medição de consistência, ou convergência, das previsões.

## 2.5. Modelagem hidrológica para previsão de vazões

Conforme discutido nas seções anteriores deste texto, a forma mais comum de preparação de previsões de vazão por conjunto de curto e médio prazo é a utilização de modelos hidrológicos de base física ou conceituais.

Estes modelos hidrológicos consistem em representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos. Para a simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica, os modelos conceituais ou de base física utilizam uma série de equações com dados de entrada diversos, como tipo e uso do solo na região estudada, precipitação ao longo do tempo, e outras variáveis climáticas. Como resultados, comumente são geradas informações hidrológicas diversas como a vazão nos rios, evapotranspiração, e balanços de água no solo.

A incorporação de dados de modelos meteorológicos não é uma exclusividade do uso deste tipo de modelos. Contudo, os modelos hidrológicos conceituais ou com base física fornecem resultados baseados em equações que tentam simular os processos físicos, e assim permitem a extrapolação das previsões para além do domínio dos dados observados com maior coerência metodológica que outros métodos (Tucci, 2005; Sene, 2010).

Nas seções a seguir são apresentados dois aspectos importantes relacionados com o uso de modelos hidrológicos nesta pesquisa. Primeiro é apresentado o conceito de assimilação de dados, que é uma componente importante de sistemas de previsão de vazão baseados em modelos hidrológicos. Posteriormente, é apresentado o modelo hidrológico MGB-IPH, que é o modelo hidrológico utilizado neste trabalho.

### 2.5.1. Assimilação de Dados

Quando são usados modelos hidrológicos para a previsão de vazão em tempo real é muito comum que a vazão calculada pelo modelo no exato momento do início da previsão não seja igual ao valor observado naquele mesmo instante, o que acaba por significar um erro já nos intervalos de tempo iniciais das previsões.

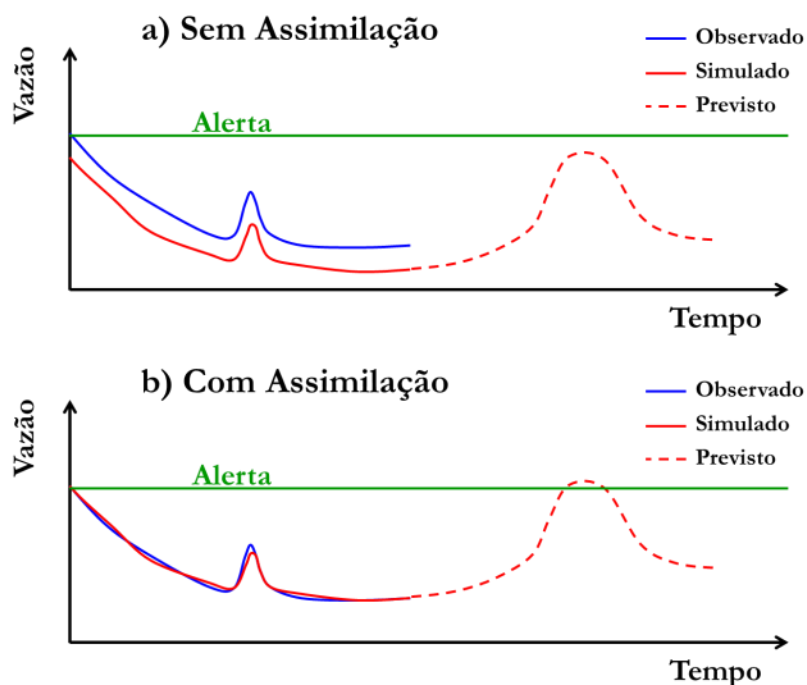
Esta diferença acontece basicamente por que os modelos hidrológicos não são perfeitos, mas também devido a erros na calibração, mudanças na bacia ao longo do tempo, e

até erros nos dados observados (Serban e Askew, 1991; Srikanthan *et al.*, 1994).

Assim, a assimilação de dados, também chamada de atualização, consiste em um processo de retroalimentação em que as observações mais recentes são utilizadas para corrigir as condições iniciais do modelo hidrológico (ou outras variáveis) antes de cada previsão, aproximando as condições simuladas pelo modelo e as observadas em campo.

No contexto da previsão em tempo real, quando o modelo hidrológico utiliza alguma técnica de assimilação de dados (Vrugt *et al.*, 2006; Liu e Gupta, 2007; Liu *et al.*, 2012) costuma-se dizer que o modelo opera em “modo de previsão”. A Figura 9 ilustra de forma esquemática o efeito da assimilação de dados sobre uma previsão hipotética. Basicamente o que se procura obter é o melhor ponto de partida possível para uma previsão de vazão, o que invariavelmente afeta os resultados ao longo do horizonte de previsão, como o valor máximo do pico de uma cheia.

No exemplo esquemático é mostrado como a assimilação de dados pode ser importante, pois uma previsão mais acurada no início pode significar a correta ultrapassagem de um limiar de cheia no futuro.



**Figura 9. Representação esquemática do efeito da assimilação de dados sobre um hidrograma. Em “a” é apresentada uma previsão sem assimilação e em “b” é apresentada uma previsão com assimilação.**

Existem diversas metodologias de assimilação de dados desenvolvidas para uso em modelos hidrológicos (Clark *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012). Dentre as principais técnicas utilizadas na atualidade pode-se citar aquelas baseadas em *Ensemble Kalman Filtering* (EnKF) e em *Particle Filtering* (PF). Técnicas de otimização matemática que utilizam algoritmos evolucionários também tem surgido recentemente como uma forma de realização de assimilação de dados. Estas técnicas têm sido chamadas de *Evolutionary Based data Assimilation* (EDA).

Nos trabalhos de Dumedah e Coulibaly (2013a, 2013b, 2013c) é apresentada uma revisão completa destes principais métodos de assimilação, bem como uma comparação entre eles. O estudo foi aplicado para o modelo Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) calibrado para a bacia do córrego Spencer, em Ontario no Canadá. Os resultados dos autores mostraram que para previsões com horizonte pequeno, de até dez dias, a ordem de desempenho dos métodos foi: EnFK, PF e EDA. Já para horizontes de previsão mais distantes o melhor método foi o PF.

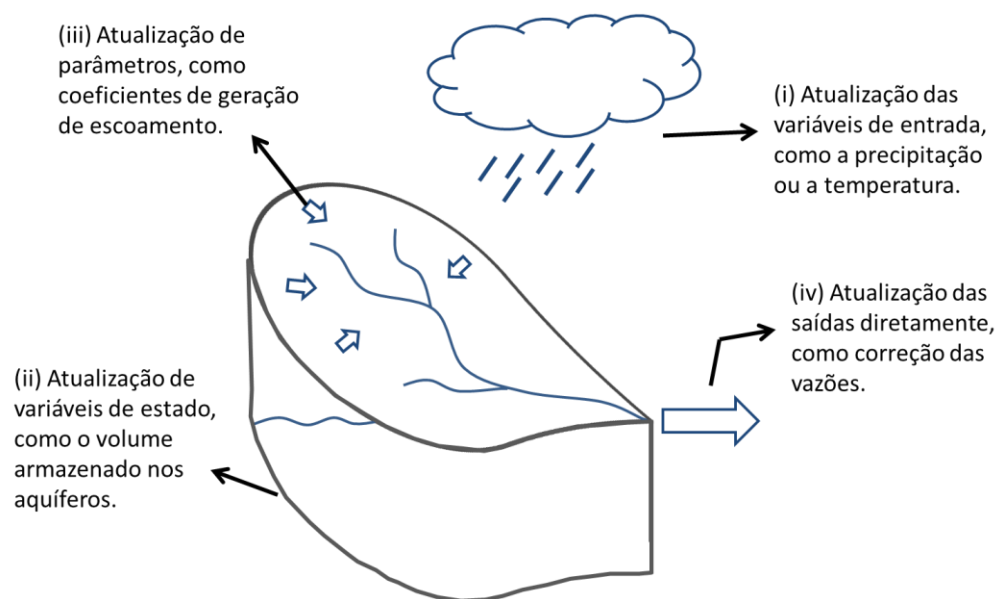
Outra forma de realizar assimilação de dados é a partir de métodos de assimilação empíricos, em que fatores de correção são calculados diretamente dos erros cometidos pelo modelo, e então as variáveis de interesse são corrigidas com base nesta estimativa direta.

Diferentes fontes de dados observados e variáveis de modelos hidrológicos podem ser utilizadas na assimilação de dados. A utilização da comparação entre vazões calculadas e observadas é muito comum. Contudo, também podem ser utilizados produtos de sensoriamento remoto para a comparação entre valores calculados e observados de umidade do solo, por exemplo. Em bacias de clima temperado em que a neve faz um papel importante nos processos hidrológicos, é comum também o uso de dados informações de cobertura de neve (Liu *et al.*, 2012).

As modificações impostas pela assimilação de dados também podem ser aplicadas em diferentes compartimentos de um modelo de previsão de vazões (O'Connell e Clarke, 1981; Refsgaard, 1997), são eles: (i) entradas do modelo hidrológico, como os dados de chuva; (ii) variáveis de estado do modelo hidrológico, como a quantidade de água no solo; (iii) parâmetros do modelo, como a capacidade de armazenamento de água nos aquíferos ou coeficientes de geração de escoamento superficial; e (iv) saídas do modelo, com a correção direta dos valores de vazão previstos, sem modificar informações que passam por dentro do modelo hidrológico.



A Figura 10 mostra, ilustrativamente, como cada um desses métodos interage com o modelo de uma bacia hidrográfica.



**Figura 10. Ilustração das etapas de uma modelagem hidrológica onde a assimilação de dados pode ser aplicada.**

Por muitos autores a correção das saídas de modelos hidrológicos não é considerada necessariamente uma assimilação de dados, já que os resultados não passam necessariamente dentro do modelo, mas apenas uma técnica de correção de resultados. Todavia, por outros, como Wang *et al.* (2015), elas são. Também, as técnicas relacionadas com a atualização dos parâmetros de modelos são muito criticadas, já que de certa forma a alteração de parâmetros significa uma re-calibração a cada nova previsão, e isto pode indicar a existência de deficiências na representação de processos (Serban e Askew, 1991; Moore *et al.*, 2005).

Por fim, é importante destacar que a assimilação de dados, embora melhore o desempenho de previsões hidrológicas, não extingue a necessidade de um modelo hidrológico bem calibrado para a correta reprodução do comportamento de bacias hidrográficas. Se a calibração do modelo for inadequada o efeito benéfico da assimilação de dados não deve durar além dos primeiros intervalos de tempo de previsão, ou até se transformar em erros maiores na previsão (Wang *et al.*, 2015). Por exemplo, se um modelo mal calibrado sempre prevê a ocorrência de uma cheia com defasagem temporal, isto pode acabar confundindo o processo de assimilação e gerando erros adicionais que não seriam tão graves em um processo sem assimilação.

Da mesma forma, para a realização de uma assimilação eficiente de dados para previsão são necessárias informações observadas com qualidade. Se os dados observados utilizados na assimilação forem ruins, corre-se o risco de estar introduzindo erros na previsão, ao contrário de benefícios.

### 2.5.1.1. Correção de saídas utilizando modelos auto regressivos

Uma forma muito comum de realizar a correção das saídas de modelos hidrológicos de previsão, que seria a atualização das saídas comentada anteriormente, é a utilização de métodos estatísticos. Onde, entre estes, os modelos do tipo ARMA (*Auto Regressive Moving Average*) são os mais utilizados usados (Wang *et al.*, 2015).

Os modelos do tipo ARMA são uma forma de modelagem de séries temporais baseada no conceito que os erros estão tipicamente altamente correlacionados com o tempo, de tal forma que é possível prever e corrigir erros futuros a partir dos erros sendo cometidos atualmente.

Eles são aplicáveis a séries temporais estacionárias, para modelar a evolução dos erros de um modelo ao longo do tempo. A fórmula geral de um modelo tipo ARMA é dada na Equação 11:

$$Q_{res}(t) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot Q_{res}(t-k) + \sum_{m=1}^M \gamma_m \cdot e(t-m) + \varepsilon \quad (11)$$

em que  $Q_{res}(t)$  representa o erro residual observado no intervalo de tempo  $t$ . Na primeira metade da equação  $Q_{res}(t-k)$  representa o erro residual observado nos intervalos de tempo anteriores dados por  $t-k$ ;  $\alpha_k$  é uma variável de correção função das últimas observações, e  $k$  é o número de observações a serem consideradas na correção. Na segunda metade da equação  $e(t-m)$  é o erro aleatório no intervalo  $t-m$ ;  $\gamma_m$  é uma variável de correção dependente de  $m$ ; e  $M$  é o número de observações a serem consideradas no cálculo. Finalmente, a variável  $\varepsilon$  representa outros erros que podem ser adicionados ao modelo, que podem ou não ser definidos em função do intervalo de tempo.

Na Equação 11 denomina-se de ordem do modelo os valores definidos para  $K, M$ . Por exemplo, um modelo ARMA de ordem 2,1 é um modelo onde  $K$  é igual a 2 e  $M$  é igual a 1.

Além disso, os parâmetros  $\alpha_k$  e  $\gamma_m$  são parâmetros que devem ser ajustados. Este ajuste pode ser feito manualmente ou através de métodos automáticos de otimização.

O modelo ARMA pode ser dividido em duas componentes, pela separação da Equação 11 em duas componentes. A primeira parte da equação, que descreve como cada erro é função dos erros das observações anteriores é denominada de Auto Regressiva, ou AR.

Na Equação 12 é mostrado um exemplo do que seria um modelo somente AR com K igual a 1, e a variável  $\varepsilon$  decomposta em erros relacionados com o tempo e em erros constantes dados por  $c$  :

$$Q_{res}(t) = c + \alpha_1 \cdot Q_{res}(t-1) + \varepsilon(t) \quad (12)$$

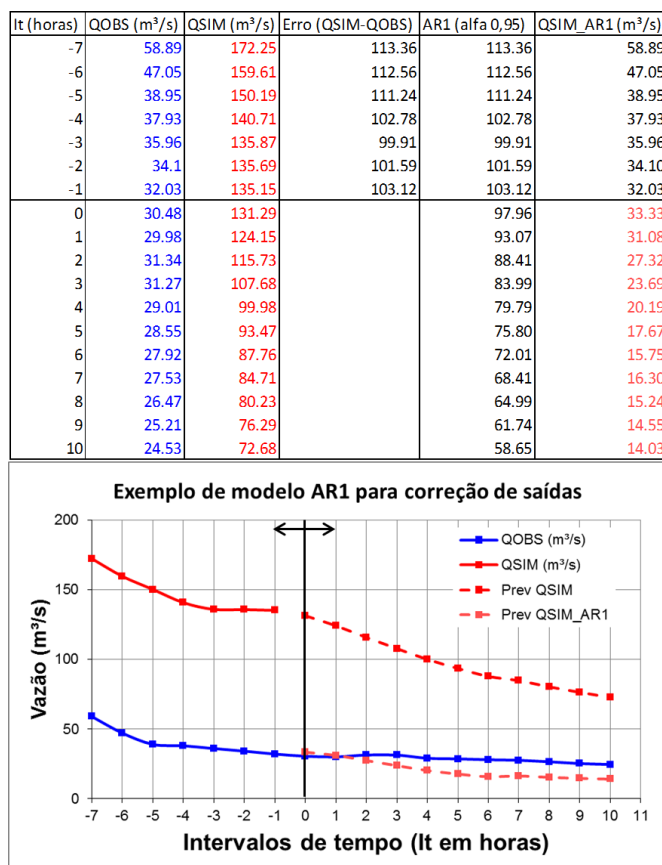
Já a segunda parte da Equação 11, que descreve como cada observação é função dos M erros anteriores, é a que dá a denominação de média móvel, ou MA (Moving Average), ao modelo. A Equação 13 mostra o exemplo do que seria um modelo somente MA com M igual a 1, e a variável  $\varepsilon$  decomposta em erros relacionados com o tempo e em erros constantes dados por  $c$  :

$$Q_{res}(t) = c + \gamma_1 \cdot e(t-1) + \varepsilon(t) \quad (13)$$

Para a correção de saídas de previsões hidrológicas é possível então utilizar estes modelos para a verificação dos erros nos últimos intervalos de tempo de simulações e aplicar estas correções nas trajetórias previstas para o futuro. A Figura 11 apresenta um exemplo simples do que seria a utilização ARMA(1,0), ou simplesmente AR1, com  $\alpha_1 = 0,95$  para corrigir as saídas de uma previsão de vazão dada por QSIM usando as observações dadas por QOBS.

Nota-se no exemplo dado pela Figura 11 que a previsão de vazão começava em torno de 130m<sup>3</sup>/s, enquanto que a observação era da ordem de 30m<sup>3</sup>/s. Após a utilização da correção auto regressiva a previsão de vazão inicia praticamente junta com a observação, e os seus resultados ao longo do horizonte de previsão também são muito mais próximos das observações.

A esta forma de correção de saídas foi dada especial atenção nesta revisão bibliográfica por que ela é utilizada em alguns dos ensaios feitos no presente trabalho.



**Figura 11.** Exemplo da utilização de um modelo ARMA(1,0), ou simplesmente AR1, com  $\alpha_1 = 0,95$  para corrigir as saídas de uma previsão de vazão dada por QSIM usando as observações dadas por QOBS.

### 2.5.2. O Modelo MGB-IPH

O modelo hidrológico MGB-IPH é um modelo que calcula as vazões dos rios em uma bacia a partir de dados de precipitação e de outras variáveis climáticas (Collischonn e Tucci, 2001). O modelo MGB-IPH foi desenvolvido especialmente para bacias de grande porte, onde geralmente assumem-se limiares de área na ordem de 10.000km<sup>2</sup> como referência, embora alguns estudos de caso já tenham demonstrado bom desempenho do modelo para bacias menores (Fan et al., 2013), na ordem de 5.000km<sup>2</sup>.

Dentre alguns dos estudos de caso recentes de previsão de vazão em curto prazo utilizando o modelo MGB-IPH podem ser citados os trabalhos de: Collischonn et al (2005) e Andreolli et al (2006), que usaram o modelo para a previsão de vazões na bacia do rio Uruguai; Silva *et al.* (2007), onde o modelo foi usado para a previsão de vazões em toda a bacia do Rio São Francisco; Tucci et al (2008), que apresentam o uso do modelo para a previsão de vazões na bacia do Rio Grande; Paiva et al (2012) e Paiva et al (2013) apresentam

o uso do MGB-IPH na bacia Amazônica, e Fan et al (2012) que apresenta o uso do modelo para a previsão de vazões nas bacias dos rios Pelotas e Taquari-Antas (RS). Finalmente, no trabalho de Meller (2012) e Meller et al (2014), em que é apresentado o estudo sobre previsão por *ensemble* na bacia do rio Paraopeba (MG), e nos trabalhos de Fan et al. (2014) na bacia do Rio São Fransico e Fan et al. (2015b) na bacia do Tocantins também é utilizado o modelo MGB-IPH.

O modelo MGB-IPH é um modelo semi-distribuído, em que a bacia hidrográfica é subdividida em unidades menores utilizando ferramentas de geoprocessamento em uma etapa de pré-processamento dos dados. As primeiras versões do modelo MGB-IPH usavam células regulares quadradas como unidade de discretização da bacia hidrográfica, e a versão atual do modelo utiliza uma discretização em pequenas bacias hidrográficas denominadas minibacias (Fan e Collischonn, 2014). As minibacias não possuem forma predefinida e são delimitadas a partir do modelo numérico do terreno (MNT). Existe ainda uma unidade de divisão maior que pode ser opcionalmente usada, que são as sub-bacias. As sub-bacias correspondem a um conjunto de minibacias e tem seu exutório usualmente definido pelos locais onde existem postos fluviométricos com dados observados. A finalidade das sub-bacias é permitir a calibração do modelo hidrológico de forma diferenciada em diferentes regiões da bacia simulada, já que os parâmetros do modelo devem ser definidos para cada sub-bacia.

A grande maioria das aplicações do modelo MGB-IPH nos últimos anos tem sido na simulação hidrológica de grandes bacias hidrográficas, onde normalmente é utilizado o intervalo de tempo diário (Fan e Collischonn, 2014). Uma das particularidades das aplicações neste trabalho é a utilização do modelo hidrológico com intervalo de tempo horário.

A variabilidade espacial da precipitação no modelo é considerada através da interpolação dos dados de postos pluviométricos para o centróide de cada minibacia. Nesse processo é normalmente utilizado o método do inverso do quadrado da distância. O tipo de vegetação e uso do solo dentro de cada minibacia é categorizado dentro de uma ou mais classes utilizando a abordagem de Unidades de Resposta Hidrológica-URH (Kouwen, 1993). As URH's são áreas de comportamento hidrológico similar, definidas pela combinação dos mapas de tipo e uso do solo. Dessa forma, o balanço hidrológico é calculado para cada URH em cada minibacia e as vazões estimadas em cada URH são posteriormente somadas e propagadas até a rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando um método baseado na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma

relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. A evapotranspiração é estimada pelo método de Penman – Monteith.

A propagação de vazão é realizada em duas etapas. Em primeiro lugar é realizada a propagação de vazão no interior da minibacia, utilizando-se modelos de reservatórios lineares simples. Cada minibacia tem três reservatórios lineares que representam a propagação dos escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo. A vazão de saída dos três reservatórios é somada e propagada pela rede de drenagem utilizando o método Muskingum-Cunge.

Embora alguns processos sejam representados de forma empírica, o modelo hidrológico conta com uma forte base física, o que fortalece a relação entre os parâmetros e as características físicas da bacia. Uma descrição mais detalhada do modelo é apresentada por Collischonn (2001), Collischonn e Tucci (2001), e Paiva (2009).

#### ***2.5.2.1. Medidas de Desempenho Geralmente usadas no MGB-IPH***

Para a calibração do modelo hidrológico MGB-IPH tradicionalmente são consideradas avaliações subjetivas de ajuste dos hidrogramas e medidas de desempenho quantitativas, ou funções objetivo (Fan e Collischonn, 2014).

No caso deste trabalho, foi considerada esta mesma metodologia tradicional, onde as medidas de desempenho consideradas na calibração foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões simuladas e observadas (ENS); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões simuladas e observadas (ENSlog); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas ( $\Delta V$ ). Estas estatísticas são apresentadas a seguir.

#### **O coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões**

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma forma de medir o quanto os resultados do modelo são melhores que aqueles que seriam obtidas por um modelo alternativo que prevê simplesmente a média de longo período dos dados observados.

O valor é adimensional e pode variar entre  $-\infty$  a 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo é bastante superior a média de longo termo. Valores próximos de zero indicam que o modelo é tão ruim como a média. Valores positivos indicam que o modelo é melhor do que a média. Valores negativos indicam que o modelo é pior do que a média.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é calculado pela Equação 14:

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QOm)^2} \quad (14)$$

em que  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $N$  é o número de intervalos de tempo; e  $QOm$  é a média das vazões observadas no período de  $N$  intervalos de tempo.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa.

### O coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado com os dados de vazão ou com os dados de vazão transformados por algum procedimento, como a raiz quadrada, o inverso ou os logaritmos. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão. Enquanto o coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões, o índice para o logaritmo das vazões favorece ajustes nas vazões menores.

Com a mesma interpretação que o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões tem um valor adimensional que pode variar entre  $-\infty$  e 1.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões é calculado pela Equação 15:

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QO_i) - QOm\text{Log})^2} \quad (15)$$

em que  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $N$  é o número de intervalos de tempo; e  $QOm\text{Log}$  é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de  $N$  intervalos de tempo.

### O erro relativo de volume

O erro relativo de volume (Equação 16) é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de superestimativa ou subestimativa da vazão. O erro relativo de volume é

adimensional mas pode ser apresentado em termos percentuais. Um erro relativo de -20%, por exemplo, indica que o modelo hidrológico gera, ao longo de todo o período de simulação, uma vazão média 20% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume deveriam se manter numa faixa de -10% a +10%, que pode ser considerada razoável em função das incertezas da curva-chave e dos próprios dados medidos.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad (16)$$

onde  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $N$  é o número de intervalos de tempo.

### 2.5.2.2. Metodologia empírica de assimilação de dados no modelo MGB-IPH

A assimilação de dados no modelo MGB-IPH é realizada através de um método empírico que utiliza as vazões observadas em tempo real para atualizar as variáveis de estado do modelo, representadas pelas vazões calculadas ao longo da rede de drenagem e pelo volume de água armazenado nos reservatórios superficial, subsuperficial e subterrâneo do modelo hidrológico (Paz *et al.*, 2007; Meller *et al.*, 2012; Fan *et al.*, 2015a).

A atualização das variáveis do modelo se dá através de um fator de correção (FCA), definido como o quociente entre o somatório das vazões observadas e calculadas ao longo de uma janela de tempo imediatamente anterior ao início da previsão, conforme apresentado na Equação 17:

$$FCA_s = \frac{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{obs}^t}{\sum_{t=t_0-t_a}^{t_0} Q_{calc}^t} \quad (17)$$

em que  $Q_{obs}$  e  $Q_{calc}$  são as vazões observadas e calculadas, respectivamente;  $t$  é o tempo de cálculo;  $t_0$  é o instante de tempo da realização da previsão;  $t_a$  é o intervalo de tempo durante o qual é feita a comparação entre valores calculados e observados (definido previamente) e  $s$  representa o ponto de exutório da sub-bacia, onde existe um posto fluviométrico com dados observados usado para atualização do modelo.

A cada intervalo de tempo de previsão os fatores de correção são calculados e aplicados às variáveis de estado do modelo, para cada uma das minibacias simuladas. No caso da atualização das vazões na rede de drenagem, o fator FCA é ponderado pela área de drenagem relativa de cada minibacia. Assim, as correções da vazão na rede de drenagem no



método são mais fortes em minibacias localizadas sobre a drenagem principal, que possuem maiores áreas de drenagem acumuladas.

Na minibacia onde existem dados fluviométricos, as vazões observadas são usadas em lugar das calculadas pelo modelo. Para as demais minibacias, as vazões calculadas pelo modelo são atualizadas de acordo com a Equação 18.

$$Q_{at_{i,s}} = FCA_s \cdot Q_{calc_i}^t \cdot (A_i/A_s)^{ebac} + Q_{calc_i}^t \cdot [1 - (A_i/A_s)^{ebac}] \quad (18)$$

em que  $Q_{at_{i,s}}$  é o valor atualizado da vazão na rede de drenagem na minibacia  $i$ , localizada a montante do ponto  $s$ ;  $A_i$  é a área de drenagem acumulada na minibacia  $i$ ;  $A_s$  é a área de drenagem acumulada na minibacia de exutório da sub-bacia, onde existem dados observados e  $ebac$  é um parâmetro com valores entre 0 e 1 que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

Na atualização do volume de água armazenada nos três reservatórios conceituais o mesmo fator de correção (FCA) aplicado à atualização da vazão na rede de drenagem é utilizado. Para os reservatórios, entretanto, a ponderação ocorre em função da fração do escoamento originária dos reservatórios, representada pela variável  $PBi$ . A correção dos volumes dos reservatórios conceituais é dada por:

$$VBat_{i,s} = (FCA_s)^{bx} \cdot VB_i \cdot (PB_i) + VB_i \cdot (1 - PB_i) \quad (19)$$

quando  $PBi > PB_{lim}$ , isto é, quanto a fração de água de origem subterrânea escoando no rio, estimada pelo modelo, é superior a um limite pré-determinado ( $PB_{lim}$ ).

Quando  $PBi < PB_{lim}$ , isto é, quanto a fração de água de origem subterrânea escoando no rio estimada pelo modelo é inferior a um limite pré-determinado ( $PB_{lim}$ ), a correção dos volumes é dada por:

$$VBat_{i,s} = VB_i \quad (20)$$

em que  $VBat_{i,s}$  é o volume atualizado no reservatório na minibacia  $i$ , situada a montante de  $s$ ;  $VB_i$  é o volume calculado do reservatório conceitual na minibacia  $i$ ;  $PBi$  é a fração da vazão na rede de drenagem originária do reservatório conceitual,  $PB_{lim}$  é a fração mínima de água necessária para que haja a correção dos reservatórios conceituais do modelo e  $bx$  é um parâmetro de atualização com valores entre 0 e 1 que deve ser definido de forma a encontrar uma boa concordância entre as vazões previstas e observadas.

De aplicações anteriores do modelo MGB-IPH (Meller, 2012), os valores de  $PB_{lim}$  assumem valores próximos a 30%. De acordo com Paz *et al.* (2007), quando o parâmetro  $bx$  assume valores próximos de 1, a atualização dos volumes dos reservatórios conceituais do modelo é relativamente rápida.

No caso da aplicação da Equação 20 a variável de estado do modelo não é atualizada. No caso da aplicação da Equação 19 a variável de estado do modelo é atualizada, sendo o valor original substituído por um valor que depende do Fator de Correção de Atualização (*FCA*) e do percentual de vazão de base estimada no momento em que está sendo feita a correção. Isto significa que, durante as estiagens mais prolongadas, quando uma fração maior da água escoando no rio tem origem subterrânea, é realizada uma correção praticamente integral do *FCA*. Durante as cheias, quando boa parte do escoamento é superficial, por outro lado, nenhuma alteração é feita na variável de estado relacionada ao armazenamento de água subterrânea, como mostra a Equação 20.

É válido destacar que esta assimilação de dados que altera os estados do modelo hidrológico, ao contrário de uma simples correção das saídas, tem a vantagem de se propagar espacialmente e temporalmente pela simulação, já que ela age diretamente no modelo hidrológico.

Maiores detalhes sobre o funcionamento da assimilação de dados no modelo e um estudo de caso de análise de sensibilidade do método sobre os resultados de previsões de vazão podem ser encontrados em Paz *et al.* (2007), Meller (2012) e Fan *et al.* (2015a).

## 2.6. Comentários Finais Sobre a Revisão Bibliográfica

O presente capítulo começou apresentando uma revisão sobre métodos de previsão de vazão existentes e os fatos que levaram ao desenvolvimento de sistemas de previsão por conjunto. Após, foi apresentado um levantamento de estudos sobre o tema e quais são os principais resultados encontrados. Foram discutidos os recentes avanços relacionados com a operacionalização deste tipo de previsão, e como o Brasil está posicionado em relação a todos estes aspectos na atualidade.

Além destes assuntos relacionados com previsão de vazão, na segunda parte da revisão bibliográfica foram revisados os temas relacionados com instrumentos usados neste trabalho, que são as formas de apresentação de previsão, métodos de avaliação de previsões, modelagem hidrológica, assimilação de dados, e o modelo MGB-IPH.

No que se refere à primeira parte da revisão bibliográfica, mostrou-se que existe ainda uma grande carência de conhecimento sobre previsão de vazão no Brasil, especialmente no que se refere ao tema de previsões por conjunto.

---

Assim, esta pesquisa de doutorado se propõe a auxiliar no preenchimento desta lacuna de conhecimento, com a investigação de potenciais benefícios em termos de qualidade para o uso de previsões por conjunto para grandes bacias hidrográficas tropicais no território brasileiro.

Em relação ao conhecimento local existente acredita-se que este trabalho se diferencia pela escala de trabalho, horizontes de previsão avaliados, produtos utilizados, comparação entre múltiplas bacias, e usos das previsões. E em relação ao cenário global de conhecimento, acredita-se que um diferencial importante é a região de estudo (pouco investigada até o momento), além da escala de trabalho, avaliação comparativa entre bacias, e a contribuição para o debate sobre o benefício ou não do uso combinado de modelos meteorológicos.

Também, os objetivos desta pesquisa estão em consoância com os objetivos da iniciativa internacional de banco de dados TIGGE, cujos esforços de criação incluem permitir uma melhor compreensão das combinações de conjuntos de previsões de diferentes fontes, uma compreensão maior sobre as incertezas de modelos e o aumento da colaboração em pesquisa na previsão por conjunto. Além disso, este é o primeiro estudo em que a informação do TIGGE é usada para fins de previsão hidrológica na América do Sul. Os objetivos também estão em consoância com a iniciativa científica internacional HEPEX, cuja missão é mostrar o valor de previsões hidrológicas por conjunto, e um dos seus temas de trabalho é a verificação de previsões.

Acredita-se assim estar contribuindo para o desenvolvimento da operacionalização deste tipo de abordagem de previsão de vazão e de pesquisa sobre propostas de técnicas que podem posteriormente ser empregadas em sistemas de previsão.

---

### 3. Metodologia

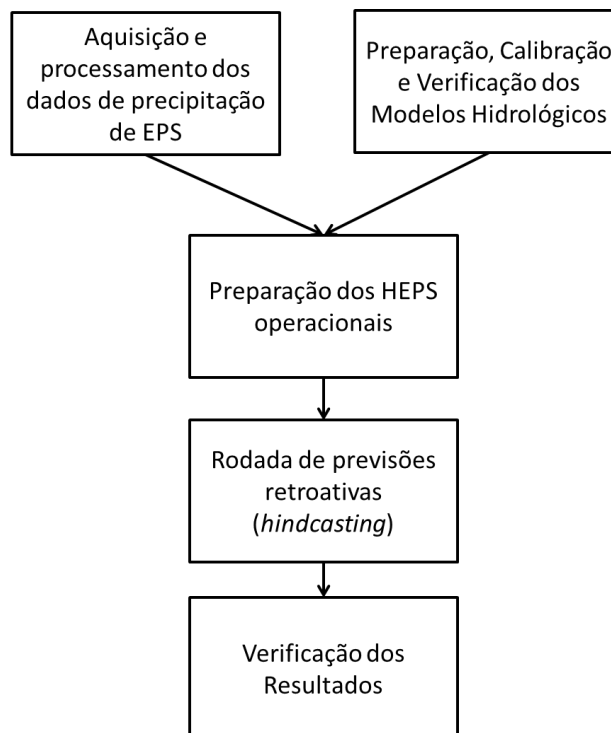
A metodologia utilizada na presente investigação consistiu em cinco etapas de trabalho. Primeiro, foi realizada a preparação e a calibração do modelo hidrológico utilizado nos experimentos para as bacias de estudo de caso.

Posteriormente, foram obtidos e preparados os dados de entrada meteorológicos provenientes dos EPS selecionados para a realização dos experimentos.

Foram desenvolvidos então HEPS operacionais com a combinação dos modelos hidrológicos alimentados pelos dados dos EPS. Estes HEPS foram rodados de forma retrospectiva para um período do passado definido em função dos dados disponíveis para cada bacia na forma de experimentos de previsões retroativas (*hindcasting*).

Ao final, todos os resultados gerados foram avaliados visando responder as questões propostas nos objetivos do estudo.

Esta metodologia seguiu um padrão linear, com atividades sequencias, e ela é representada através do fluxograma da Figura 12. Nas seções a seguir os materiais e métodos adotados em cada uma das etapas do trabalho são descritos.



**Figura 12. Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho.**

### 3.1. Modelagem Hidrológica

O modelo hidrológico utilizado no presente estudo foi o MGB-IPH, descrito no capítulo de revisão bibliográfica. Ele foi selecionado para a realização desta pesquisa por que suas características se enquadram dentro das necessidades da investigação, e devido ao seu crescente uso no cenário brasileiro para a realização de previsões de vazões em bacias de grande escala.

Maiores detalhes sobre os dados de entrada utilizados na modelagem, a discretização adotada nas bacias hidrográficas para a realização da modelagem, e os resultados de calibração do modelo hidrológico são apresentados no Capítulo 4, de apresentação dos estudos de caso. No mesmo capítulo, é apresentada a configuração de assimilação de dados utilizada nos ensaios de previsão de vazão.

### 3.2. Dados de Previsão Meteorológica

Os dados de previsão meteorológica utilizados neste estudo foram provenientes da base de dados do TIGGE (Bougeault, 2010), descrita na revisão bibliográfica.

Dentre todos os EPS disponíveis no TIGGE, foram selecionados três: ECMWF, GEFS, e CPTEC.

A limitação para que mais dados não fossem também testados foi a grande quantidade de dados a ser adquirida e processada. Todavia, acredita-se que as três bases selecionadas sejam suficientes para responder às questões de pesquisa propostas.

As previsões provenientes dos modelos ECMWF e GEFS foram escolhidas por estarem disponíveis para todo o globo terrestre, serem amplamente usadas em diversos sistemas de previsão operacionais (Thielen *et al.*, 2009; Hagedorn *et al.*, 2012; Demargne *et al.*, 2014; Alfieri *et al.*, 2013; Thiemiig *et al.*, 2014), e por possuírem um bom desempenho na previsão de chuvas conforme diversos estudos recentes (Hamill *et al.*, 2000; Wei and Toth, 2003; Buizza *et al.*, 2005; Bowler, 2006; Leutbecher e Palmer, 2008; Park *et al.*, 2008; Bougeault *et al.*, 2010).

Já as previsões do CPTEC foram escolhidas por que são geradas pelo centro brasileiro, e assim são sempre uma das primeiras opções a serem consideradas em sistemas de previsão de vazão por ensemble a serem desenvolvidos para no cenário nacional.

Como previsão determinística de referência adotada para a comparação com os resultados dos ensembles foi escolhida a previsão de alta resolução do ECMWF, também disponibilizada na base de dados do TIGGE. Ela foi escolhida pelo seu conhecido bom desempenho em relação a outros sistemas de previsão (Buizza *et al.*, 2005; Hagedorn *et al.*, 2012), e por que o CPTEC não possui previsão determinística de alta resolução disponível nesta base de dados usada.

Cabe aqui destacar que, segundo Berbery *et al.* (2005), o ECMWF pode ser considerado o centro que produz as previsões com maior qualidade em uma perspectiva global.

Além da análise dos resultados dos desempenhos das previsões individualmente, também foram analisados os resultados obtidos com o uso de um “Super Ensemble” (assim denominado neste trabalho) formado pela combinação dos resultados dos três EPS testados. O objetivo foi verificar se é possível obter melhores resultados com a combinação de dados dos diferentes modelos meteorológicos por conjunto na forma de um conjunto maior, que levaria em conta também a deficiência da estrutura de modelos meteorológicos, ao combinar resultados de mais de um modelo.

Uma breve descrição dos dados destes EPS disponíveis na base de dados do TIGGE e selecionados para esta investigação é dada a seguir. Também são dadas informações de como foi composto o Super Ensemble. Uma reprodução da documentação disponível no portal do TIGGE dos EPS utilizados neste trabalho é apresentada no Anexo C deste texto, onde podem ser conferidos mais detalhes sobre os modelos.

### **3.2.1. ECMWF-pf (ECMWF probabilístico, ou por ensemble)**

Os dados do EPS do ECMWF disponíveis na base do TIGGE são provenientes do modelo global de previsão por ensemble operado neste centro de previsões, que é plenamente descrito por Buizza *et al.*, 2007. O EPS possui 50 membros, onde o mecanismo utilizado para a geração das condições iniciais perturbadas é baseado em uma técnica denominada *Singular Vector (SV) based method to identify the directions* (Buizza and Palmer 1995; Molteni *et al.* 1996).

As previsões de precipitação disponíveis possuem 15 dias de horizonte de previsão, com uma resolução horizontal da grade de aproximadamente 32km (T639) para os primeiros 10 dias, e aproximadamente 63km (T319) para os demais 5 dias. As previsões estão

disponíveis duas vezes por dia às 00h UTM e às 12h UTM. O intervalo de tempo em que a QPF está disponível é de 6h. Ou seja, os dados são agregados para cada 6h de antecedência de previsão.

### 3.2.2. ECMWF-fc (ECMWF determinístico)

Os resultados de previsão do ECMWF determinístico foram usados como a previsão determinística de referência no presente estudo. O ECMWF determinístico (ECMWF-fc) consiste em uma rodada do modelo global do ECMWF com as condições iniciais consideradas as melhores estimativas possíveis das condições reais da atmosfera (Buizza *et al.*, 2007).

A principal diferença dele em comparação com os ensembles é que ele é gerado com uma resolução espacial horizontal maior, de aproximadamente 16km (T1279) para todo o horizonte de previsão. Além disso, o horizonte de previsão é de 10 dias, e não de 15 dias, como o ensemble.

### 3.2.3. GEFS (modelo ensemble do NCEP/NOAA)

Os dados do NCEP/NOAA disponíveis na base do TIGGE são provenientes de rodadas do Global Ensemble Forecasting System (GEFS), descrito em Toth *et al.* (2003); Toth e Kanlay (1993), Toth e Kalnay (1997) and Wei *et al.* (2008). O EPS possui 20 membros produzidos a partir de perturbações nas condições iniciais através de uma técnica chamada *Ensemble Transform with Rescaling (ETR)* (Cui *et al.*, 2012)

As previsões de precipitação possuem 15 dias de horizonte de previsão, com uma resolução horizontal da grade de aproximadamente 90km (T126), disponíveis quatro vezes por dia às 00h, 06h, 12h, 18h UTM. Contudo, para este trabalho somente foram utilizadas as previsões disponibilizadas às 00h e às 12h UTM, de forma que as análises sejam compatíveis entre os diferentes EPS usados. O intervalo de tempo em que a QPF está disponível é de 6h. Ou seja, os dados são agregados para cada 6h de antecedência.

É importante comentar que a versão disponível do modelo GEFS na base de dados do TIGGE, e usada nesta pesquisa, não é a versão mais atualizada do modelo. Pois ele sempre está em constante atualização pela sua equipe de desenvolvimento e manutenção na NOAA. Atualizações do modelo que ocorreram durante a realização desta pesquisa são mostradas, por exemplo, em Hamil *et al.* (2012). Como objetivo da Tese não é comparar modelos e apontar

qual é melhor ou pior na atualidade, mas sim verificar se os diferentes modelos mostram diferenças significativas entre eles, e também para manter uma homogeneidade na base de dados usada (todos dados provindos dos arquivos do TIGGE e da mesma versão do modelo), julga-se que o uso apenas dos dados disponíveis no TIGGE não é um problema para as conclusões desejadas.

#### **3.2.4. CPTEC-pf (CPTEC probabilístico, ou por ensemble)**

Os dados do CPTEC disponíveis na base do TIGGE são provenientes do modelo global de circulação atmosférica (*Atmospheric Global Circulation Model - AGCM*) do CPTEC/INPE (Cunningham and Bonatti, 2011; Mendonça *et al.*, 2009; Cavalcanti *et al.*, 2002). O EPS possui 14 membros, onde o mecanismo utilizado para a geração das condições iniciais perturbadas é baseado no método aplicado por Zhang e Krishnamurti (1999), e é denominado *EOF-based perturbation*.

As previsões de precipitação possuem 15 dias de horizonte de previsão, com uma resolução horizontal da grade também de aproximadamente 90km (T126), disponíveis duas vezes por dia às 00h UTM e às 12h UTM. O intervalo de tempo em que a QPF está disponível também é de 6h. Ou seja, os dados são agregados para cada 6h de antecedência.

Assim como comentado para o GEFS, é importante comentar que durante o andamento da presente pesquisa foi desenvolvida e passou a ser distribuída uma nova versão do modelo global do CPTEC de previsão por ensemble. E até o fechamento da Tese os dados do modelo não estavam sendo enviados para a base de dados do TIGGE. Assim, a versão usada na pesquisa não necessariamente é a versão mais atual do modelo. Todavia, os dados desta nova versão não estão disponíveis para todo o período de testes deste estudo, portanto, poderiam ser usados somente para um pequeno período. E como o objetivo da Tese não é comparar modelos e apontar qual é melhor ou pior, mas sim verificar se diferentes modelos mostram diferenças entre eles e em diferentes regiões, e também para manter uma homogeneidade da base de dados usada (todos dados provindos dos arquivos do TIGGE e da mesma versão do modelo), julgou-se que o uso apenas dos dados disponíveis no TIGGE não afeta as conclusões obtidas.



### 3.2.5. Super Ensemble

O Super Ensemble, assim denominado, consiste no conjunto de previsões formado pela combinação dos três EPS testados (ECMWF-pf, GEFS, e CPETC-pf). A combinação realizada neste trabalho consistiu na simples combinação de todos os membros das previsões por conjunto, resultando em um super conjunto de previsões de vazão com 84 membros, onde todos os membros possuem o mesmo peso.

Além da forma testada nesta pesquisa, existem muitas formas de se realizar esta combinação, como uma redução de todos os conjuntos para uma mesma quantidade de membros, amostragens estatísticas dos conjuntos, entre outras (Bougeault *et al.*, 2010).

Contudo, nesta pesquisa optou-se por testar a forma mais simples de combinação, que é a simples agregação dos conjuntos, assim como foi feito nos trabalhos de He *et al.* (2009) e Park *et al.* (2008). Esta escolha, por ser a mais simples, naturalmente se apresenta como a primeira a ser avaliada. Todavia, ela também é uma recomendação dos trabalhos de Park *et al.* (2008), Johnson e Swinbank (2009), e Peña e Van den Dool (2008) que também testaram outras formas de combinação e concluíram que elas não afetam os resultados de forma significativa.

## 3.3. Processamento das previsões de chuva para uso no modelo hidrológico

A Figura 13 apresenta um comparativo das quatro fontes de dados meteorológicos utilizadas para um recorte que corresponde a região Sudeste do Brasil. É mostrada uma previsão da chuva total acumulada entre o dia 01/01/2010 até o dia 05/01/2010, onde para os ensembles é mostrado o resultado da média do conjunto.

Neste exemplo específico apresentado na Figura 13 nota-se que as quatro fontes de dados apontam para resultados diferentes de ocorrência de chuva na região. Ainda, é possível visualizar a diferença entre a resolução espacial dos modelos.

Para a utilização no modelo hidrológico os dados de previsão quantitativa de chuva foram desagregados para um passo de tempo horário de forma uniforme, e foram interpolados para o centróides das minibacias que compõem a bacia hidrográfica estudada através da técnica de inverso da distância ao quadrado (Collischonn e Dornelles, 2013).

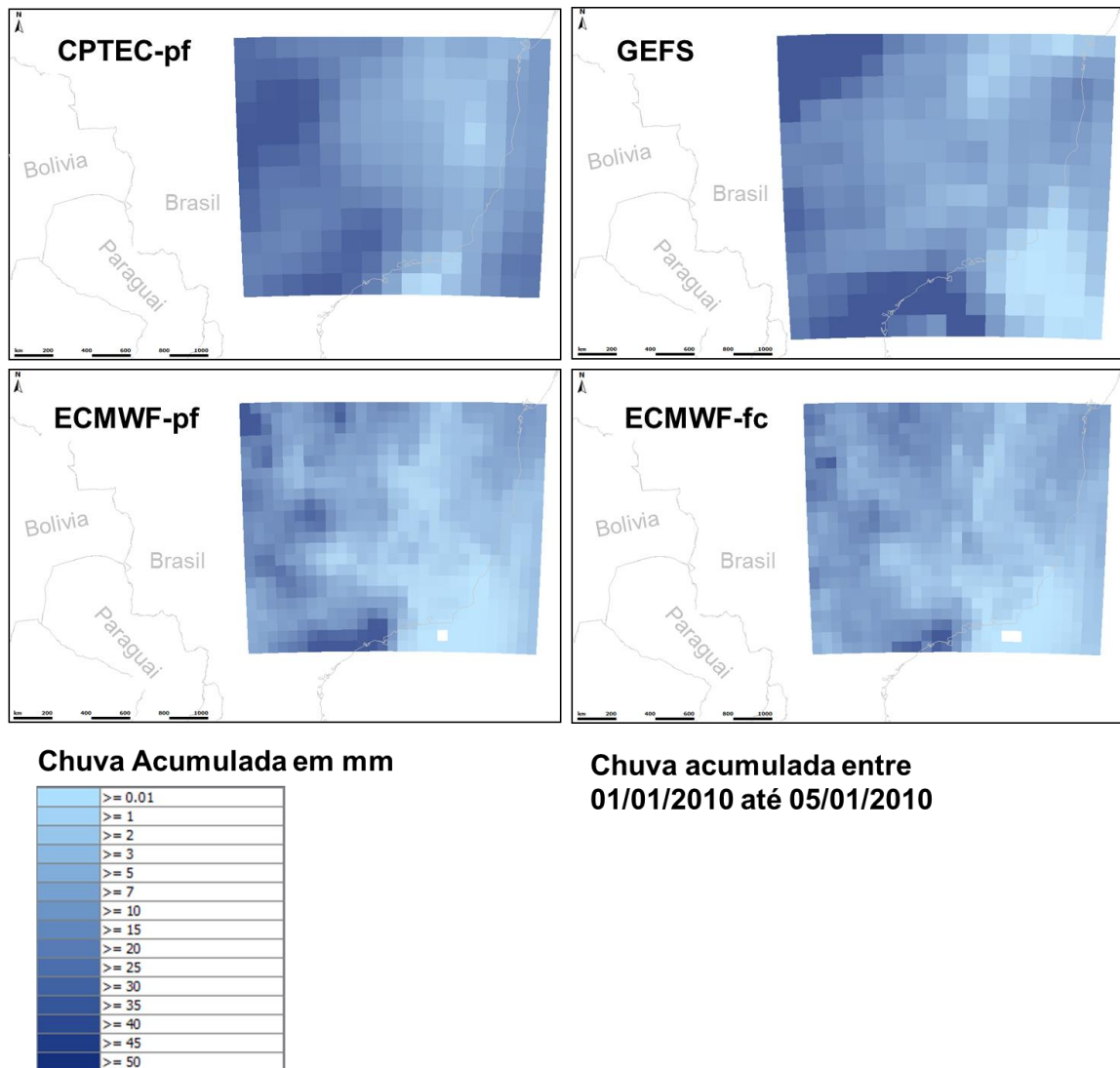


Figura 13. Comparativo das quatro fontes de dados meteorológicos utilizadas para a região Sudeste do Brasil

### 3.4. Integração e operacionalização dos modelos e dados

Todos os experimentos realizados neste trabalho foram realizados usando sistemas operacionais de previsão de vazão hidrológica desenvolvidos no contexto do trabalho.

Para tanto, os modelos hidrológicos calibrados e os dados das previsões meteorológicas dos EPS foram integrados dentro do sistema Delft-FEWS (*Flood Early Warning System*). O Delft-FEWS é um programa distribuído livremente pela desenvolvedora *Deltares* e sua descrição completa pode ser encontrada no artigo de Werner *et al.* (2013).

O Delft-FEWS consiste em um software especialmente desenvolvido para integrar dados e modelos de previsão de vazão na forma de sistemas operacionais. Ele é um programa

modular cujos compartimentos devem ser programados de acordo com os requerimentos específicos dos modelos e dados sendo utilizados.

No caso deste trabalho, foram programados módulos dentro do Delft-FEWS para o processamento dos dados observados de chuva e vazão, processamento dos dados de previsões de chuva, rodadas do modelo hidrológico, e processamento dos dados de saída.

Além disso, foram desenvolvidas rotinas específicas dentro do modelo MGB-IPH para permitir a integração entre o sistema de gerenciamento de dados e o modelo hidrológico.

O benefício final complementar desta etapa de trabalho é o HEPS completamente operacional desenvolvido, e a maior facilidade de gerenciamento de dados das diversas fontes utilizadas.

### 3.5. Rodadas das previsões

Com os HEPS operacionalizados foi definida uma janela temporal de análise para cada uma das bacias estudadas, em função da disponibilidade de dados local. Dentro desta janela temporal de análise foram rodadas duas previsões por ensemble retrospectivas, uma às 00h e outra às 12h UTC, utilizando os dados dos EPS obtidos da base de dados do TIGGE.

Além das previsões com os dados dos EPS, também foram processadas previsões utilizando o modelo determinístico de referência ECMWF-fc.

Adicionalmente também foram rodadas previsões utilizando chuva observada no horizonte de previsão, que também foram utilizadas como referência de comparação com o desempenho do modelo. Nestes testes, a chuva prevista para os próximos 15 dias (horizonte de previsão) foi assumida como sendo igual à chuva que efetivamente foi captada pela rede telemétrica. Muitas vezes esse tipo de teste é chamado também de teste com chuva “perfeita”, por que se usa chuva observada ao invés da precipitação prevista por modelos. Com ele, é possível avaliar a resposta do sistema às suas previsões considerando o que realmente precipitou ao longo do horizonte de previsão.

Contudo, é importante advertir que mesmo a chuva observada não é efetivamente perfeita, já que redes telemétricas esparsas muitas vezes não são capazes de captar com perfeição a correta distribuição espacial da precipitação nem seu correto volume em toda bacia.

Apesar da existência de outros produtos de chuva que poderiam ser aplicados nos sistemas de previsão baseados em sensoriamento remoto e combinação de dados pontuais como os produtos do TRMM Real-Time (Huffman *et al.*, 2007), CoSch (Vila *et al.*, 2009),

MERGE (Rozante *et al.*, 2010), entre outros, optou-se por utilizar neste trabalho somente a chuva que é atualmente efetivamente utilizada nos sistemas de previsão. Isto foi feito para manter nesta pesquisa o aspecto de avaliação de sistemas atualmente operacionais, e não sistemas idealizados. Isto também foi feito pelo autor Wu *et al.* (2014), que comenta em seu trabalho que também utiliza uma chuva operacional, e não uma “chuva acadêmica” idealizada.

Outro motivo pelo qual não foi utilizada uma chuva idealizada é o fato de que não se sabe ainda com total certeza o benefício do uso destes tipos de produtos que mesclam informações de estações e de satélite e informações da rede telemétrica na previsão hidrológica. Esta é uma área de estudo atualmente em desenvolvimento, onde muitas pesquisas como as de Fan *et al.* (2015b), Fan *et al.* (2014c), Quiroz e Collischonn (2013), Quiroz e Collischonn (2014), Wu *et al.* (2014), Chiang *et al.* (2007) e Su *et al.* (2011) já mostram resultados promissores. Todavia, para os estudos de caso desta pesquisa a preparação e a avaliação de diferentes produtos e formas de composição de dados de chuva para a aplicação nos modelos vão além do escopo desta Tese.

### **3.6. Avaliação dos Resultados**

As previsões testadas neste trabalho foram avaliadas de diferentes formas em função da variável testada. Os resultados de chuva foram analisados de maneira um pouco mais simplificada que os resultados de vazão. Eles foram analisados considerando a chuva média sobre as bacias hidrográficas, acumulada em 24h, através das métricas apresentadas de forma detalhada na revisão bibliográfica (Capítulo 2, Seção 2.4).

Já os resultados de vazão, foram avaliados através de duas aproximações. Primeiro, foi feita uma avaliação visual das previsões através da comparação de hidrogramas nas principais cheias em locais de interesse onde dados observados estão disponíveis. Posteriormente, os resultados foram avaliados também através das estatísticas apresentadas no capítulo de revisão bibliográfica. Estas análises foram feitas em passo de tempo horário.

O cálculo das métricas foi realizado utilizando rotinas próprias, desenvolvidas em linguagem de programação VB .NET e Matlab, e conferido utilizando a ferramenta Ensemble Verification System, apresentada por Brown *et al.* (2010).

## 4. Estudos de Caso

Como estudos de caso desta Tese foram selecionadas três bacias hidrográficas brasileiras de grande escala. Estas bacias foram selecionadas previamente em função dos potenciais benefícios no uso de previsões para a antecipação de cheias e para a operação de reservatórios, e da disponibilidade de dados telemétricos para o desenvolvimento de sistemas de previsão de vazão operacionais.

Por que foram selecionadas três bacias? Basicamente por que se buscou fazer o retrato mais amplo possível dos benefícios de previsões por ensemble dentro do território Brasileiro usando sistemas operacionais de previsão. Com a avaliação de três bacias é possível verificar se diferenças nos desempenhos encontrados entre modelos meteorológicos estão relacionadas com questões de localização geográfica e escala de trabalho. Também, é possível relacionar o desempenho de previsões de vazão com a diferente disponibilidade de dados das bacias hidrográficas, e as diferentes configurações de controle da água ao longo dos rios (existência de reservatórios).

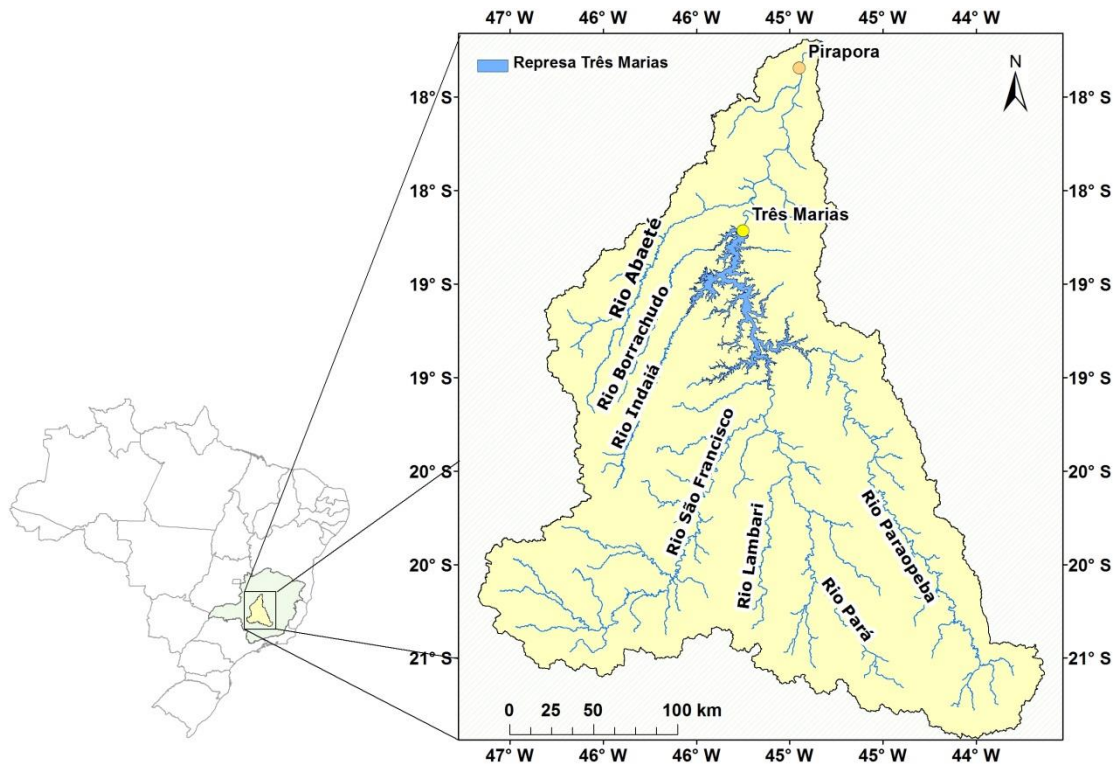
Finalmente, quando estudos de avaliações de previsões de vazão são conduzidos, geralmente eles são limitados pelas curtas séries temporais de dados disponíveis, especialmente se tratando de estudos com dados horários. Uma dificuldade para superar a amostra pequena em termos temporais é o uso de uma maior amostra em termos espaciais. Ou seja, que sejam testadas mais bacias. Com isso, é possível compensar a falta de ocorrência de muitos eventos para serem avaliados ao longo do tempo com a avaliação de mais eventos em locais diferentes.

### 4.1. Bacia do aproveitamento de Três Marias (alto rio São Francisco)

O primeiro estudo de caso desta pesquisa é a bacia hidrográfica da Usina Hidroelétrica (UHE) Três Marias, na região de montante da bacia do rio São Francisco, localizada na região central de Minas Gerais, no Sudeste Brasileiro. No local da barragem a área de drenagem é de aproximadamente 50.000km<sup>2</sup>.

Contudo, devido aos possíveis impactos da operação do reservatório a jusante, a área de interesse deste estudo de caso se estende até a cidade de Pirapora, localizada a 120km de distância a jusante do barramento, com uma área de drenagem total de aproximadamente

60.000km<sup>2</sup>. A Figura 14 apresenta a localização da área de estudo, com destaque para a cidade de Pirapora e a UHE Três Marias.



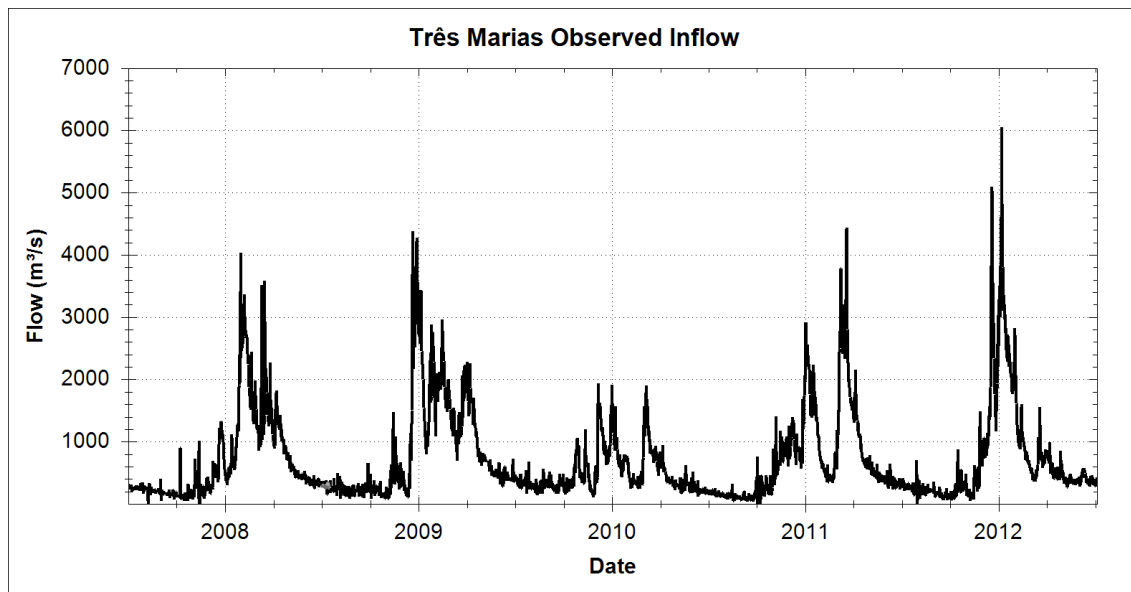
**Figura 14.** Localização da área de estudo e pontos de maior interesse para a previsão de vazões nesta bacia, que são a cidade de Pirapora e a UHE Três Marias.

A UHE Três Marias é mantida pela CEMIG (*Companhia Energética de Minas Gerais*), possui um reservatório de aproximadamente 20 bilhões de m<sup>3</sup> que desempenha um papel importante na regularização do rio São Francisco, e é usado para propósitos como geração de energia (potência instalada de 396 MW), navegação, abastecimento municipal e industrial, e de projetos de irrigação. O controle de cheias é um uso adicional do reservatório, que deve ser operado para tentar minimizar situações de cheia na cidade de Pirapora.

A Figura 15 apresenta o hidrograma da vazão afluente a Três Marias entre os anos de 2008 e 2013. A afluência ao reservatório é calculada pela CEMIG através do balanço hídrico de volume de água baseado em medidas de afluências pelas turbinas e vertedor, e medidas de nível do lago. Este método aplicado em intervalo de tempo horário resulta em vazões com “ruído” nos dados. Desta forma, uma média móvel de 12h é aplicada para diminuir este efeito de ruído, mas ainda assim é possível ver no hidrograma que ele não é totalmente removido. Outra informação mostrada pela Figura 15 é que a bacia possui uma sazonalidade bem marcada, onde as cheias ocorrem geralmente entre Dezembro e Março, chegando a valores de

afluência de até  $6000\text{m}^3/\text{s}$ . Já o período seco ocorre geralmente entre Agosto e Setembro, com vazões chegando até aproximadamente  $100\text{m}^3/\text{s}$ . A vazão afluente média da UHE Três Marias é de  $600\text{m}^3/\text{s}$ .

Neste estudo, esta vazão afluente ao reservatório é usada para comparar os resultados das previsões por conjunto.



**Figura 15.** Hidrograma da vazão afluente a Três Marias entre os anos de 2008 e 2009, calculado através do balanço hídrico e filtrado com uma média móvel de 12h.

Uma implicação extra deste caso é que as cheias na cidade de Pirapora são parcialmente causadas pelo rio Abaeté, que aflui a jusante da barragem, e, portanto não está sujeito ao controle do reservatório, como pode ser visto na Figura 14.

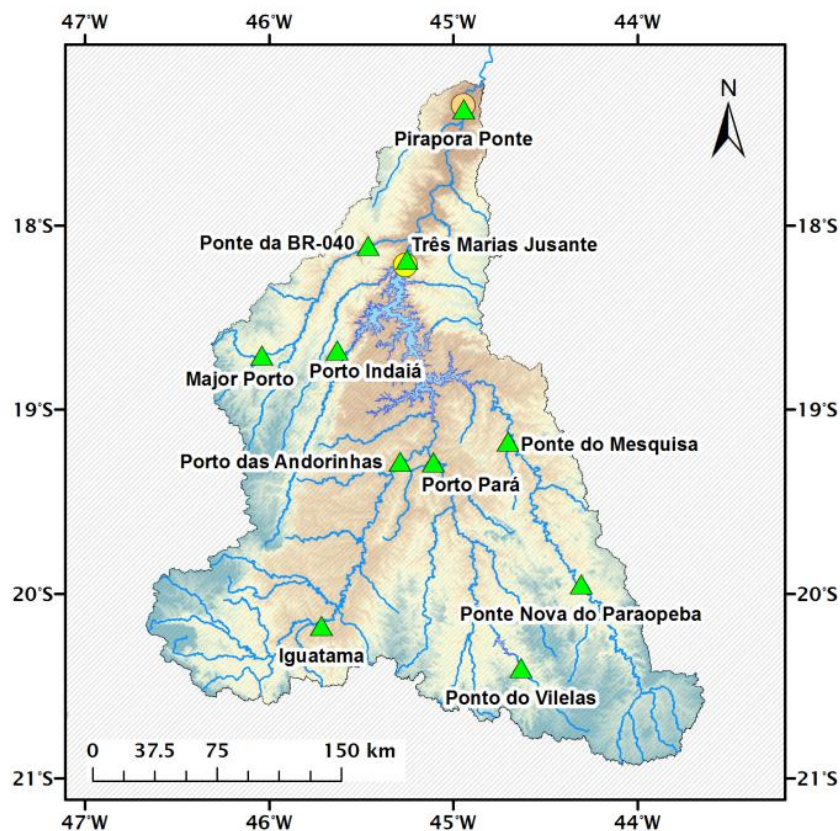
A bacia do rio Abaeté até a confluência com o rio São Francisco tem uma área de aproximadamente  $5.224\text{km}^2$  e apresenta uma resposta relativamente rápida a chuvas.

Quando cheias são verificadas no rio Abaeté os operadores da UHE Três Marias devem tomar em conta as vazões crescentes e procurar liberar menos água do reservatório para evitar possíveis cheias em Pirapora. Por este motivo, os dois lugares de maior interesse para previsões de vazões neste estudo de caso são o Rio Abaeté e a afluência de Três Marias.

#### 4.1.1. Dados disponíveis

Um aspecto distinto deste estudo de caso é que a bacia do alto São Francisco possui, em comparação com outras bacias no Brasil, uma rede telemétrica de medição de dados de chuva e vazão bem mantida e transmitindo dados em tempo real.

A Figura 16 apresenta a distribuição das estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia. A estação nomeada Ponte da BR-040 é a que monitora as vazões próximas do exutório do rio Abaeté. Os dados foram usados para a calibração e validação do modelo hidrológico, e posteriormente nos experimentos para a previsão de vazões.



**Figura 16. Estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia do alto São Francisco.**

Os dados de vazão em intervalo de tempo horário, disponibilizados pela CEMIG, são 11 postos fluviométricos localizados no rio São Francisco e em seus afluentes, conforme mostra a Figura 16. A Tabela 3 apresenta algumas características dos postos.



A disponibilidade temporal dos dados horários é razoável no intervalo de 1999 a 2013, sendo a maior quantidade de dados disponível a partir de 2006. Entretanto, independentemente da disponibilidade de informações, todos os postos fluviométricos disponíveis foram adicionados ao sistema de previsão desenvolvido.

**Tabela 3. Postos telemétricos com dados horários de chuva e vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na região de estudo da bacia do rio São Francisco.**

Nome	Lat	Long	Rio	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
Ponte Nova do Paraopeba	-19,948	-44,305	Paraopeba	5784
Porto Mesquita	-19,173	-44,702	Paraopeba	10450
Ponte dos Vilelas	-20,404	-44,631	Pará	2619
Porto Pará	-19,287	-45,110	Pará	11358
Iguatama	-20,173	-45,716	São Francisco	5485
Porto Andorinhas	-19,281	-45,289	São Francisco	14244
Porto Indaiá	-18,677	-45,631	Indaiá	2208
Três Marias Jusante	-18,187	-45,253	São Francisco	51098
Major Porto	-18,706	-46,040	Abaeté	1216
BR 040	-18,109	-45,461	Abaeté	5225
Pirapora Ponte	-17,368	-44,943	São Francisco	62369

#### 4.1.4. Calibração e verificação do modelo

Os postos fluviométricos considerados para a calibração do modelo foram os postos com dados horários, apresentados na Figura 16, exceto o posto Três Marias Jusante, que fica localizado imediatamente a jusante da Barragem de Três Marias. Este posto mede a vazão total defluente de Três Marias, a qual depende da operação de comportas e das turbinas, não sendo, portanto, uma vazão natural. Entretanto, os dados deste posto foram utilizados para substituir os dados calculados pelo modelo neste mesmo local. Assim, foi possível gerar vazões nos locais de jusante (como Pirapora) comparáveis às vazões observadas.

Os períodos de calibração e verificação foram, respectivamente:

- Calibração: de 01/12/2006 até 20/06/2011;
- Verificação: de 19/06/2000 até 01/12/2006.

O período de calibração foi escolhido em função da maior disponibilidade de dados observados.

#### 4.1.4.1 Resultados da Calibração

O modelo foi calibrado no período de 01/12/2006 até 20/06/2011. A Tabela 4 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para esta calibração.

**Tabela 4. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/12/2006 até 20/06/2011).**

Nome	ENS	ENSlog	$\Delta V$
Ponte Nova do Paraopeba	0,77	0,89	-9,9
Porto Mesquita	0,81	0,93	-3,6
Ponte dos Vilelas	0,80	0,86	8,0
Porto Pará	0,56	0,63	-14,9
Iguatama	0,88	0,90	-1,8
Porto Andorinhas	0,86	0,90	-6,6
Porto Indaiá	0,50	0,79	6,1
Três Marias Jusante	NA	NA	NA
Major Porto	0,64	0,28	-31,0
BR 040	0,76	0,81	-9,1
Pirapora Ponte	0,94	0,94	1,2

Nesta tabela se destacam positivamente os resultados nos postos fluviométricos de Porto Mesquita, Ponte dos Vilelas, Iguatama, Porto Andorinhas e Pirapora, com valores de *ENS* e *ENSlog* acima de 0,8 e erro de volume inferior a 10%. Os resultados também estão relativamente bons na Ponte Nova do Paraopeba e no posto BR040 do rio Abaeté, que é particularmente importante pelo efeito que tem sobre as cheias em Pirapora.

O resultado muito bom obtido em Pirapora deve-se, em grande parte, à substituição da vazão simulada pela observada no posto fluviométrico Três Marias Jusante.

Os piores resultados foram obtidos nos postos fluviométricos Porto Pará, Major Porto e Porto Indaiá.

O posto Porto Pará está localizado no rio Pará a jusante da barragem de Cajuru, logo a vazão neste local está sujeita à operação deste reservatório, o que não foi considerado nas simulações. Desta forma, a vazão calculada pelo modelo, que é uma aproximação da vazão natural da bacia (vazão se não houvesse o reservatório), foi comparada à vazão observada, que é uma vazão artificial influenciada pela operação do reservatório.

Os maus resultados em Porto Indaiá e em Major Porto devem-se, provavelmente, a falta de postos pluviométricos com dados horários na área de drenagem correspondentes a estes dois postos. Em ambos os casos os postos pluviométricos com dados horários mais importantes da região encontram-se no mesmo local em que são observadas as vazões, ficando o restante da área desprovida de dados de precipitação. Assim, as precipitações na bacia são estimadas basicamente por interpolação de postos pluviométricos relativamente distantes, o que compromete os resultados.

Adicionalmente, é válido destacar que nas bacias dos rios Abaeté e Indaiá os resultados são prejudicadas pela baixa densidade de postos pluviométricos, e ocorrem erros tanto nos picos como nas recessões dos hidrogramas simulados. Já na bacia do rio São Francisco, a montante de Porto Andorinhas, os hidrogramas apresentam um efeito de amortecimento das cheias em função da presença de várzeas inundáveis. O processo de inundação das várzeas foi constatado neste local do rio São Francisco durante uma visita de campo desde um trecho a montante de Iguatama, e especialmente entre Iguatama e Porto Andorinhas. Este efeito da planície ainda não é considerado na versão do modelo MGB-IPH que utiliza propagação por Muskingum-Cunge, que é a versão operacional mais atual do modelo, sendo aplicada nesta pesquisa.

Contudo, apesar destas dificuldades, consideram-se os resultados da calibração do modelo como satisfatórios para a realização de previsões hidrológicas.

#### ***4.1.4.2 Resultados da Verificação***

A verificação da calibração do modelo foi realizada com dados do período de 19/06/2000 até 01/12/2006. Neste período a disponibilidade de dados é menor do que no período de calibração, ou seja, o número de falhas de observação nos postos pluviométricos é maior neste período, o que certamente tem influência sobre os resultados. A Tabela 5 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para esta calibração.

**Tabela 5. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (19/06/2000 a 01/12/2006).**

Nome	ENS	ENSlog	$\Delta V$
Ponte Nova do Paraopeba	0,32	0,57	-15,1
Porto Mesquita	0,90	0,90	3,3
Ponte dos Vilelas	0,62	0,63	-8,4
Porto Pará	0,50	0,18	-33,3
Iguatama	0,71	0,83	-1,8
Porto Andorinhas	0,76	0,86	-4,3
Porto Indaiá	0,27	0,50	-37,8
Três Marias Jusante	NA	NA	NA
Major Porto	0,40	0,63	-41,2
BR 040	0,53	0,75	-29,2
Pirapora Ponte	0,54	0,62	-5,0

Na Tabela 5 se destacam positivamente os resultados no posto fluviométrico Porto Mesquita, que são até superiores aos resultados no período de calibração no caso do coeficiente de Nash-Sutcliffe. Os postos fluviométricos Iguatama e Porto Andorinhas, ambos no rio São Francisco, também mantêm valores relativamente bons das medidas de desempenho, principalmente para as vazões baixas (ENSlog).

Os resultados no posto fluviométrico Pirapora Ponte, no período de verificação, são relativamente ruins. Isto ocorre em parte como consequência das falhas nos dados observados no posto fluviométrico Três Marias Jusante. Estes dados são fundamentais porque são utilizados para substituir as vazões calculadas afluentes a UHE de Três Marias. Nos casos em que existem falhas nos dados observados do posto Três Marias Jusante, a substituição das vazões simuladas pelas observadas não é realizada, e considera-se que a UHE Três Marias opera a fio d'água, isto é, a vazão defluente é igual a afluente.

Os maus resultados nos postos fluviométricos Porto Pará foram comentados no item sobre a calibração, e estão relacionados à presença do reservatório Cajuru a montante do posto. Já os maus resultados em Porto Indaiá, Major Porto e BR 040 novamente estão relacionados a menor densidade de postos pluviométricos na região de drenagem a montante estes postos, lembrando ainda que o período de verificação apresenta mais falhas nas observações do que o período de calibração.

Os resultados da validação, embora não sejam tão bons quanto os da calibração (em função do exposto acima), não invalidam os resultados do modelo, visto que existe uma tendência geral dos resultados do modelo melhorarem à medida que mais informações

hidrológicas são disponibilizadas para a realização de simulações/previsões e que menos falhas existam nos dados observados.

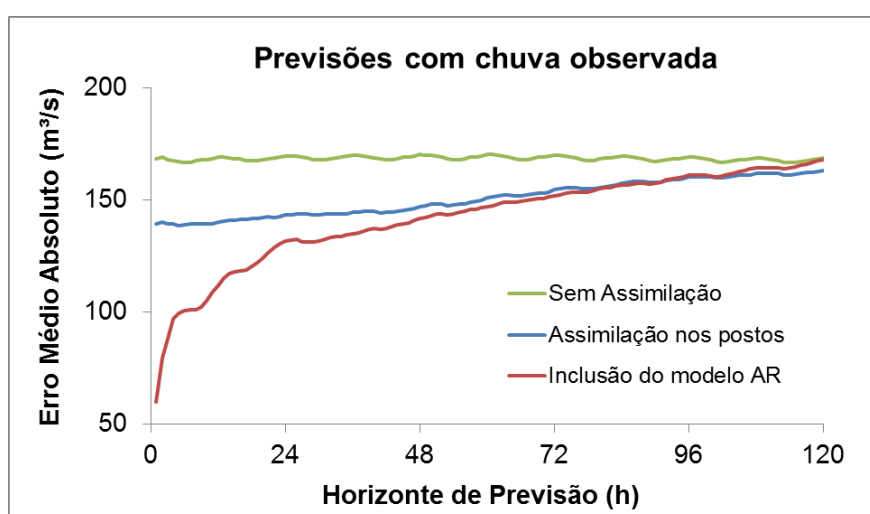
#### 4.1.4. Assimilação de Dados

A assimilação de dados utilizada nesta pesquisa é a técnica empírica padrão da versão mais atual do modelo hidrológico, apresentada no capítulo de revisão bibliográfica.

Foi realizada assimilação de dados em todos os pontos com dados disponíveis de estações telemétricas. Contudo, não foi feita a assimilação de dados padrão do modelo nos dados de vazão afluente ao reservatório, pois devido ao fato de eles serem calculados por balanço hídrico do reservatório e estarem sujeitos a ruídos diversos, a sua qualidade causa instabilidades que restringem o uso do método de assimilação do MGB-IPH.

Todavia, para os dados de vazão afluentes à UHE Três Marias foi ajustado um modelo de correção de saídas do tipo AR, cuja teoria foi apresentada na revisão bibliográfica. O modelo ajustado foi um AR1, com parâmetro  $\alpha_1$  igual a 0,96.

Tanto esta configuração da correção de saídas, quanto os parâmetros da assimilação de dados do modelo hidrológico foram ajustados manualmente a partir de análises de previsões retrospectivas utilizando chuva observada no horizonte de previsão. A Figura 17 apresenta o desempenho do modelo para a previsão de afluências de Três Marias com cinco dias de horizonte de previsão, onde a correção AR1 exerce efeito sobre os resultados.



**Figura 17. Desempenho do modelo para a previsão de afluências de Três Marias com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de 2008 a 2010, com horizonte de previsão de cinco dias.**

Na Figura 17 a linha verde mostra a o desempenho do modelo sem a utilização de assimilação de dados. A linha azul mostra o desempenho do modelo apenas com a assimilação de dados nos postos fluviométricos, e neste caso já se notam menores erros médios absolutos nos primeiros intervalos de tempo da previsão. Finalmente, a linha vermelha mostra a configuração final do modelo com o uso também do modelo AR1 para a correção de saídas, onde o desempenho do modelo nos intervalos de tempo iniciais da previsão é o melhor. Após as 120h de previsão, ambos os métodos deixam de exercer efeito significativo sobre os resultados, que passam a ser muito próximos de resultados apenas em modo de simulação.

#### **4.1.5. Configuração do Experimento de Previsão**

Na bacia do rio São Francisco o experimento de previsão de vazões foi realizado para o período compreendido entre Julho de 2008 e Julho de 2013. As análises compreenderam tanto os períodos chuvosos quanto os períodos secos para a bacia. Em relação aos períodos chuvosos, os resultando das análises compreenderam, portanto, cinco períodos:

- 2008/2009
- 2009/2010
- 2010/2011
- 2011/2012
- 2012/2013

Estes períodos foram definidos com base na disponibilidade de dados observados (bons dados estão disponíveis a partir de 2006), e com base na disponibilidade dos dados na base do TIGGE, onde os dados do ECMWF e do NCEP estão disponíveis desde Outubro de 2006, porém os dados do CPTEC estão disponíveis a partir de Fevereiro de 2008.

Em todos os dias compreendidos durante este intervalo de tempo analisado foram rodadas duas previsões por ensemble retrospectivas, uma às 00h e outra às 12h UTC, utilizando os dados dos EPS obtidos da base de dados do TIGGE.

Além disso, também foram realizadas previsões para os mesmos dias utilizando o modelo determinístico do ECMWF, e previsões usando chuvas observadas no horizonte de previsão.

Ao total, foram processadas mais de 314072 previsões para a bacia do rio São Francisco durante a realização dos experimentos.

---

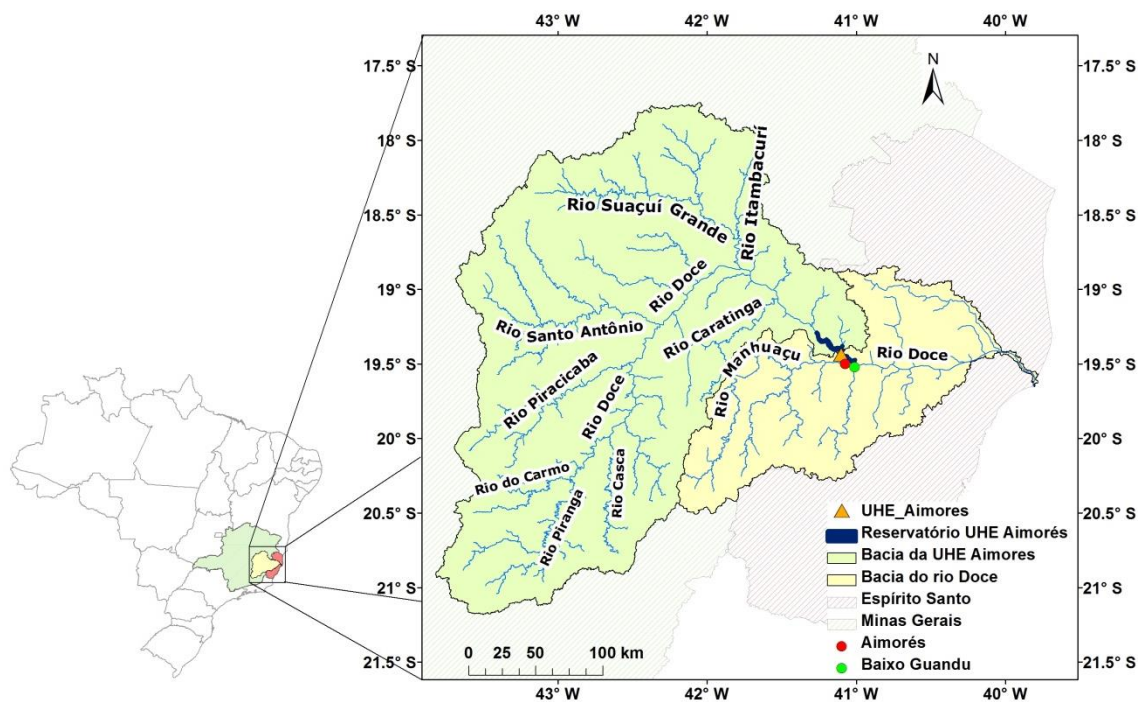
## 4.2. Bacia do rio Doce

O segundo estudo de caso desta pesquisa é a bacia hidrográfica do rio Doce, que tem sua cabeceira localizada no estado de Minas Gerais e sua foz no estado do Espírito Santo, com uma área de drenagem de aproximadamente 83.000km<sup>2</sup>.

Um dos pontos de grande interesse para previsões de vazões nesta bacia é o reservatório da UHE Aimorés, localizada antes da confluência do rio Doce com o rio Manhuaçu, com uma área de drenagem de aproximadamente 63.000km<sup>2</sup>.

A previsão de vazões afluentes à UHE Aimorés é importante por dois motivos: (i) as defluências devem ser controladas para evitar cheias nas cidades de Aimorés e Baixo Guandu, posicionadas imediatamente a jusante da usina; (ii) o lago da usina sofre com problemas de excesso de sedimentos, e um processo de limpeza chamado “*pass through*” deve ser executado periodicamente para a remoção dos sedimentos no local. Esse processo necessita de uma vazão afluente mínima de 2500m<sup>3</sup>/s para ser executado, que deve ser prevista entre cinco e dez dias de antecedência para permitir a sua preparação.

A Figura 18 apresenta a localização da área de estudo, com destaque para a UHE Aimorés, e outros pontos de interesse na bacia.



**Figura 18. Localização da bacia do rio Doce, seus principais afluentes e localização da UHE Aimorés.**

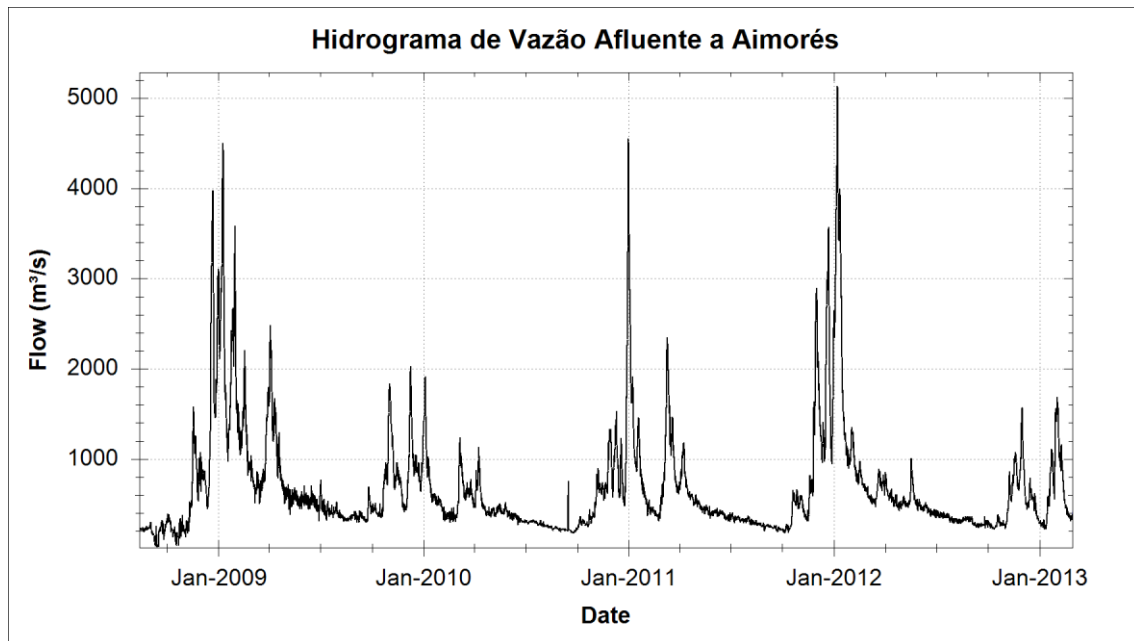


A UHE Aimorés também é mantida pela CEMIG (*Companhia Energética de Minas Gerais*), possui um reservatório de aproximadamente 185 milhões de m<sup>3</sup>, com uma potência instalada de geração de 330W.

Para o controle de cheias a jusante, novamente uma implicação extra são as vazões afluentes a jusante da barragem, que não estão sujeitas ao controle do reservatório. Neste caso do rio Doce, o rio Manhuaçu, com área de drenagem de aproximadamente 8750km<sup>2</sup> pode também contribuir para a ocorrência de cheias nas cidades de Aimorés e Baixo Guandu.,

Assim, quando cheias são verificadas no rio Manhuaçu, os operadores da UHE Aimorés devem precisar saber a magnitude das vazões crescentes para controlar a defluência do reservatório. Por este motivo, os dois lugares de maior interesse para previsões de vazões neste estudo de caso são o Rio Manhuaçu e a afluência de Aimorés.

A Figura 19 apresenta o hidrograma da vazão afluente a UHE Aimorés entre os anos de 2008 e 2013. A afluência ao reservatório também é calculada pela CEMIG através do balanço hídrico de volume de água no reservatório em intervalo de tempo horário, e uma média móvel de 12h é aplicada neles para diminuir este efeito de ruído, que ainda assim é verificado no hidrograma. Assim como em no Rio São Francisco, é possível notar pela Figura 19 que a bacia do Rio Doce também tem uma sazonalidade bem marcada, com as cheias ocorrendo geralmente entre Dezembro e Março. Os valores máximos de vazão na bacia chegam no hidrograma apresentado a mais de 5000m<sup>3</sup>/s. O período seco na bacia ocorre entre Agosto e Setembro, com as menores vazões chegando até aproximadamente 80m<sup>3</sup>/s. A vazão afluente média da UHE Aimorés é de aproximadamente 650m<sup>3</sup>/s. Esta vazão afluente ao reservatório é usada para comparar os resultados das previsões por conjunto.



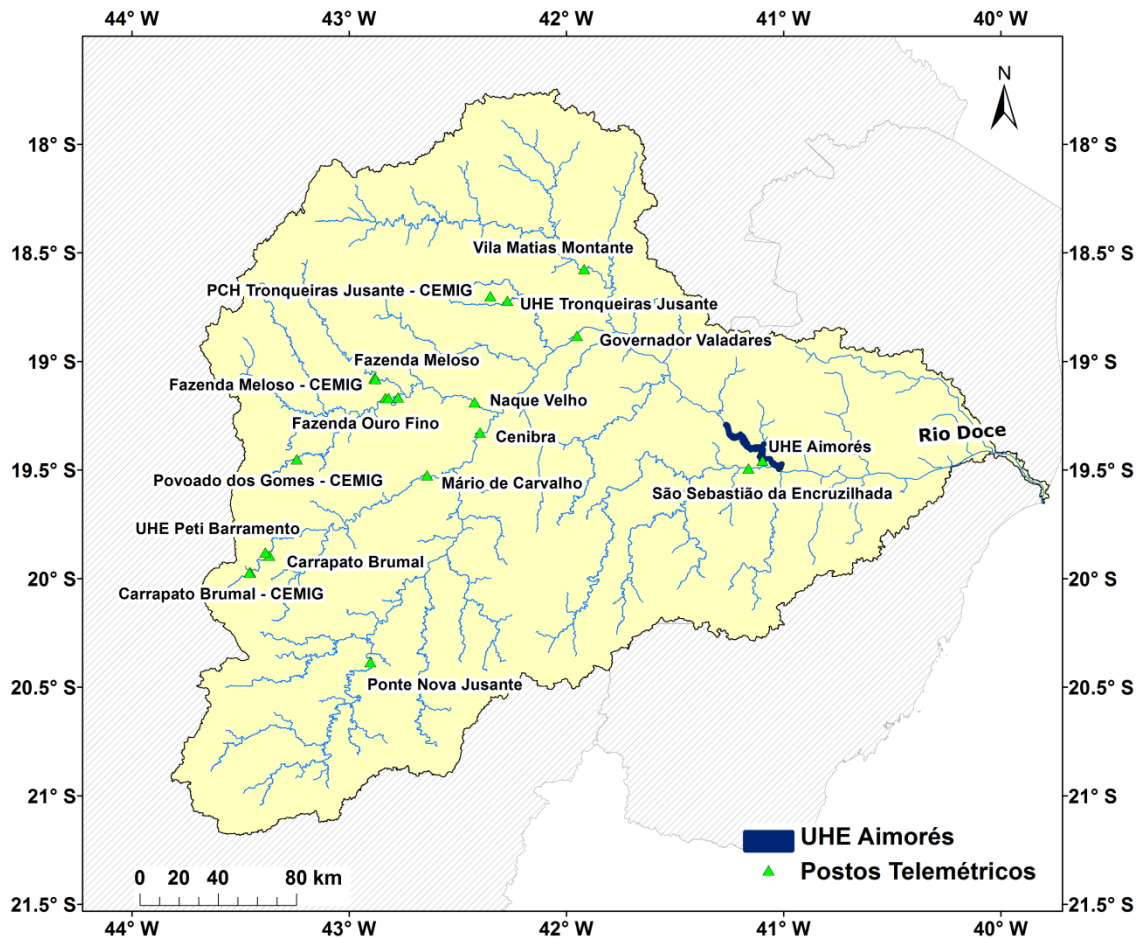
**Figura 19.** Série de vazões observadas afluentes à UHE Aimorés no período de testes: Julho de 2008 até Julho de 2013.

#### 4.2.1. Dados disponíveis

A Figura 20 apresenta a distribuição das estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia. Estes dados foram usados na calibração e validação do modelo hidrológico, e posteriormente nos experimentos para a previsão de vazões.

A distribuição dos dados telemétricos na bacia do Rio Doce pode ser considerada irregular, onde a maioria dos pontos se concentra no eixo central da bacia, com poucas informações em toda a região sul da bacia. Além disso, a cabeceira norte da bacia também é pouco monitorada. O rio Manhuaçu também é pouco monitorado, apenas com uma estação no eixutório do rio.

Em comparação com a bacia do alto São Francisco esta distribuição de dados é mais crítica para a previsão de vazões, com grandes áreas da bacia pouco monitoradas.



**Figura 20.** Estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia do rio Doce.

Estes dados de vazão em intervalo de tempo horário são disponibilizados pela ANA através do seu sistema de dados telemétricos ([www.ana.gov.br/telemetria](http://www.ana.gov.br/telemetria)), e são mantidos por entidades como a própria CEMIG, que opera a UHE Aimorés em parceria com a empresa Vale do Rio Doce.

Ao total, são 18 postos fluviométricos localizados no rio Doce e em seus afluentes, conforme mostra a Figura 20. A Tabela 6 apresenta algumas características dos postos.

A disponibilidade temporal dos dados horários é razoável no intervalo de 2009 à 2013. Independentemente da disponibilidade de informações, todos os postos disponíveis foram adicionados ao sistema de previsão desenvolvido.

**Tabela 6. Postos telemétricos com dados horários de chuva e vazão utilizados na aplicação do modelo MGB-IPH na região de estudo da bacia do rio Doce.**

Código	Nome	Lat	Long	Rio	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )
PETIBAR	Peti Barramento - CEMIG	-19.893	-43.366	Ribeirão Santa Bárbara	747
OUROFINO	Fazenda Ouro Fino - CEMIG	-19.168	-42.833	Santo Antônio	6360
MELOSO	Fazenda Meloso - CEMIG	-19.077	-42.884	Guanhaes	2190
GOMES	Povoado dos Gomes - CEMIG	-19.450	-43.240	Tanque	684
TRONQUEIRAS	PCH Tronqueiras Jusante - CEMIG	-18.720	-42.271	Tronqueiras	536
CARRAPATO	Carrapato Brumal - CEMIG	-19.971	-43.456	Ribeirão Santa Bárbara	425
56110005	Ponte Nova Jusante	-20.383	-42.902	Piranga	6230
56640000	Carrapato Brumal	-19.971	-43.459	Ribeirão Santa Bárbara	425
56650080	UHE Peti Barramento	-19.879	-43.386	Ribeirão Santa Bárbara	725
56696000	Mário de Carvalho	-19.524	-42.641	Piracicaba	5270
56719998	<i>Cenibra</i>	-19.328	-42.397	Doce	24200
56776500	Fazenda Ouro Fino	-19.169	-42.819	Santo Antônio	6360
56810000	Fazenda Meloso	-19.081	-42.878	Guanhaes	2190
56819080	UHE Salto Grande (rio Sto Antônio)	-19.165	-42.775	Santo Antônio	6530
56825000	Naque Velho	-19.188	-42.423	Santo Antônio	10200
56846801	UHE Tronqueiras Jusante	-18.700	-42.350	Tronqueiras	536
56850000	Governador Valadares	-18.883	-41.951	Doce	40500
56891900	Vila Matias Montante	-18.575	-41.918	Suaçui Grande	9770
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	-19.493	-41.162	Manhuaçu	8720
56990850	UHE Aimorés	-19.457	-41.097	Doce	62400

### 4.2.3. Calibração e verificação do modelo

Os postos fluviométricos considerados para a calibração do modelo foram os postos com dados horários, apresentados na Figura 20. Os períodos de calibração e verificação foram, respectivamente:

- Calibração: de 15/07/2008 até 15/07/2013;
- Verificação: de 15/07/2005 até 01/07/2008.

O período de calibração foi escolhido em função da maior disponibilidade de dados observados. A verificação, por ser um período com poucos dados, foi realizada apenas para alguns postos.

#### 4.2.3.1 Resultados da Calibração

O modelo foi calibrado no período de 15/07/2008 até 15/07/2013. A Tabela 7 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para esta calibração.

**Tabela 7. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 15/07/2008 até 15/07/2013).**

Código Estação	Nome Estação	Nash	NashLog	Erro Volume (%)
PETIBAR	Peti Barramento - CEMIG	0,34	0,61	-12
OUROFINO	Fazenda Ouro Fino - CEMIG	0,65	0,48	-31
MELOSO	Fazenda Meloso - CEMIG	0,57	0,47	-11
GOMES	Povoado dos Gomes - CEMIG	0,52	0,45	-34
TRONQUEIRAJus	PCH Tronqueiras Jusante - CEMIG	0,41	-0,06	-24
CARRAPATO	Carrapato Brumal - CEMIG	0,78	0,80	-17
56110005	Ponte Nova Jusante	0,66	0,36	-23
56640000	Carrapato Brumal	0,80	0,78	-18
56650080	UHE Peti Barramento	0,78	0,63	-10
56696000	Mário de Carvalho	0,55	0,24	-30
56719998	Cenibra	0,85	0,63	-23
56776500	Fazenda Ouro Fino	0,61	0,29	-39
56810000	Fazenda Meloso	0,59	0,44	-22
56819080	UHE Salto Grande (rio Sto Antônio)	0,63	0,49	-36
56825000	Naque Velho	-0,10	-0,77	-45
56846801	UHE Tronqueiras Jusante	0,38	-0,31	-34
56850000	Governador Valadares	0,75	0,61	-30

56891900	Vila Matias Montante	0,41	0,20	20
56990000	São Sebastião da Encruzilhada	0,29	0,09	-17
56990850	UHE Aimorés	0,90	0,79	2

De uma maneira geral a calibração com dados horários teve resultados considerados aceitáveis, dada a quantidade e qualidade dos dados disponíveis na bacia.

Entretanto, nos locais mais importantes para a previsão de vazões afluentes a UHE Aimorés, as estatísticas são as melhores. A vazão afluente a Aimorés, por exemplo, foi relativamente bem reproduzida, com coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,90 e erros de volume de cerca de 2%.

#### 4.2.3.2 Resultados da Verificação

A verificação da calibração do modelo foi realizada com dados do período de 15/07/2005 até 01/07/2008. Neste período a disponibilidade de dados é menor do que no período de calibração, ou seja, o número de falhas de observação nos postos pluviométricos é maior neste período, o que certamente tem influência sobre os resultados. A Tabela 8 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para esta calibração.

**Tabela 8. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (15/07/2005 a 01/07/2008).**

Código Estação	Nome Estação	Nash	NashLog	Erro Volume (%)
56640000	Carrapato Brumal	0,52	0,41	-34
56696000	Mário de Carvalho	0,47	-0,36	-6
56776500	Fazenda Ouro Fino	0,48	0,64	-33
56810000	Fazenda Meloso	-0,14	0,45	-27
56891900	Vila Matias Montante	-0,01	0,40	-57

Na Tabela 8 verifica-se que de uma forma geral o modelo sofre com a pequena quantidade de dados na bacia, com um decréscimo na qualidade dos resultados e relação a calibração. Contudo, este desempenho não muito satisfatório já era esperado para estas condições de informações disponíveis.

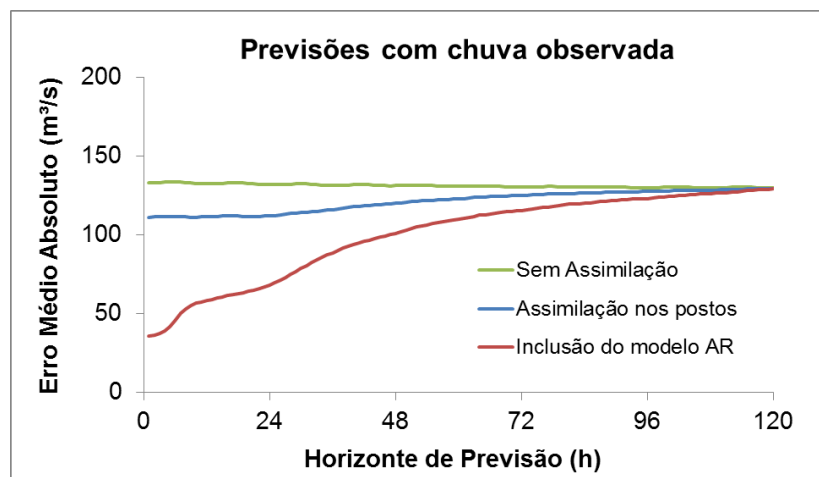
#### 4.2.4. Assimilação de Dados

A assimilação de dados utilizada nesta aplicação também foi a técnica empírica padrão da versão mais atual do modelo hidrológico, já apresentada no capítulo de revisão bibliográfica da tese.

Foi realizada assimilação de dados em todos os pontos com dados disponíveis de estações telemétricas. Não foi feita a assimilação de dados padrão do modelo nos dados de vazão afluente ao reservatório, pois devido ao fato de eles serem calculados por balanço hídrico do reservatório e estarem sujeitos a ruídos diversos, a sua qualidade causa instabilidades que restringiu o uso do método de assimilação do MGB-IPH.

Todavia, para os dados de vazão afluentes à UHE Aimorés foi ajustado um modelo de correção de saídas do tipo AR, cuja teoria foi apresentada na revisão bibliográfica. O modelo ajustado foi um AR1, com parâmetro  $\alpha_1$  igual a 0,96.

Tanto esta configuração da correção de saídas, quanto os parâmetros da assimilação de dados do modelo hidrológico, foram ajustados manualmente a partir de análises de previsões retrospectivas utilizando chuva observada no horizonte de previsão. A Figura 21 apresenta o desempenho do modelo para a previsão de afluências de Aimorés com o uso do modelo AR1 para o período de 2008 a 2010.



**Figura 21. Desempenho do modelo para a previsão de afluências de Aimorés com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de 2008 a 2010, com horizonte de previsão de cinco dias.**

Na Figura 21 a linha verde mostra o desempenho do modelo sem a utilização de assimilação de dados. A linha azul mostra o desempenho do modelo apenas com a

assimilação de dados nos postos fluviométricos, neste caso, já se notam menores erros médios absolutos nos primeiros intervalos de tempo da previsão. Finalmente, a linha vermelha mostra a configuração final do modelo com o uso também do modelo AR1 para a correção de saídas, onde o desempenho do modelo nos intervalos de tempo iniciais da previsão é o melhor.

#### **4.2.4. Configuração do Experimento de Previsão**

Na bacia do rio Doce o experimento de previsão de vazões foi realizado para o mesmo período que para o rio São Francisco, entre Julho de 2008 e Julho de 2013. As análises compreenderam tanto os períodos chuvosos quanto os períodos secos para a bacia. Em relação aos períodos chuvosos, os resultando das análises compreenderam, portanto, cinco períodos:

- 2008/2009
- 2009/2010
- 2010/2011
- 2011/2012
- 2012/2013

Estes períodos foram definidos com base na disponibilidade de dados observados, e com base na disponibilidade dos dados na base do TIGGE, onde os dados do ECMWF e do NCEP estão disponíveis desde Outubro de 2006, porém os dados do CPTEC estão disponíveis a partir de Fevereiro de 2008.

Em todos os dias compreendidos durante este intervalo de tempo analisado foram rodadas duas previsões por ensemble retrospectivas, uma às 00h e outra às 12h UTC, utilizando os dados dos EPS obtidos da base de dados do TIGGE.

Além disso, também foram realizadas previsões para os mesmos dias utilizando o modelo determinístico do ECMWF, e previsões usando chuvas observadas no horizonte de previsão.

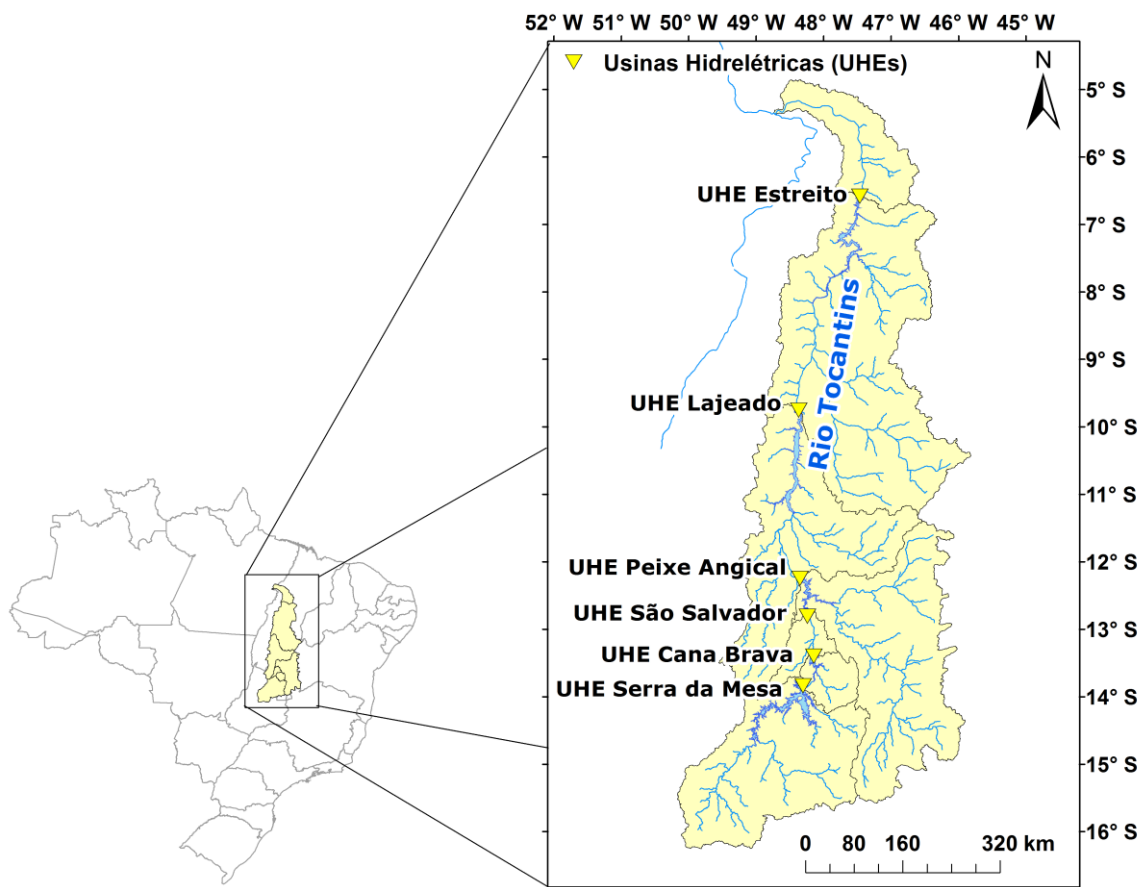
Ao total, assim como no experimento para o Rio São Francisco, foram processadas mais de 314072 previsões para a bacia do Rio Doce durante a realização dos experimentos.



### 4.3. Bacia do rio Tocantins

O terceiro estudo de caso desta pesquisa é a bacia hidrográfica do rio Tocantins, delimitada até a confluência com o rio Araguaia, com uma área toda de aproximadamente 310.000 km<sup>2</sup>. A bacia está localizada na área dos estados de Goiás, Tocantins, Maranhão, no centro-norte do Brasil. A localização da bacia é apresentada na Figura 22.

Até o ponto delimitado, a bacia é intensamente utilizada para a geração de energia hidrelétrica, com seis grandes aproveitamentos no eixo do rio principal, que também são mostrados na Figura 22.



**Figura 22. Localização da bacia do rio Tocantins delimitada até a confluência com o rio Araguaia, seus principais afluentes e a localização das UHEs existentes na bacia.**

Os pontos de interesse para a previsão nesta bacia são justamente os locais das UHEs no rio Tocantins, já que elas possuem o dever de operar de maneira a não intensificar as cheias que acontecem naturalmente na bacia.

Neste layout hidrelétrico o reservatório de regularização com mais alto tempo de residência é o reservatório de Serra da Mesa que abrange a bacia do Planalto Central, na

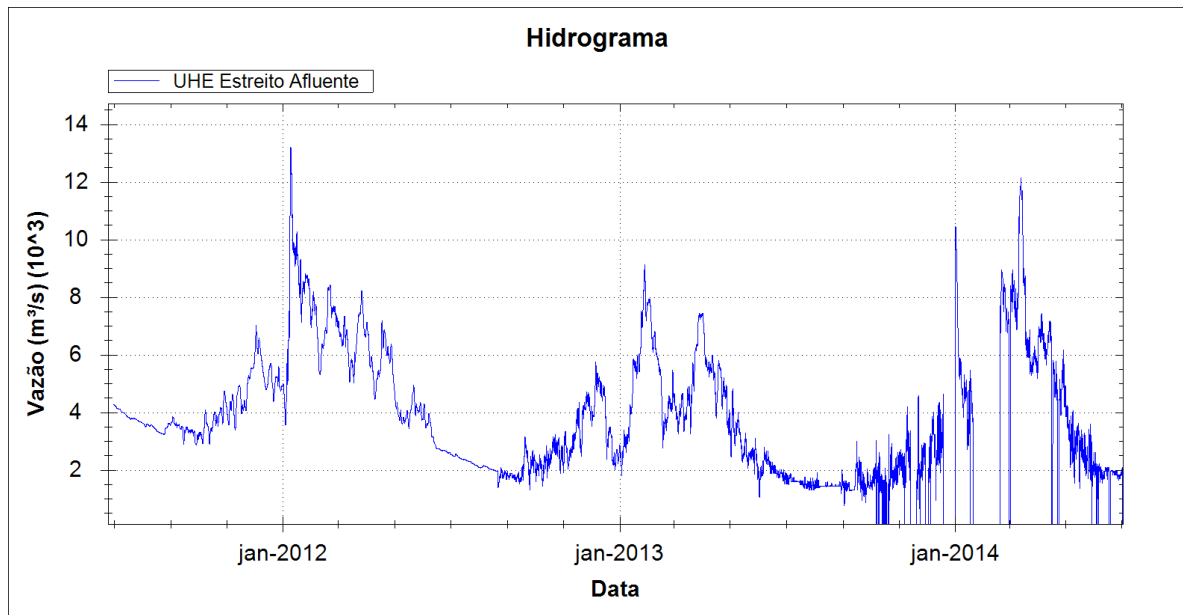
cabeceira da bacia. Os demais aproveitamentos representam reservatórios menores capacidade de reservação e com menor tempo de residência. A Tabela 9 apresenta detalhes de todos os aproveitamentos existentes na bacia.

**Tabela 9. Características dos aproveitamento hidrelétricos na bacia do rio Tocantins.**

<b>Aproveitamento</b>	<b>Potência (MW)</b>	<b>Área de drenagem Km<sup>2</sup></b>	<b>Volume útil Hm<sup>3</sup></b>	<b>Rio</b>
Cana Brava	450	50.975	43250	Tocantins
Serra da Mesa	1275	57.777	394	Tocantins
São Salvador	241	61.298	1,3	Tocantins
Peixe Angical	452	125.687	528,30	Tocantins
Lajeado	902,5	184.219	480	Tocantins
Estreito	1087	287.800	178	Tocantins

A Figura 23 apresenta o hidrograma da afluência na UHE Estreito, posicionada no norte da bacia, próxima do exutório, entre Julho de 2011 e Julho de 2014. Os dados disponíveis nesta bacia são mais limitados que os dados disponíveis nas bacias do Rio Doce e do Rio São Fransisco. Assim como as outras bacias, a afluência ao reservatório também é calculada pela CESTE (Consórcio Estreito Energia – operadora da usina) através do balanço hídrico de volume de água baseado em medidas de afluências pelas turbinas e vertedor, e medidas de nível do lago, e os dados de vazão afluyente possuem “ruído”. Desta forma, uma média móvel de 12h é aplicada neles para diminuir este efeito de ruído, que ainda assim é possível de ser verificado no hidrograma.

Conforme pode ser visto na Figura 23, a bacia também possui sazonalidade bem marcada, onde as cheias na bacia começam no mês de Setembro e duram até aproximadamente o mês de Abril, chegando a valores de afluência maiores que 12000m<sup>3</sup>/s. No período seco as vazões chegam a valores menores que 2000m<sup>3</sup>/s . A vazão afluyente média da UHE Estreito é de 4308m<sup>3</sup>/s. Neste estudo, a UHE Estreito é usada como ponto de verificação dos resultados, e esta vazão afluyente ao reservatório é usada para comparar os resultados das previsões por conjunto.

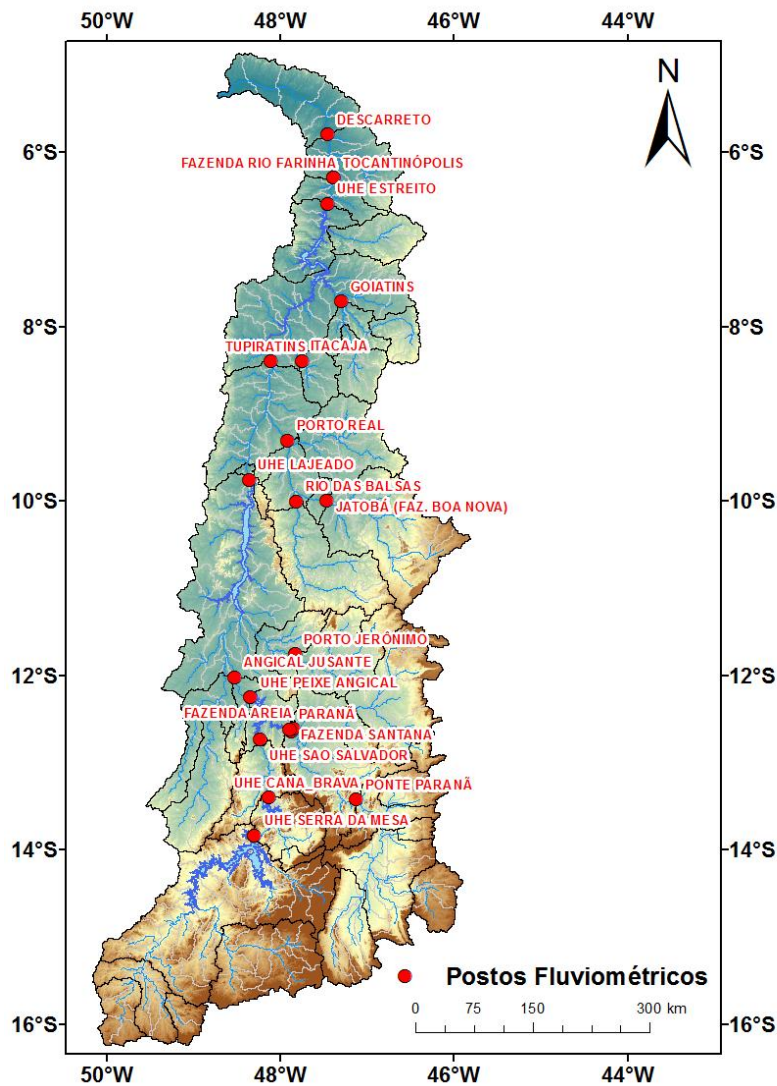


**Figura 23.** Hidrograma da vazão afluyente a UHE Estreito entre os anos de 2012 e 2014, com aplicação de filtro de média móvel de 12h para remoção do ruído. Valores menores do que zero representam falhas nos dados.

#### 4.3.1. Dados Disponíveis

A Figura 24 apresenta a distribuição das estações telemétricas de monitoramento de precipitação e vazão existentes na bacia. Estes dados foram usados na calibração e validação do modelo hidrológico, e posteriormente nos experimentos para a previsão de vazões.

A distribuição dos dados telemétricos na bacia do Rio Tocantins também pode ser considerada irregular. Nas faixas de latitude entre 10° a 12° e entre 14° e 16° praticamente inexistem informações telemétricas disponíveis. Considerando a área total da bacia, a densidade de informações é de aproximadamente uma estação para cada 17.000km<sup>2</sup>.



**Figura 24. Postos fluviométricos existentes**

Os dados de vazão em intervalo de tempo horário são disponibilizados pelas operadoras das UHEs na região. Ao total, são 23 postos fluviométricos localizados no rio Doce e em seus afluentes, conforme mostra a Figura 24.

A Tabela 10 apresenta algumas características dos postos. A disponibilidade temporal dos dados horários é razoável no intervalo de 2009 à 2013. Independentemente da disponibilidade de informações, todos os postos disponíveis foram adicionados ao sistema de previsão desenvolvido.

**Tabela 10. Pontos utilizados no modelo hidrológico.**

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Lat</b>	<b>Lon</b>	<b>Fonte*</b>
270	UHE Serra Da Mesa	-13.8396	-48.3020	ONS
191	UHE Cana Brava	-13.4021	-48.1437	ONS
253	UHE Sao Salvador	-12.7397	-48.2359	ONS
21080000	São Salvador	-12.7397	-48.2359	FLU ANA
21600000	Ponte Paranã	-13.4266	-47.1355	ENERPEIXE
21650000	Fazenda Santana	-12.6396	-47.8772	ENERPEIXE
21850000	Rio Da Palma	-12.4150	-47.1980	ENERPEIXE
21890000	Fazenda Areia	-12.6105	-47.8610	ENERPEIXE
21900000	Paraná	-12.6190	-47.8980	FLU ANA
257	UHE Peixe Angical	-12.2481	-48.3471	ONS
22220000	Porto Jerônimo	-11.7586	-47.8364	TEL ANA
273	UHE Lajeado	-9.7562	-48.3687	ONS
EC33F136	Jatobá (Faz. Boa Nova)	-9.9941	-47.4729	CESTE
EC340306	Rio Das Balsas	-10.0019	-47.8258	CESTE
EC3425E	Porto Real	-9.3062	-47.9271	CESTE
EC33A1C	Tupiratins	-8.3940	-48.1106	CESTE
EC339450	Itacaja	-8.3897	-47.7600	CESTE
EC33B2B	Goiatins	-7.7063	-47.3061	CESTE
23300000	Carolina	-7.3377	-47.4768	ONS
3C338726	Fazenda Rio Farinha	-6.8689	-47.4603	CESTE
271	UHE Estreito	-6.5854	-47.4604	ONS
EC33D75A	Tocantinópolis	-6.2894	-47.3923	CESTE
23700000	Descarreto	-5.7897	-47.4604	TEL ANA

\*FLU ANA = postos fluviométricos da ANA; TEL ANA = estações telemétricas da ANA. ONS: vazões naturais e operação

### 4.3.2. Calibração e verificação do modelo

Os postos fluviométricos considerados para a calibração do modelo foram os postos com dados horários, apresentados na Figura 24. O período de calibração adotado foi de 01/01/2008 até 09/05/2013. Escolhido em função da disponibilidade de dados observados.

O modelo foi verificado no período de 01/06/2013 até 01/06/2014. Totalizando um ano hidrológico para a bacia. Este período foi escolhido em função da disponibilidade de dados telemétricos.

#### 4.3.2.1. Resultados da Calibração

O modelo foi calibrado no período de 01/01/2008 até 09/05/2013. A Tabela 11 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para esta calibração.

**Tabela 11. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de calibração (de 01/01/2008 até 09/05/2013).**

Sub-bacia	Código	Nome	ENS	ENSlog	$\Delta V$
5	270	UHE Serra Da Mesa	0.652	0.836	-8.033
7	191	UHE Cana_Brava	0.673	0.842	-9.261
8	253	UHE Sao Salvador	0.686	0.846	-9.969
15	21600000	Ponte Paranã	0.838	0.876	-0.837
16	21650000	Fazenda Santana	0.810	0.863	3.654
18	21850000	Rio Da Palma	0.333	0.437	-6.363
19	21890000	Fazenda Areia	0.208	0.334	6.655
21	257	UHE Peixe Angical	0.721	0.792	7.619
26	22220000	Porto Jerônimo	0.702	0.813	-1.641
28	273	UHE Lajeado	0.731	0.84	10.287
30	EC33F136	Jatobá (Faz. Boa Nova)	0.462	0.605	0.927
32	EC340306	Rio Das Balsas	0.710	0.69	-8.845
34	EC3425EA	Porto Real	0.801	0.81	5.065
35	EC33A1CA	Tupiratins	0.777	0.738	-4.001
36	EC339450	Itacajá	0.587	0.749	4.414
39	EC33B2BC	Goiatins	0.600	0.709	-9.306
41	EC338726	Faz. Rio Farinha	0.490	0.505	1.229
42	271	Uhe Estreito	0.796	0.878	10.048
43	EC33D75A	Tocantinópolis	0.975	0.971	-2.229

Em geral, os resultados apresentaram qualidade de calibração suficientes para os propósitos de previsão de vazões. Para as vazões afluentes às UHEs os resultados obtidos foram de Nash-Suttcliffe entre 0,65 e 0,8, e erros de volume entre -10% e 10%. Estes resultados podem ser considerados adequados nestes locais que são de grande interesse para a previsão de vazões.

#### 4.3.2.1. Resultados da Verificação

A Tabela 12 apresenta os valores das medidas de desempenho do modelo para a verificação. Na calibração, foram usados menos pontos por que menos dados fluviométricos estavam disponíveis em comparação ao período de calibração.

**Tabela 12. Medidas de desempenho nos diferentes postos fluviométricos no período de verificação (de 01/06/2013 até 01/06/2014).**

Sub-bacia	Código	Nome	ENS	ENSlog	$\Delta V$
28	273	UHE Lajeado	0.03	0.37	21.1
30	EC33F136	Jatobá (Faz. Boa Nova)	0.33	0.01	15.9
34	EC3425EA	Porto Real	0.68	0.82	17.8

36	EC339450	Itacajá	0.29	0.68	33.0
39	EC33B2BC	Goiatins	-0.16	0.09	37.9
41	EC338726	Faz. Rio Farinha	0.68	0.73	24.5
42	271	UHE Estreito	0.78	0.86	14.2

Em geral, verifica-se que o modelo sofreu com uma queda na qualidade dos resultados em comparação com a calibração. E também com a pequena quantidade de dados na bacia. Contudo, para a UHE Estreito, que é onde os resultados são focados, o desempenho seguiu similar, e pode ser considerado satisfatório para estas condições de informações disponíveis e fins de previsão de vazão.

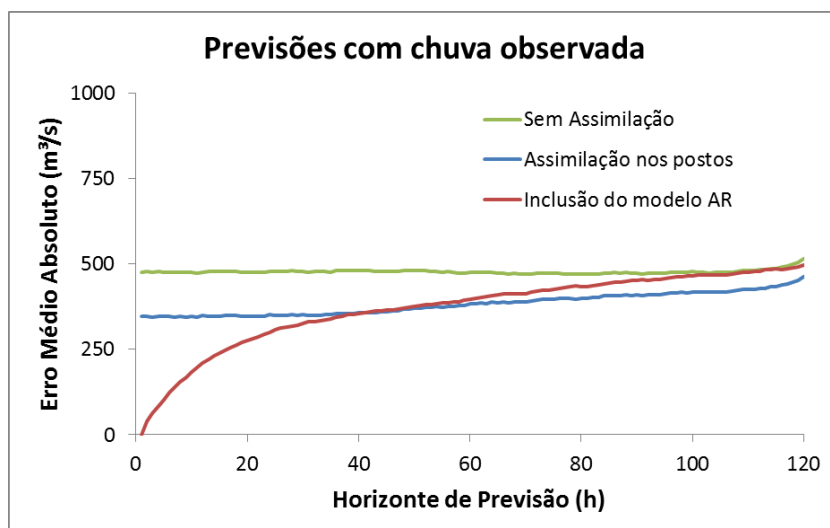
### 4.3.3. Assimilação de Dados

A assimilação de dados utilizada nesta aplicação também foi a técnica empírica padrão da versão mais atual do modelo hidrológico, já apresentada no capítulo de revisão bibliográfica da tese.

Foi realizada assimilação de dados em todos os pontos com dados disponíveis de estações telemétricas. Não foi feita a assimilação de dados padrão do modelo nos dados de vazão afluente ao reservatório, pois devido ao fato de eles serem calculados por balanço hídrico do reservatório e estarem sujeitos a ruídos diversos, a sua qualidade causa instabilidades que restringiu o uso do método de assimilação do MGB-IPH.

Todavia, para os dados de vazão afluentes à UHE Estreito foi ajustado um modelo de correção de saídas do tipo AR, cuja teoria foi apresentada na revisão bibliográfica. O modelo ajustado foi um AR1, com parâmetro  $\alpha_1$  igual a 0,92.

Tanto esta configuração da correção de saídas, quanto os parâmetros da assimilação de dados do modelo hidrológico, foram ajustados manualmente a partir de análises de previsões retrospectivas utilizando chuva observada no horizonte de previsão. A Figura 21 apresenta o desempenho do modelo para a previsão de afluências de Aimorés com o uso do modelo AR1 para o período de Julho/2011 a Julho/2013.



**Figura 25. Desempenho do modelo para a previsão de aflúencias da UHE Estreito com o ajuste final de assimilação de dados e de correção de saídas para o período de Julho/2011 a Julho/2013, com horizonte de previsão de cinco dias.**

Na Figura 25 a linha verde mostra a o desempenho do modelo sem a utilização de assimilação de dados. A linha azul mostra o desempenho do modelo apenas com a assimilação de dados nos postos fluviométricos. Finalmente, a linha vermelha mostra a configuração final do modelo com o uso também do modelo AR1 para a correção de saídas, onde o desempenho do modelo nos intervalos de tempo iniciais da previsão é o melhor.

Nesta correção com o modelo AR1 nota-se também que os erros tendem mais rapidamente aos erros sem assimilação do que o uso da assimilação apenas nos postos, a partir do horizonte de aproximadamente 60h.

Contudo, como as previsões apresentam uma melhora significativa nos primeiros horizontes de previsão usando o modelo AR1 (erros absolutos perto de zero), menor do que a diferença nos erros verificados nas últimas antecedências, optou-se por manter a utilização do modelo com assimilação de dados e correção de saídas utilizando o modelo AR1.

#### 4.3.4. Configuração do Experimento de Previsão

Na bacia do rio Tocantins o experimento de previsão de vazões foi realizado para o mesmo período que para o rio São Francisco, entre Julho de 2011 e Julho de 2014. As análises compreenderam tanto os períodos chuvosos quanto os períodos secos para a bacia. Em relação aos períodos chuvosos, os resultando das análises compreenderam, portanto, três períodos:



- 2011/2012
- 2012/2013
- 2013/2014

Estes períodos foram definidos com base na disponibilidade de dados observados.

Em todos os dias compreendidos durante este intervalo de tempo analisado foram rodadas duas previsões por ensemble retrospectivas, uma às 00h e outra às 12h UTC, utilizando os dados dos EPS obtidos da base de dados do TIGGE.

Além disso, também foram realizadas previsões para os mesmos dias utilizando o modelo determinístico do ECMWF, e previsões usando chuvas observadas no horizonte de previsão.

Ao total, foram processadas mais de 161726 previsões para a bacia do Rio Tocantins durante a realização dos experimentos.

Para a consideração da sequência de UHEs no eixo principal da bacia do Tocantins neste estudo foi feita como se assumindo completamente conhecida a vazão defluente de todas as usinas da cascata até os três primeiros dias do horizonte de previsão. E a partir deste horizonte considerou-se a defluência das usinas como operando a fio d'água.

Com isso, pretendeu-se emular o que acontece efetivamente na operação dos reservatórios, onde geralmente se conhece com uma precisão aproximadamente boa qual será a defluência das usinas para os dias próximos ao início da previsão, e em horizontes maiores este valor é mais desconhecido, sendo uma aproximação do tipo “tudo que entre, sai” aceitável.

## 5. Resultados das análises de sensibilidade das previsões a vieses na precipitação prevista

A primeira etapa desta pesquisa consistiu na realização de análises de sensibilidade dos resultados dos modelos de previsão de vazão com relação à existência de vieses na chuva prevista. Esta análise consistiu em rodar experimentos de previsão de vazão para o passado utilizando chuva observada no horizonte de previsão. Contudo, além de uma rodada de referência utilizando a chuva observada também foram feitas outras seis rodadas onde foi criado um viés nos valores: -50%, -30%, -10%, +10%, +20%, +30%.

O objetivo desta análise foi verificar qual a sensibilidade de cada um dos modelos hidrológicos com relação à existência de viés na chuva das previsões de vazões geradas, onde a qualidade é medida por algumas das métricas de previsão de vazão. Nesta análise não são incluídos outros erros que podem existir em previsões de vazão por ensemble, como: deslocamento temporal das chuvas, deslocamento espacial das chuvas, falta ou excesso de espalhamento do conjunto, problemas na calibração do conjunto, entre outros.

Contudo, ela fornece algumas informações interessantes sobre o comportamento dos modelos hidrológicos calibrados para as bacias, sobre o comportamento das métricas de medida de qualidade e consistência das previsões utilizadas neste trabalho, e permite fazer inferências melhor embasadas sobre os resultados encontrados posteriormente nas análises de previsão por ensemble utilizando os EPS.

A seguir, os resultados destas análises de sensibilidade, para cada uma das bacias hidrográficas estudadas, são apresentados.

### 5.1. Bacia do Alto São Francisco

Os resultados das análises de sensibilidade para um viés na chuva na Bacia do Alto São Francisco, utilizando as métricas *EMA*, *EMR*, *Coeficiente de Correlação*, *BS*, e *ROC Curves*, são apresentados nos itens seguintes. Os resultados são discutidos imediatamente depois.

Para as *ROC Curves* que resultam em um gráfico para cada um dos horizontes de previsão, foram escolhidas quatro antecedências para a apresentação dos resultados: 48h (2 dias), 120h (5 dias), 240h (10 dias), e 360h (15 dias). Para as métricas *BS* e curvas *ROC*, que

também necessitam da determinação de um limiar de cálculo, foi utilizado o valor  $1400\text{m}^3/\text{s}$  nesta análise de sensibilidade, que corresponde a aproximadamente a vazão Q10 da curva de permanência da vazão afluente a UHE Três Marias.

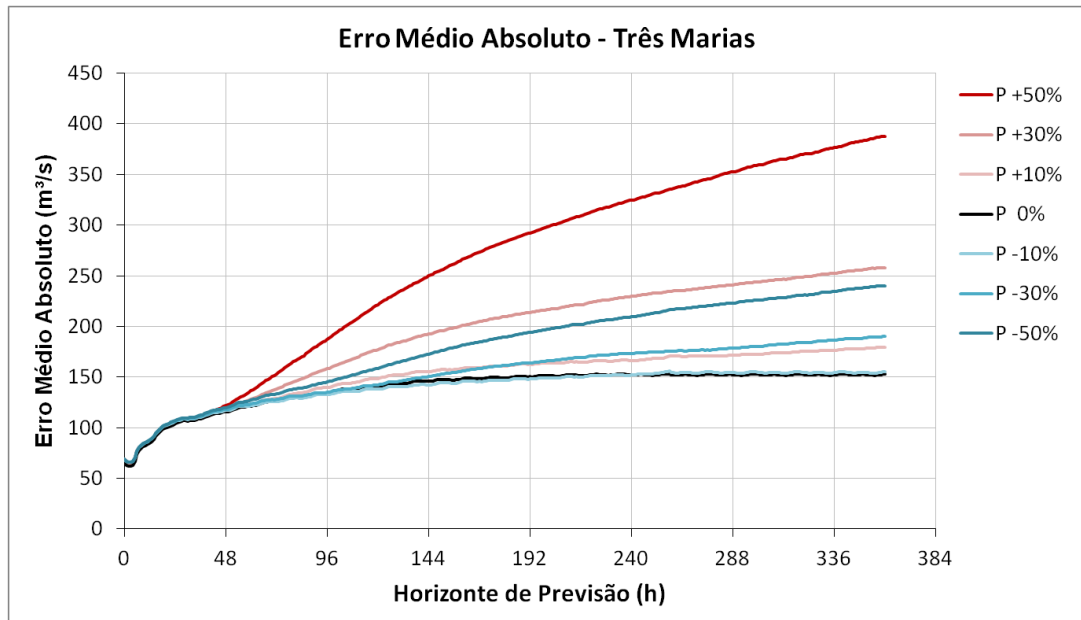


Figura 26. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco.

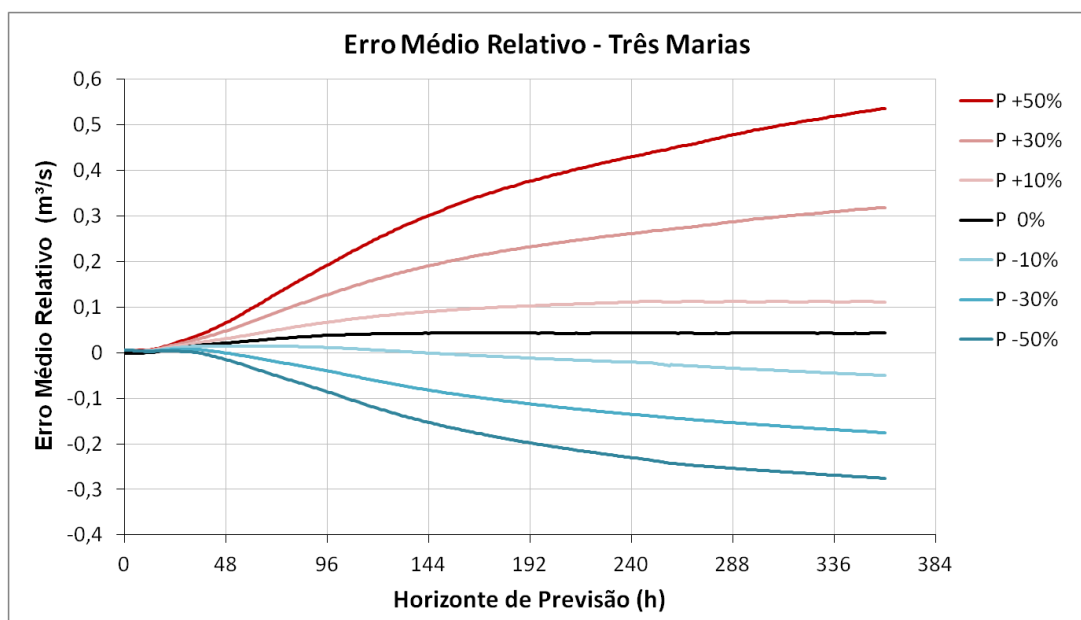
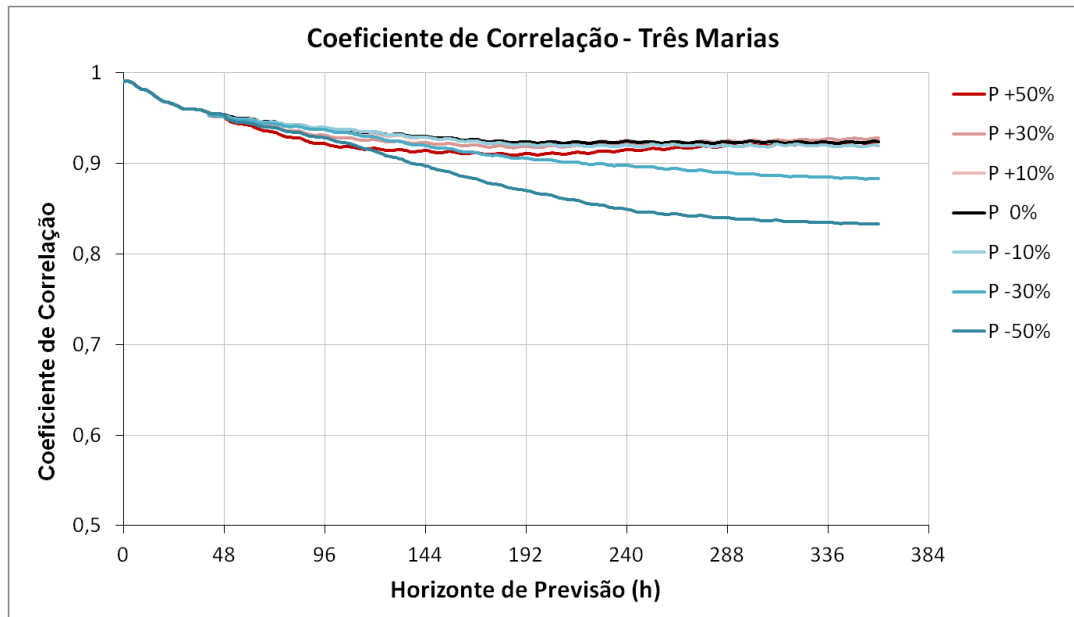
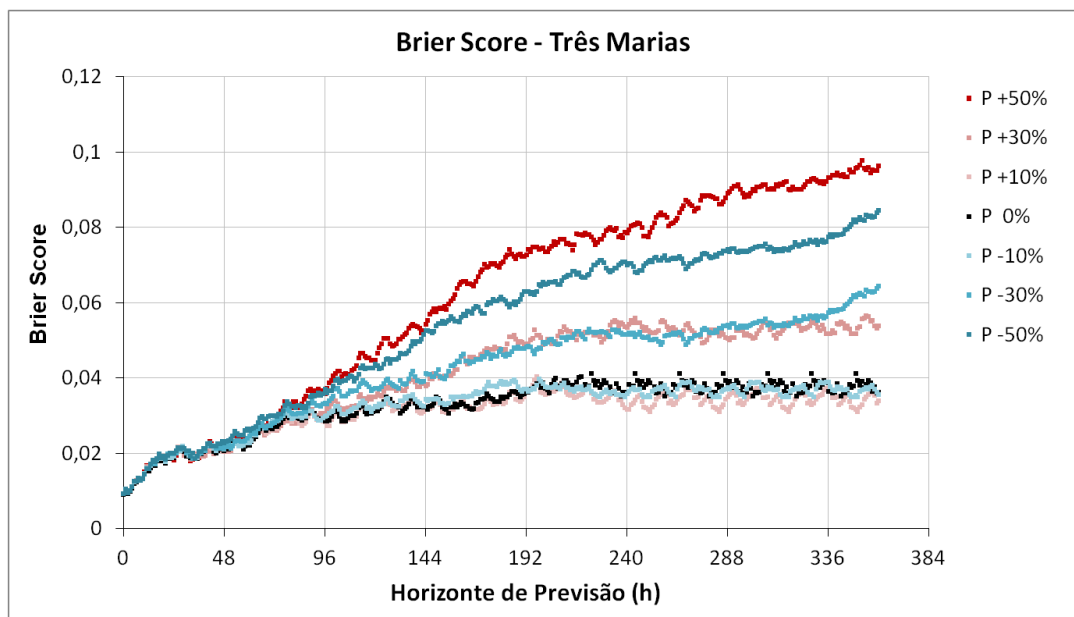


Figura 27. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco.



**Figura 28. Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco.**



**Figura 29. Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco.**

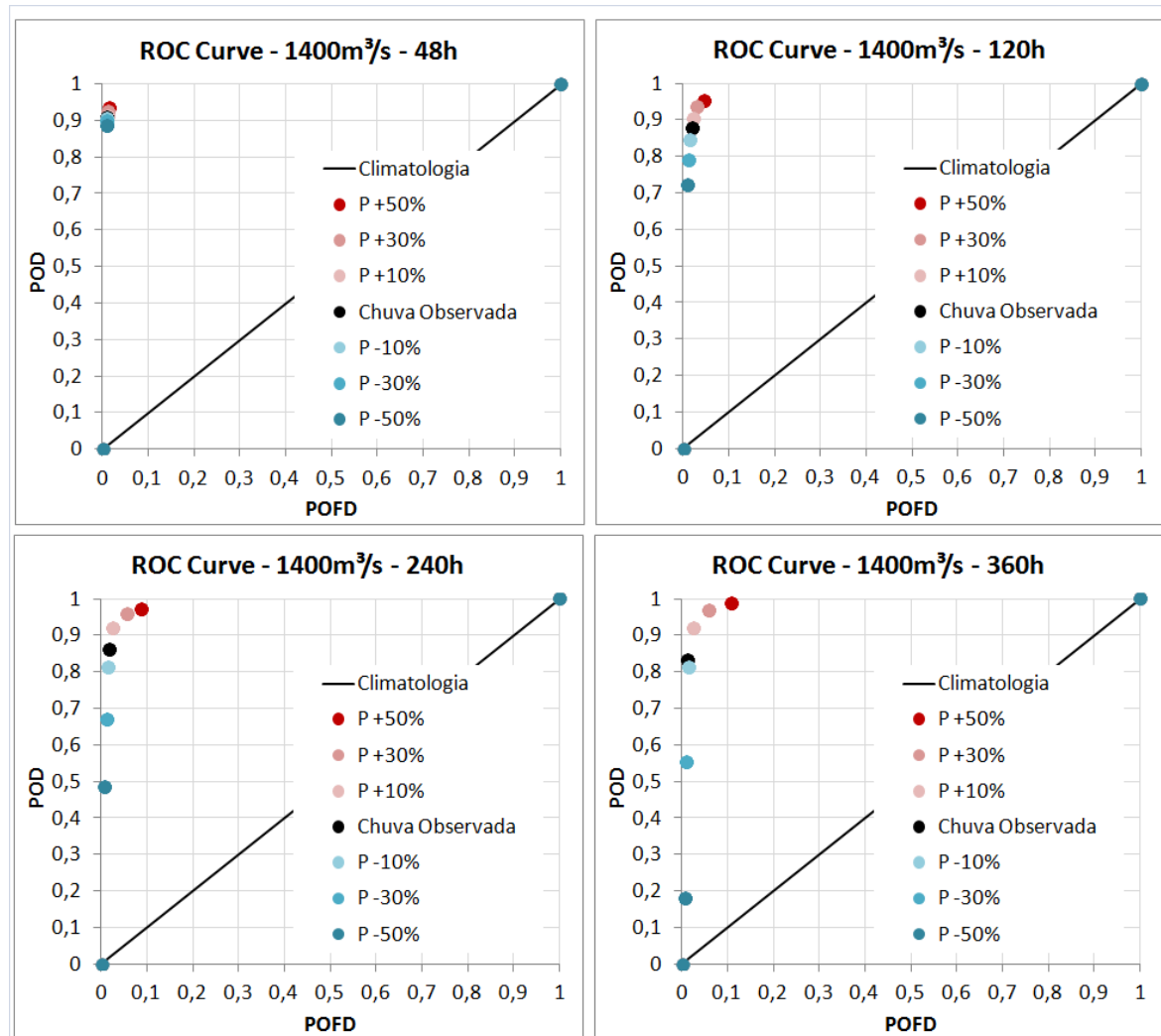


Figura 30. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Alto São Francisco.

Os resultados de todas as métricas mostram, conforme esperado, que com o aumento do horizonte de previsão temos um aumento nos erros, pois os horizontes iniciais da previsão de vazão estão mais sujeitos a influência dos dados observados antes do início da previsão, da assimilação de dados, e da correção de saídas. Além disso, de uma forma geral, todas as métricas também mostram um maior erro com maiores horizontes de previsão, onde, apesar do viés na chuva ter sido aplicado de forma constante e positiva ao longo da previsão, ele tem um efeito acumulado na bacia hidrográfica, que culmina em maiores erros ao final da previsão. Ou seja, eles evidenciam uma complexidade da previsão hidrológica onde chuvas relativamente erradas já nos primeiros horizontes de previsão podem causar alterações nos estados do modelo hidrológico que vão afetar as previsões para os passos de tempo imediatamente posteriores, amplificando assim a cascata de incertezas.

Nos resultados de erro média absoluto (EMA) e erro médio relativo (EMR) para o modelo da bacia do Alto São Francisco são verificadas duas características consideradas importantes. A primeira é que um viés positivo nas precipitações previstas causou erros mais elevados se comparados com os erros relacionados com um viés negativo nas chuvas previstas. Isto é exemplificado pela curva da chuva com viés de +50% estar por cima da curva com viés -50% no gráfico de EMA. A segunda característica é que os vieses na chuva não necessariamente causaram um impacto de mesma magnitude nos erros na previsão de vazão. Principalmente quando o viés é negativo. Isto é exemplificado pelos vieses de +30% e +50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a 0,31 e 0 a 0,53 ao longo dos horizontes de previsão. E pelos vieses de -30% e -50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a -0,19 e 0 a -0,28 ao longo dos horizontes de previsão.

Os resultados de correlação indicaram que vieses negativos na previsão são mais impactantes em termos de correlação do que vieses positivos, com as curvas relacionadas com o viés negativo de -30% e -50% abaixo das demais curvas obtidas. De fato, as curvas relacionadas com um viés positivo na previsão causaram pouco impacto em termos de correlação. Este resultado acontece por que, do jeito com que foi gerado, um viés negativo na chuva faz toda a série histórica de chuva ficar mais homogênea, e próxima de zero, fazendo assim com que o modelo hidrológico responda de forma mais amena às chuvas que causam cheias. Isto diminui a correlação entre as séries observadas e previstas. Já quando o viés é positivo, as cheias são sempre previstas (apesar de forma mais intensa), e as situações de não-cheia (dadas por chuva zero, por exemplo) também, o que mantém a correlação entre observações e previsões, apesar do viés.

Em termos de Brier Score, alterações de -10% e +10% não resultaram em alterações muito grandes nos resultados se comparados com aos resultados originais com chuva observada. Já os resultados com viés entre -30% e +30% foram similares entre si e mostraram BS variando de cerca de 0,01 até 0,055 ao longo dos horizontes de previsão. E as alterações de -50% a +50% indicaram um maior impacto do viés positivo (BS de 0,01 a até 0,097 ao longo dos horizontes), se comparado ao impacto do viés negativo (BS de 0, a até 0,083 ao longo dos horizontes). Este último resultado é verificado possivelmente por que o viés positivo causou alguns “alarmes falsos” de cheias em excesso, que penalizaram mais o modelo na métrica dos que as decisões dadas pelas não detecções do viés negativo.

Já a última métrica analisada, as curvas ROC, mostram justamente o impacto do viés nas previsões de vazão sobre as taxas de alarme falso e de alarmes verdadeiros na detecção de

limiares. Com um viés positivo na chuva os resultados mostram que os valores da probabilidade de detecção (POD) aumentam, mas isso também ocasiona um aumento nas taxas de alarme falso (POFD). E o aumento de uma POD de 0,9 para quase 1,0 significa um aumento na POFD de quase zero para 0,1. Com um viés negativo na chuva os resultados mostram em geral uma grande diminuição na POD quanto mais viés existe, sem nenhum benefício em termos de POFD (que já é próxima de zero).

## 5.2. Bacia do Doce

Os resultados das análises de sensibilidade para um viés na chuva na Bacia do Doce, utilizando as métricas *EMA*, *EMR*, *Coefficiente de Correlação*, *BS*, e *ROC Curves*, são apresentados nos itens seguintes. Os resultados são discutidos imediatamente depois.

Para as *ROC Curves* que resultam em um gráfico para cada um dos horizontes de previsão, foram escolhidas quatro antecedências para a apresentação dos resultados: 48h (2 dias), 120h (5 dias), 240h (10 dias), e 360h (15 dias). Para as métricas *BS* e curvas *ROC*, que também necessitam da determinação de um limiar de cálculo, foi utilizado o valor  $1600\text{m}^3/\text{s}$  nesta análise de sensibilidade, que corresponde a aproximadamente a vazão Q10 da curva de permanência da vazão afluente a UHE Aimorés.

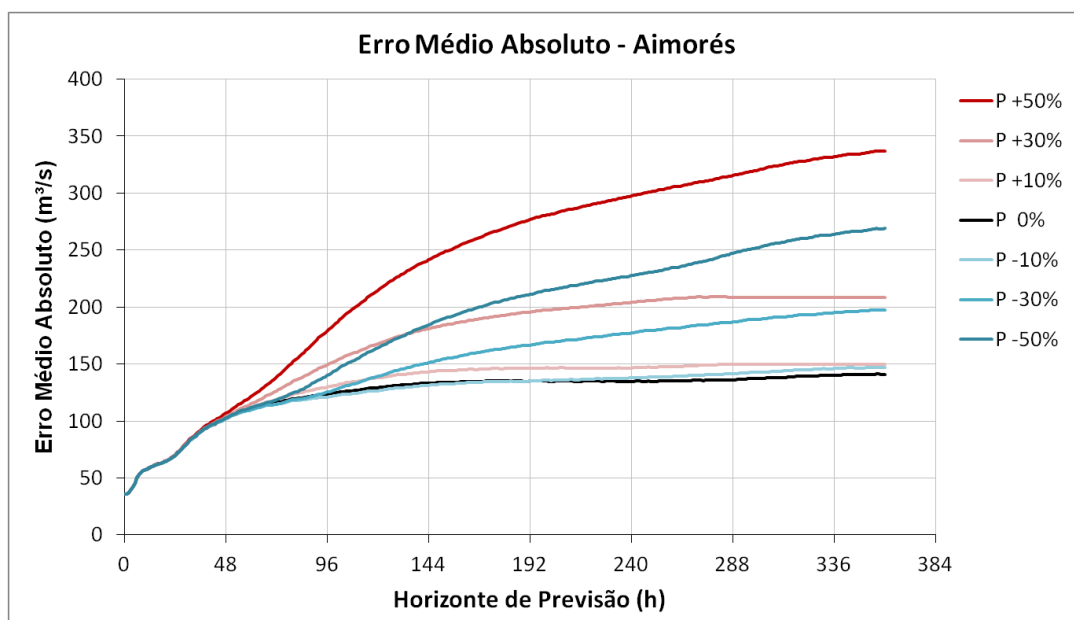


Figura 31. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Doce.

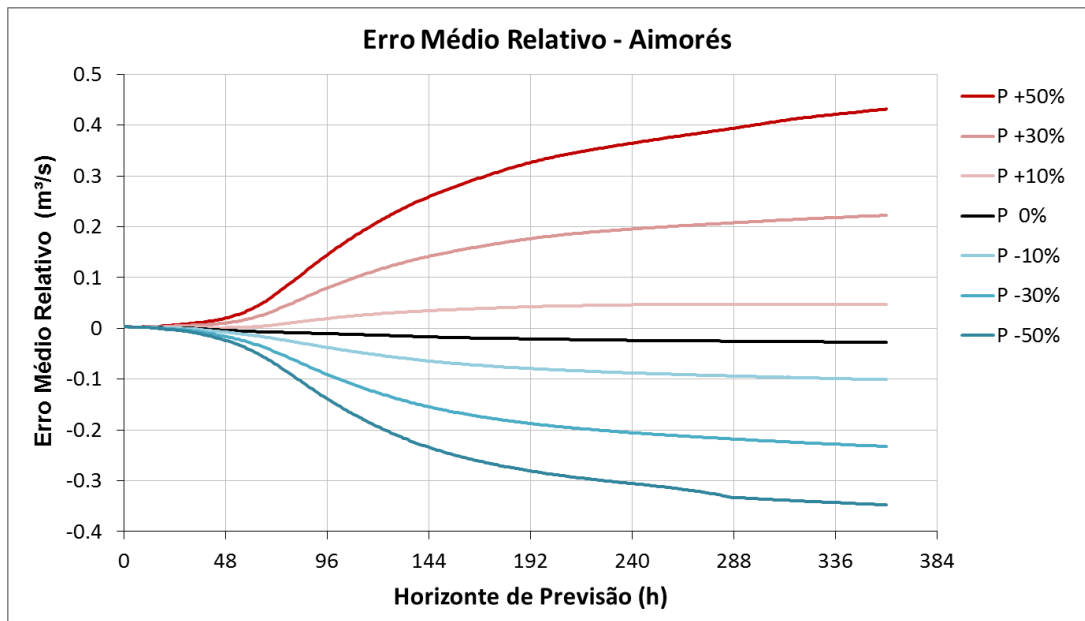


Figura 32. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Doce.

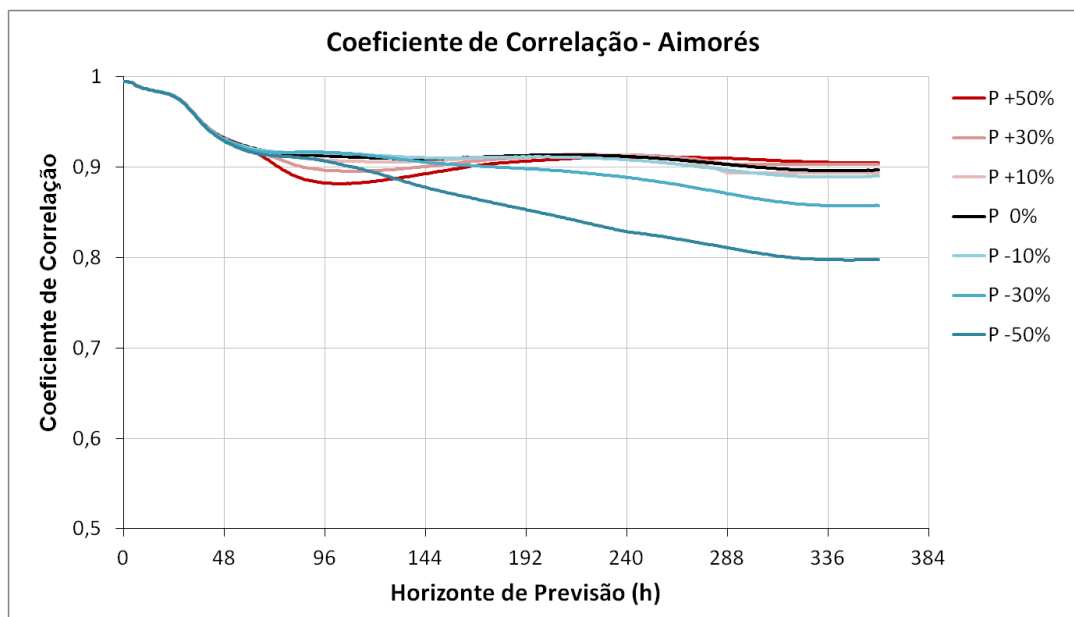


Figura 33. Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Doce.



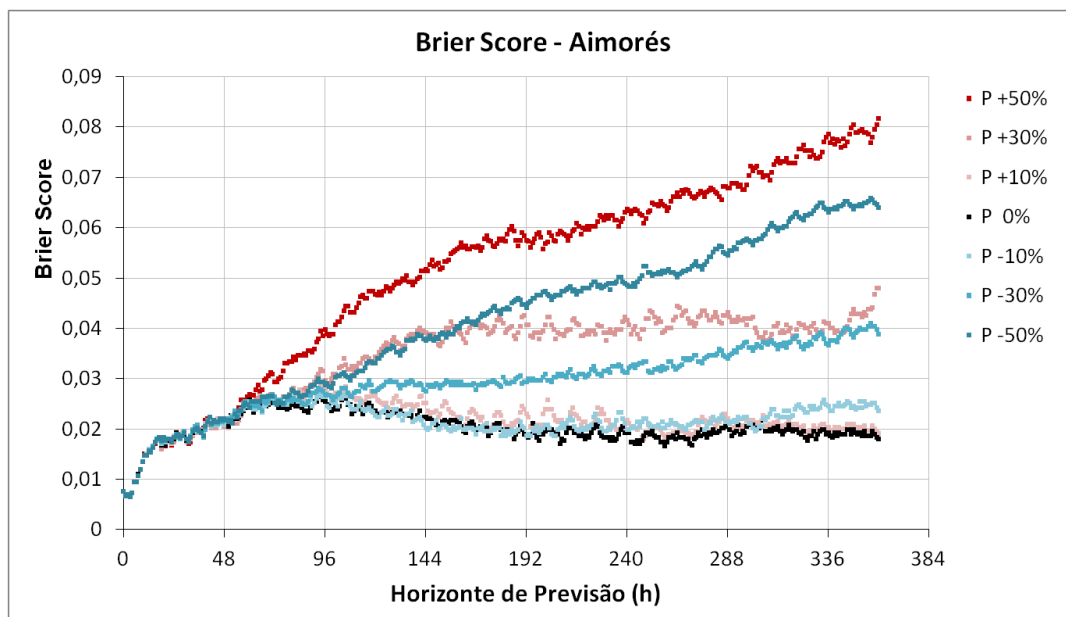


Figura 34. Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Doce.

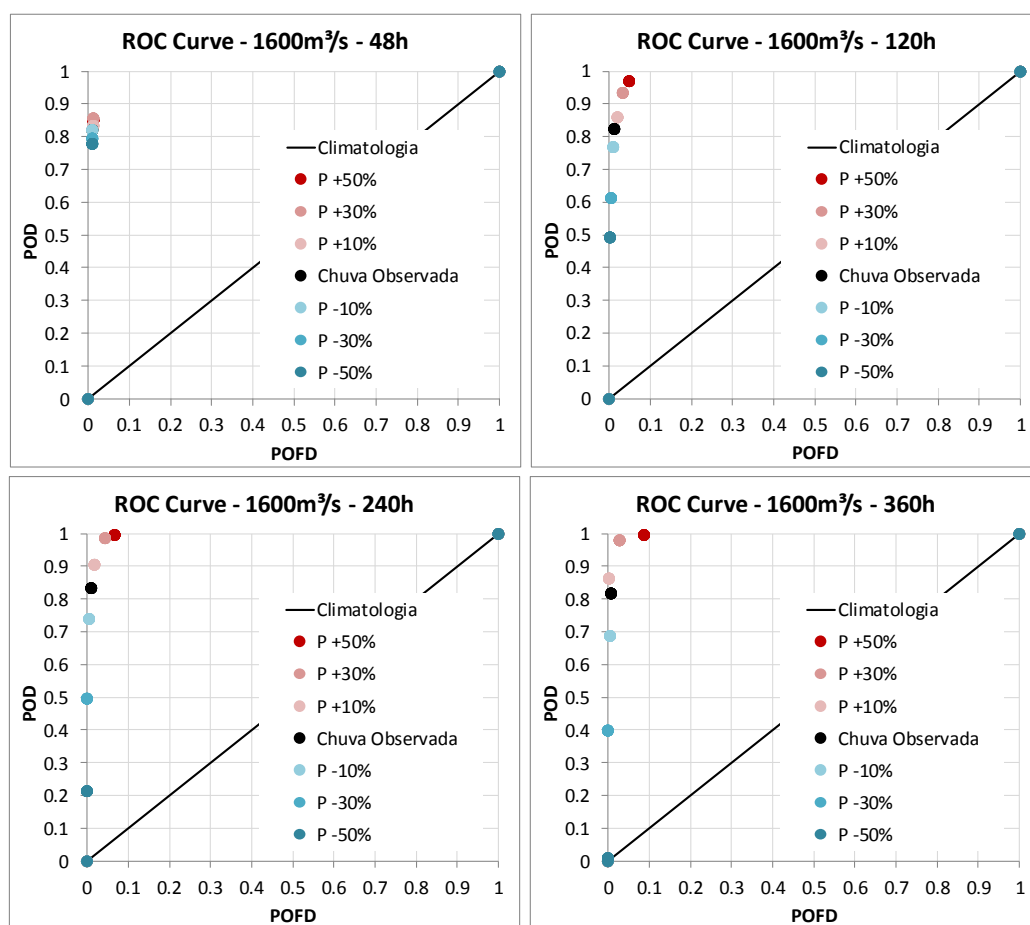


Figura 35. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Doce.

Assim como os resultados de Três Marias, os resultados para Aimorés mostram que com o aumento do horizonte de previsão temos um aumento nos erros, pois os horizontes iniciais da previsão de vazão estão mais sujeitos a influência dos dados observados antes do início da previsão, da assimilação de dados, e da correção de saídas. Além disso, de uma forma geral, todas as métricas também mostram um maior erro com maiores horizontes de previsão, onde, apesar do viés na chuva ter sido aplicado de forma constante e positiva ao longo da previsão, ele tem um efeito acumulado na bacia hidrográfica, que culmina em maiores erros ao final da previsão.

Nos resultados de EMA e EMR para o modelo da bacia do Doce também são verificadas as duas características consideradas importantes. A primeira é que um viés positivo nas precipitações previstas causou erros mais elevados se comparados com os erros relacionados com um viés negativo nas chuvas previstas. Isto é mostrado pela curva da chuva com viés de +50% estar por cima da curva com viés -50% no gráfico de EMA (portanto, os erros são maiores). A segunda característica é que os vieses na chuva não necessariamente causaram um impacto de mesma magnitude nos erros na previsão de vazão. Principalmente quando o viés é negativo. Isto é exemplificado pelos vieses de +30% e +50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a 0,20 e 0 a 0,42 ao longo dos horizontes de previsão. E pelos vieses de -30% e -50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a -0,21 e 0 a -0,35 ao longo dos horizontes de previsão.

Os resultados de correlação indicaram também que vieses negativos na previsão são mais impactantes em termos de correlação do que vieses positivos, com as curvas relacionadas com o viés negativo de -30% e -50% abaixo das demais curvas obtidas. Assim como comentado para Três Marias, acredita-se que este resultado acontece por que, do jeito com que foi gerado, um viés negativo na chuva faz toda a série histórica de chuva ficar mais homogênea, e isto diminui a correlação entre as séries observadas e previstas. Já quando o viés é positivo, as ocorrências das cheias e não cheias se mantêm, o que mantém a correlação entre observações e previsões, apesar do viés.

Em termos de Brier Score, para a bacia do rio Doce as alterações de -10% e +10% não resultaram em alterações muito grandes nos resultados se comparados com aos resultados originais com chuva observada sem viés. Já os resultados com viés positivo sugeriram erros maiores que os com viés negativo, onde os vieses de +30% e +50% na precipitação causarem BSs respectivamente variando de 0 a 0,05 e 0 a 0,08 ao longo dos horizontes de previsão. E pelos vieses de -30% e -50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0

a 0,04 e 0 a 0,065 ao longo dos horizontes de previsão. Possivelmente o maior impacto do viés positivo está relacionado com alguns “alarmes falsos” de cheias em excesso, que penalizaram mais o modelo na métrica.

As curvas ROC, que mostram justamente o impacto do viés nas previsões de vazão sobre as taxas de alarme falso e de alarmes verdadeiros, mostram justamente que com um viés positivo na chuva que os valores da probabilidade de detecção (POD) aumentam, mas isso também ocasiona um aumento nas taxas de alarme falso (POFD). Nos maiores horizontes de previsão (240h e 360h), com um viés de +50%, o aumento de uma POD de 0,9 para quase 1,0 significa um aumento na POFD de quase zero para 0,1. Com um viés negativo na chuva os resultados mostram em geral uma grande diminuição na POD quanto mais viés existe, sem nenhum benefício em termos de POFD (que já é próxima de zero).

### 5.3. Bacia do Tocantins

Os resultados das análises de sensibilidade para um viés na chuva na Bacia do Tocantins, utilizando as métricas *EMA*, *EMR*, *Coefficiente de Correlação*, *BS*, e *ROC Curves*, são apresentados nos itens seguintes. Os resultados são discutidos imediatamente depois.

Para as *ROC Curves* que resultam em um gráfico para cada um dos horizontes de previsão, foram escolhidas quatro antecedências para a apresentação dos resultados: 48h (2 dias), 120h (5 dias), 240h (10 dias), e 360h (15 dias). Para as métricas BS e curvas ROC, que também necessitam da determinação de um limiar de cálculo, foi utilizado o valor 7200m<sup>3</sup>/s nesta análise de sensibilidade, que corresponde a aproximadamente a vazão Q10 da curva de permanência da vazão afluente a UHE Estreito.

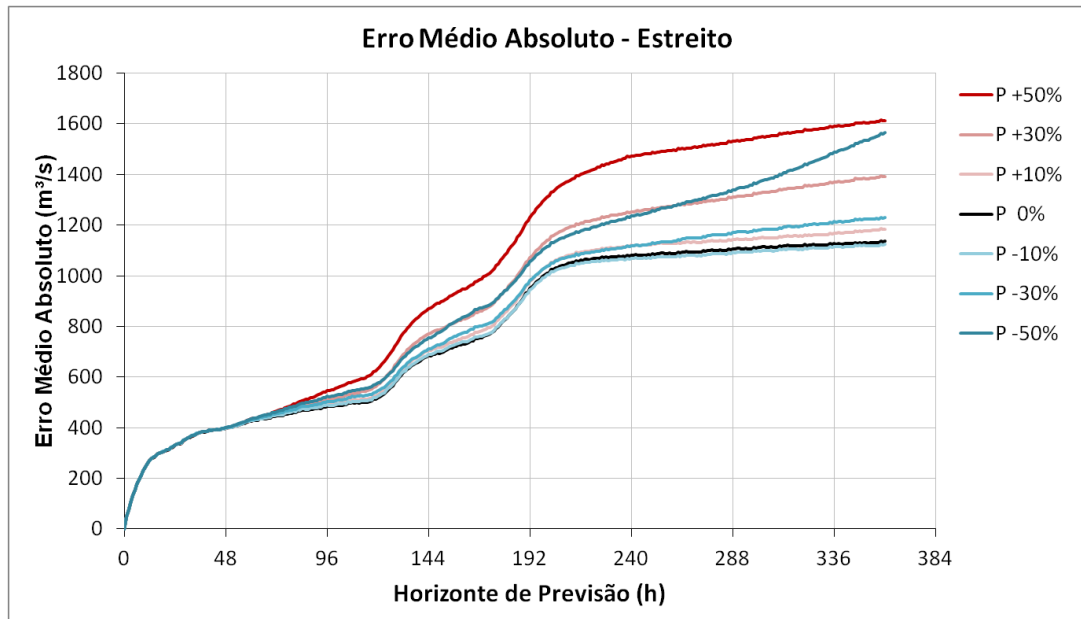


Figura 36. Resultados de EMA na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins.

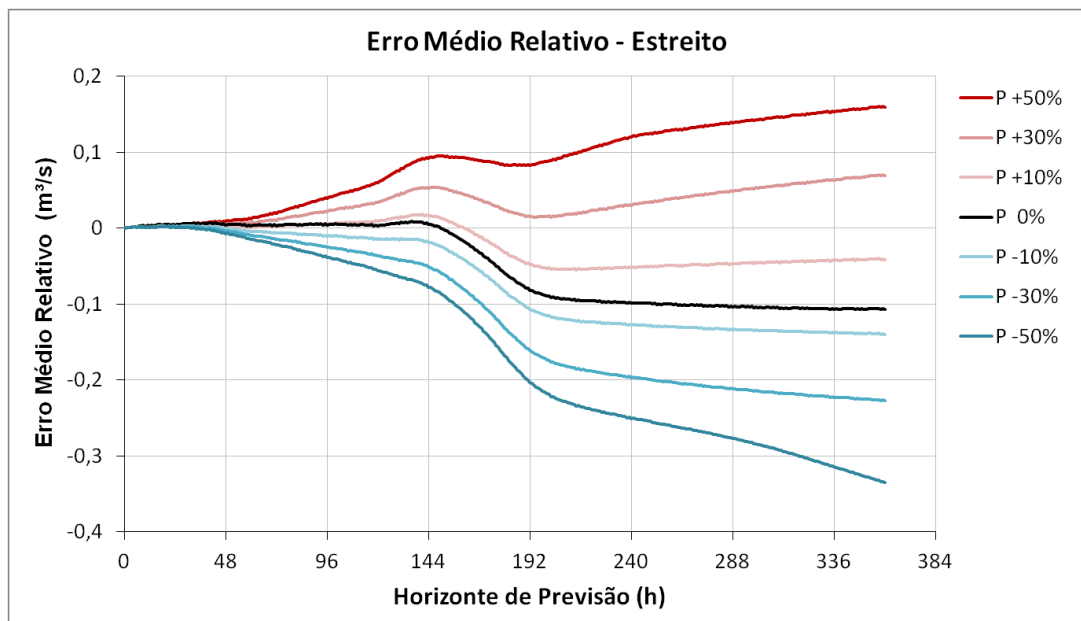
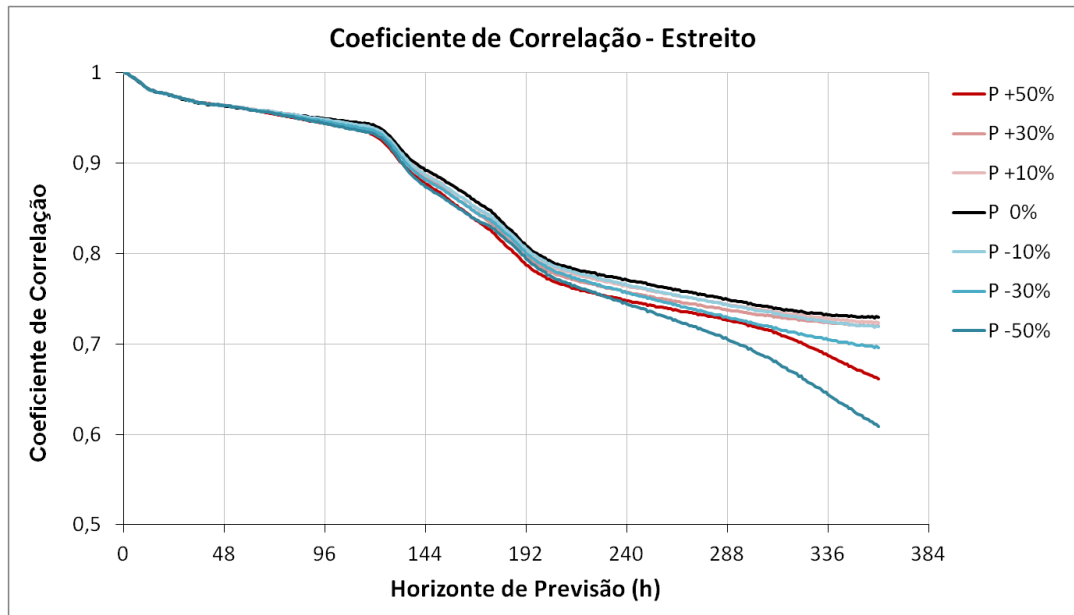
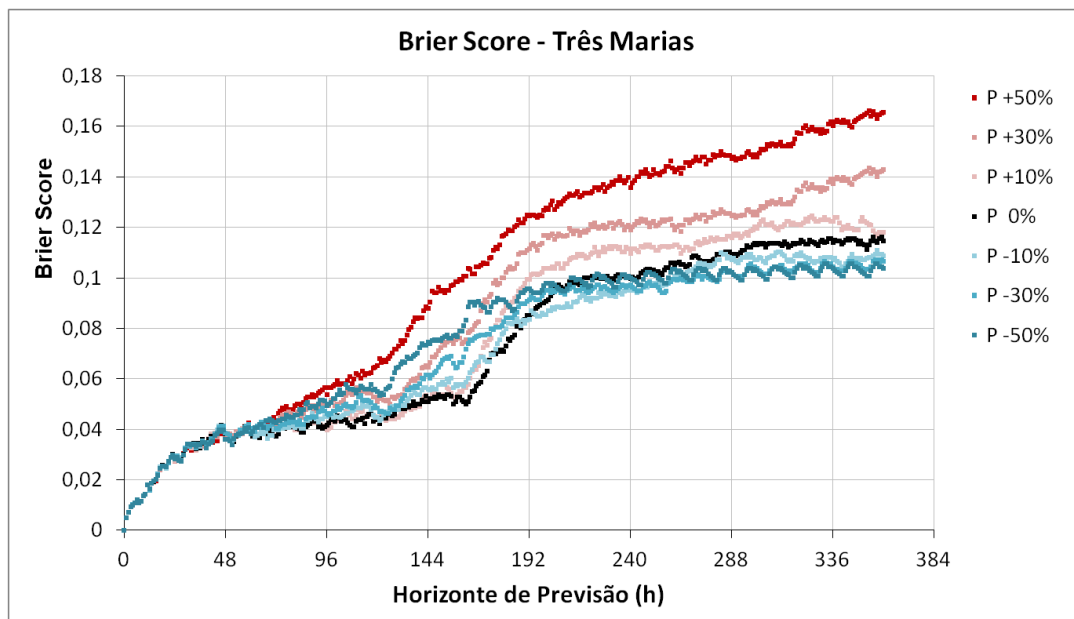


Figura 37. Resultados de EMR na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins.



**Figura 38.** Resultados do coeficiente de correlação na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins.



**Figura 39.** Resultados de BS na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins.

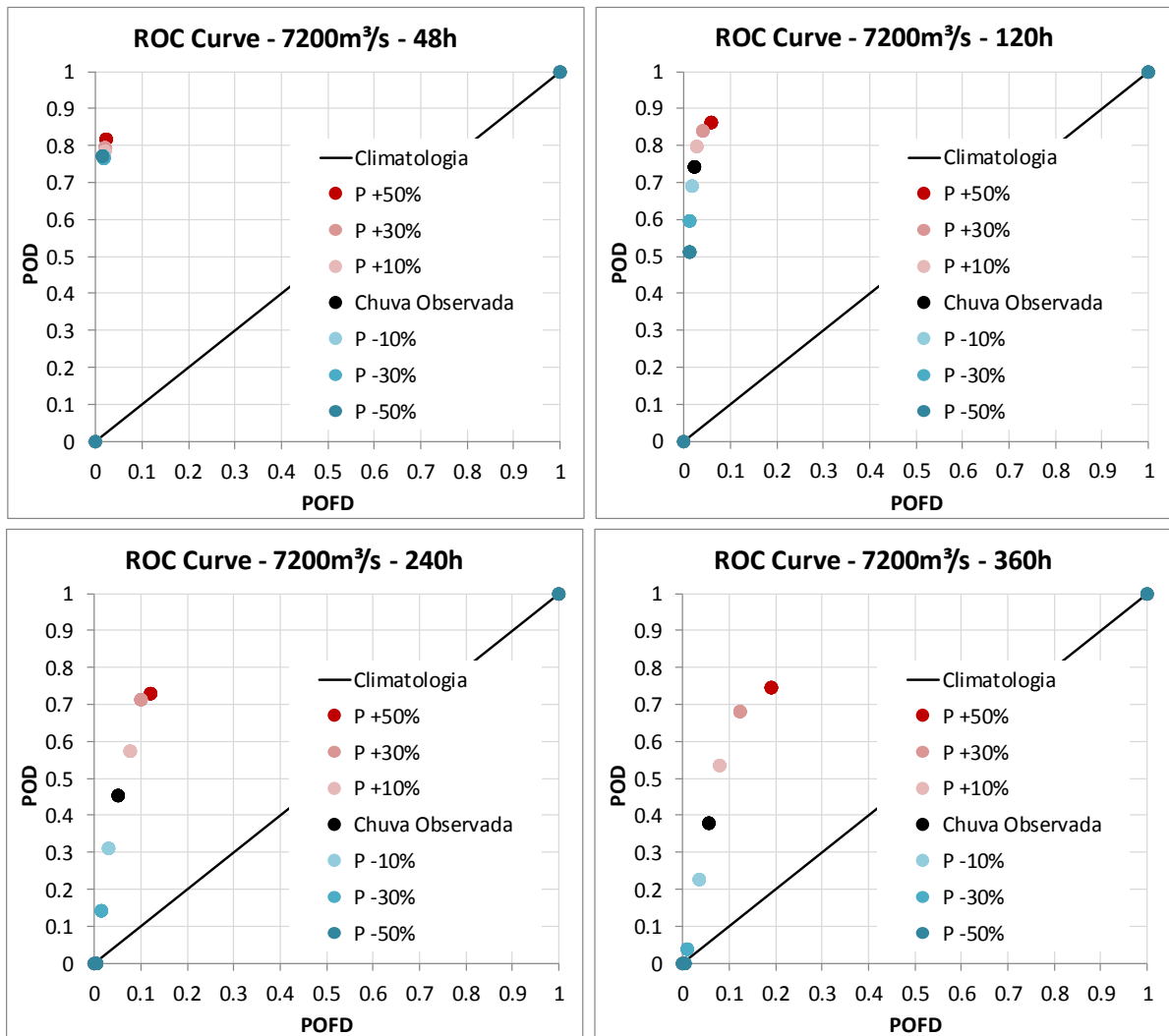


Figura 40. Curvas ROC obtidas na análise de sensibilidade para a bacia do Tocantins.

Assim como para as outras duas bacias analisadas, os resultados para a bacia do Tocantins mostram que com o aumento do horizonte de previsão temos um aumento nos erros, pois os horizontes iniciais da previsão de vazão estão mais sujeitos a influência dos dados observados antes do início da previsão, da assimilação de dados, e da correção de saídas. Além disso, de uma forma geral, todas as métricas também mostram um maior erro com maiores horizontes de previsão, onde, apesar do viés na chuva ter sido aplicado de forma constante e positiva ao longo da previsão, ele tem um efeito acumulado na bacia hidrográfica, que culmina em maiores erros ao final da previsão.

Contudo, os resultados para a bacia do Tocantins possuem uma característica diferenciada dos demais. A partir do horizonte de previsão de aproximadamente 120h o formato das curvas que mostram os erros se altera, subindo mais rapidamente até cerca de

240h. Esta alteração mais brusca nos erros das previsões acontece devido ao formato como os experimentos foram rodados, onde as defluências das usinas são consideradas como completamente conhecidas nos três primeiros dias da previsão, e a partir daí as usinas são consideradas como operando a fio d'água. Para exemplificar isto pode ser considerada a curva de EMR, que mostra um erro próximo de zero até aproximadamente 120h, e posteriormente um EMR na ordem de -0,1 a partir das 192h.

Nos resultados de EMA e EMR também é verificado que um viés positivo nas precipitações previstas causou erros mais elevados se comparados com os erros relacionados com um viés negativo nas chuvas previstas. Isto é mostrado pela curva da chuva com viés positivo estarem por cima das curvas com viés negativo no gráfico de EMA (portanto, os erros são maiores). Também é verificado que os vieses na chuva não necessariamente causaram um impacto de mesma magnitude nos erros na previsão de vazão. Isto é exemplificado pelos vieses de +30% e +50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a 0,08 e 0 a 0,16 ao longo dos horizontes de previsão. E pelos vieses de -30% e -50% na precipitação causarem EMRs respectivamente variando de 0 a -0,22 e 0 a -0,33 ao longo dos horizontes de previsão.

Os resultados de correlação indicaram também que vieses negativos na previsão são mais impactantes em termos de correlação do que vieses positivos, especialmente nos horizontes finais da previsão. Até cerca de 240h de horizonte os coeficientes de correlação são muito próximos.

Em termos de Brier Score para a bacia do Rio Tocantins as alterações causadas por um viés negativo em geral não resultaram em alterações muito grandes nos resultados se comparados com aos resultados originais com chuva observada, com exceção dos resultados para 96h e 192h, onde o BS foi um pouco mais elevado. Da mesma forma, os resultados para o viés de +10% não foram muito diferentes dos resultados obtidos com a chuva sem viés. Já as alterações de +30% a +50% indicaram um maior impacto (respectivamente de 0 a até 0,014, e 0 a até 0,0161 ao longo dos horizontes). Este resultado também é verificado possivelmente por que o viés positivo causou mais “alarmes falsos” de cheias em excesso, que penalizaram mais o modelo na métrica dos que as decisões dadas pelas não detecções do viés negativo.

As curvas ROC, que mostram o impacto do viés nas previsões de vazão sobre as taxas de alarme falso e de alarmes verdadeiros, mostram que com um viés positivo na chuva que os valores da probabilidade de detecção (POD) aumentam, mas isso também ocasiona um

---

aumento nas taxas de alarme falso (POFD). Nos maiores horizontes de previsão (240h e 360h), com um viés de +50%, o aumento de uma POD de 0,45 para valores em torno de 0,7 significa um aumento na POFD de quase de 0,05 para valores entre 0,1 e 0,2. Com um viés negativo na chuva os resultados mostram em geral uma grande diminuição na POD quanto mais viés existe, com uma pequena diminuição em termos de POFD.

---



## 6. Resultados das Análises de Chuva

Os resultados apresentados neste capítulo são relacionados ao desempenho dos EPS usados nos HEPS para a previsão da chuva média nas bacias hidrográficas de estudo de caso.

Esta análise permite obter um primeiro retrato do desempenho dos EPS e possibilita compreender posteriormente como as incertezas relacionadas apenas à chuva se propagaram através do modelo hidrológico e se refletem nos resultados de vazão.

Como as análises de chuva são mais complexas que as análises de vazão, pois elas também têm a dimensão da distribuição espacial associada (a análise de vazão é geralmente feita para um ponto, como um posto fluviométrico) considerou-se aqui a chuva média sobre a área da bacia hidrográfica como região de análise.

Esta simplificação pode, por exemplo, levar a resultados ligeiramente diferentes entre o desempenho de um modelo para a previsão de chuvas médias na bacia, e o seu desempenho para a previsão de vazões. Pois ocorrências pontuais de chuva não são consideradas, por exemplo. Todavia, dada a dimensão das bacias analisadas, a resolução espacial dos modelos meteorológicos e os dados de chuva disponíveis, ela foi necessária para permitir a análise. E na verificação dos resultados o impacto desta consideração também é considerado.

As análises de chuva foram realizadas para a chuva prevista acumulada em 24h, ou seja, os resultados das métricas foram computados para a chuva total prevista para cada dia do horizonte de previsão.

Estas simplificações também estão de acordo com o citado por Ahrens e Jaun (2007), que falam que as saídas em formato de grade dos modelos meteorológicos não devem ser avaliadas diretamente sem algum tipo de suavização, para que os resultados sejam numericamente mais representativos. No caso deste trabalho, a suavização é dada pelo cálculo da chuva média sobre a bacia e na agregação dos dados em 24h, assim como os próprios Ahrens e Jaun (2007) fizeram.

Visando compreender o comportamento das previsões para diferentes condições de chuva, os resultados foram computados considerando toda a precipitação e mais dois limiares de chuva: 5mm e 15mm. Esta prática de considerar limiares na avaliação de desempenho de previsões de chuva visa analisar o resultado dos modelos meteorológicos excluindo a chuva nula, e para situações onde a chuva é mais intensa e causa maiores efeitos sobre a vazão.

Estes limiares foram escolhidos com base no número de amostras disponíveis para cada o cálculo das estatísticas. Adicionalmente, para as métricas *Rank Histogram*, *ROC Curves*, e *Reliability Diagrams*, que resultam em um gráfico para cada um dos horizontes de previsão, foram escolhidas quatro antecedências para a apresentação dos resultados: 48h (2 dias), 120h (5 dias), 240h (10 dias), e 360h (15 dias).

Adicionalmente, antes da análise das métricas de qualidade das previsões, é mostrada uma verificação da média e do espalhamento dos conjuntos através de uma análise de climatologia da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação dos ensembles.

Finalmente, é válido lembrar que a chuva observada nas bacias hidrográficas não é necessariamente perfeita, uma vez que possui incertezas associadas com a baixa densidade de postos, erros de medição, entre outras. Contudo, ela é a informação disponível e foi usada como a verdade no cálculo das métricas.

Os resultados das análises de chuva, para cada uma das bacias hidrográficas estudadas, são apresentados a seguir.

## 6.1. Bacia do Alto São Francisco

Os resultados das análises de chuva para a Bacia do Alto São Francisco, para cada uma das métricas avaliadas, são apresentados nos itens seguintes. Os resultados de cada métrica são apresentados e descritos em cada um dos itens. Mas o seu significado e suas implicações (discussões dos mesmos) são feitas de maneira conjunta em um item específico de resumo e discussões dos achados ao final da sequência mostrada.

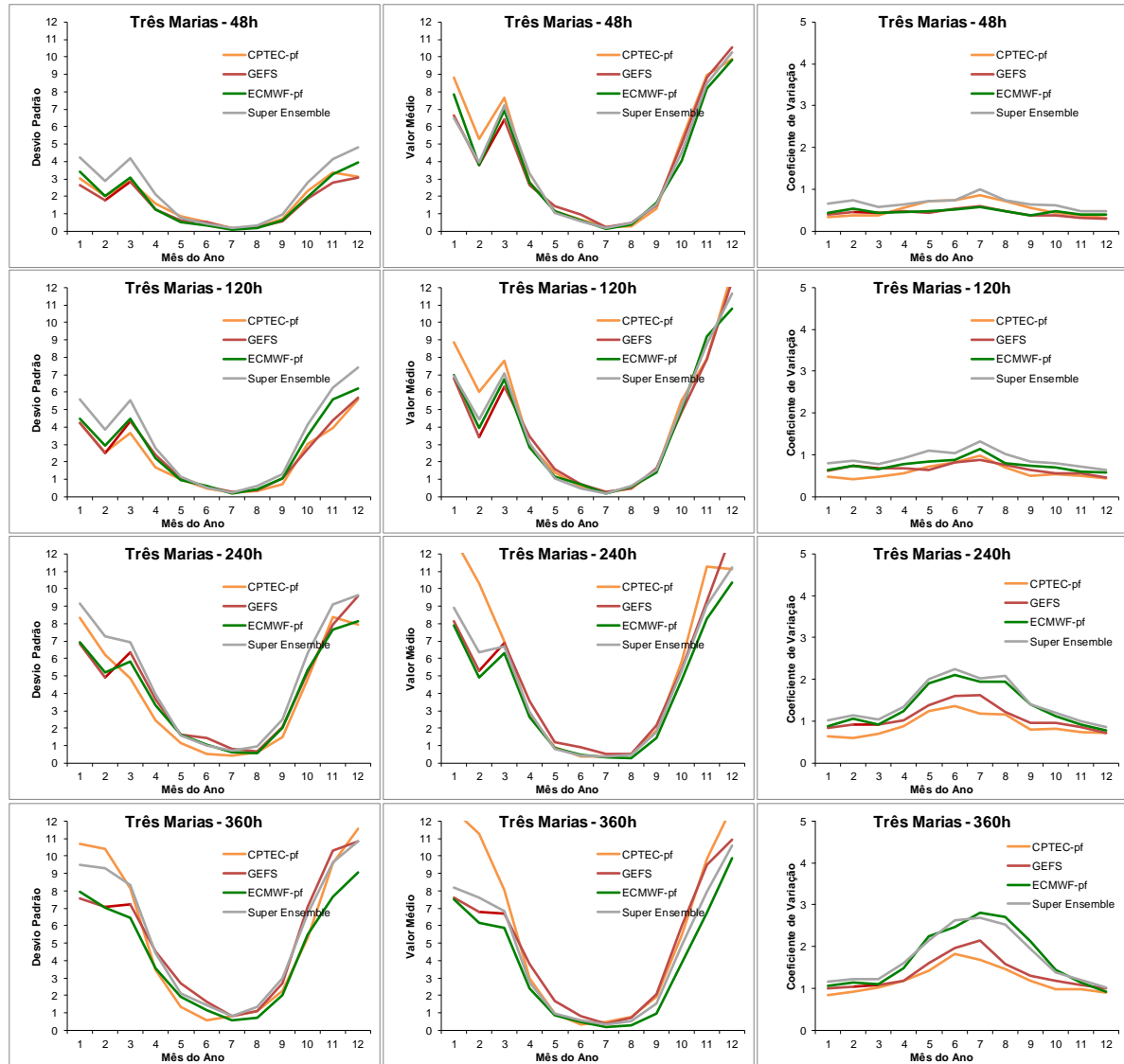
O número de amostras usadas nestes cálculos para o Alto São Francisco foi:

- Todos os dados – 3131 amostras
- >5mm - 664 amostras
- >15mm - 204 amostras

### 6.1.1. Análise da climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles

Na Figura 41 é apresentada uma análise do desvio padrão, da média, e do coeficiente de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a

previsão foi emitida. Os valores apresentados para cada mês correspondem ao valor médio computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.



**Figura 41. Climatologia do desvio padrão das previsões de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.**

O formato de “U” das curvas de média e desvio mostra que durante os meses de Maio a Setembro (meses secos do clima tropical) o desvio padrão e a média das previsões são menores, possivelmente por que todos os membros do conjunto geralmente preveem chuvas próximas de zero. Já durante os meses de Outubro a Abril os valores de desvio e média são maiores, por que este é o período chuvoso nas bacias.

Em relação às médias, para os modelos ECMWF-pf e GEFS o valor da chuva média prevista é sempre similar em todos os horizontes de previsão. Já para o CPTEC-pf nota-se um

aumento dos valores de chuva média prevista nos maiores horizontes especialmente nos meses de Janeiro a Março. Ou seja, ele tende a prever mais chuva nestes meses nos maiores horizontes de previsão.

Com o aumento dos horizontes de previsão também nota-se um aumento no desvio padrão das previsões. Por exemplo, na antecedência de 120h os desvios padrão para o mês de Janeiro são próximos de 4mm, e na antecedência de 360h os desvios padrão para o mês de Janeiro estão em torno de 8mm a 11mm. Este aumento possivelmente acontece devido ao aumento da incerteza das previsões com as antecedências crescentes. Ou seja, com o aumento do horizonte de previsão mais os membros dos conjuntos diferem entre si.

Em relação ao coeficiente de variação, nota-se que durante os meses mais chuvosos seu valor está posicionado entre 0,5 e 1, ou seja, os desvios padrão dos EPS correspondem a valores entre 50% e 100% do valor da média. Já para os meses mais secos os valores do coeficiente de variação foram mais elevados e chegaram até quase 3 em alguns casos. Isto acontece basicamente devido aos valores trabalhados nesta época serem mais baixos, onde desvios padrão na ordem de 1mm a 2mm divididos pelas médias menores que a unidade sugerem os coeficientes de variação mais elevados.

Na comparação entre os EPS geralmente os coeficientes de variação foram muito similares entre os modelos na época chuvosa.

### **6.1.2. Erro Médio Absoluto**

Os resultados obtidos para o Erro Médio Absoluto (EMA) de cada um dos EPS, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 42, Figura 43 e Figura 44

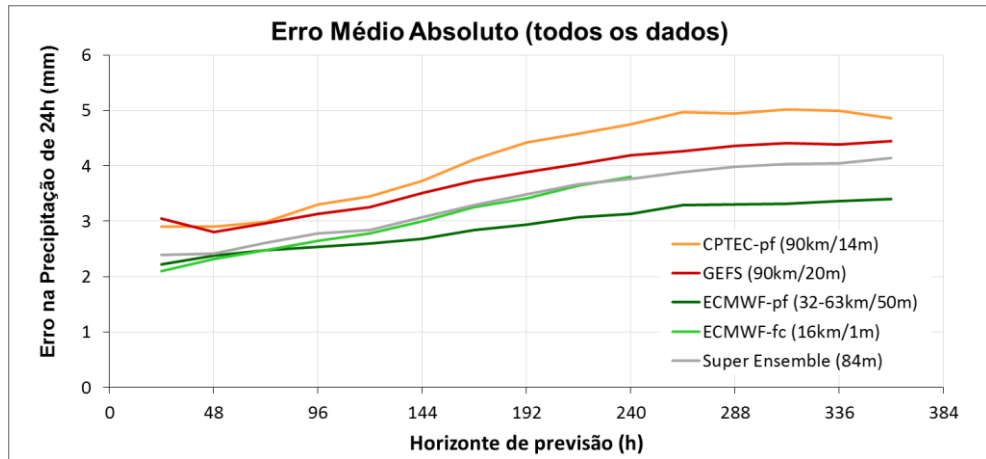


Figura 42. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco.

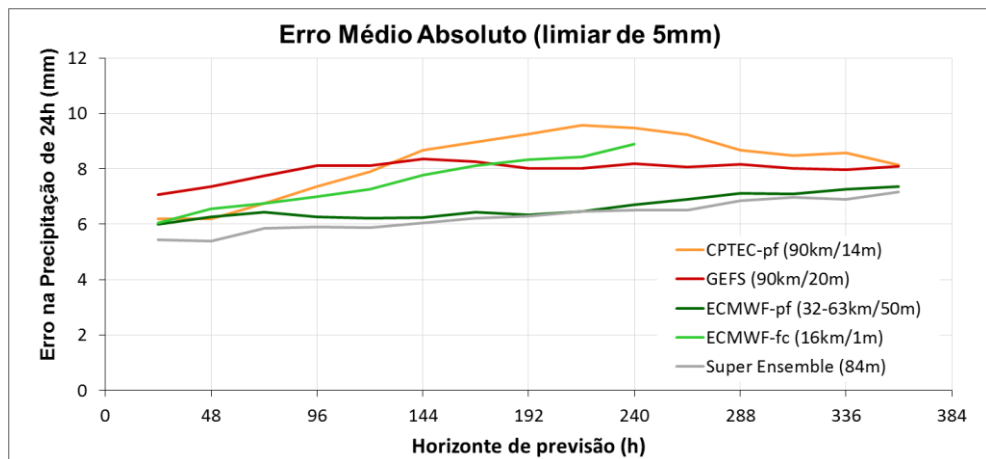


Figura 43. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco.

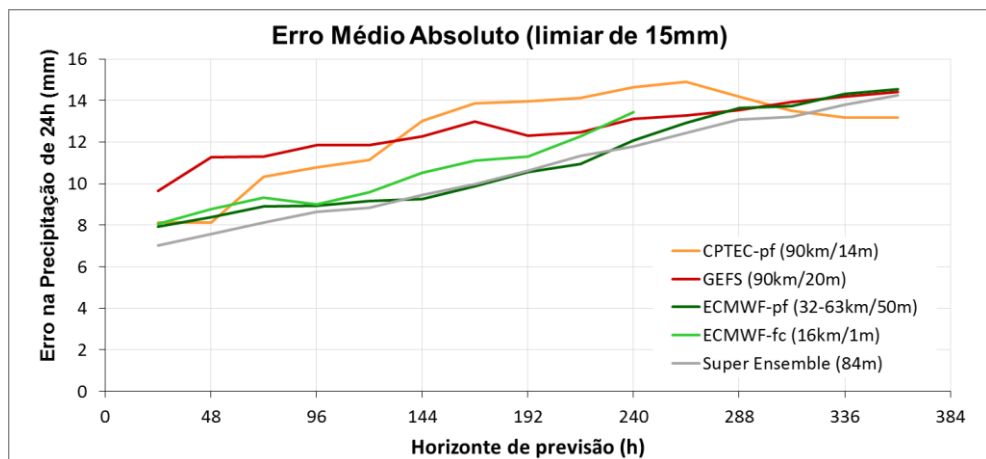


Figura 44. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco.

O primeiro resultado verificado é que, em geral, os erros tendem a aumentar com o aumento do horizonte de previsão, o que é esperado uma vez que as incertezas aumentam com a distância entre o momento do início da previsão e o futuro previsto.

A média do CPTEC-pf em geral apresentou um erro mais elevado que os demais EPS a partir do horizonte de previsão em torno de 120h. Considerando todos os dados, os erros variaram entre 3mm e 5mm ao longo de todos os horizontes de previsão. Para o limiar de 5mm os erros variaram entre 6mm e 10mm. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 8mm a até 15mm ao longo dos horizontes de previsão. Os erros da média do CPTEC-pf em geral cresceram mais rápido se comparados aos erros dos demais EPS, e apresentaram um comportamento diferenciado nas últimas antecedências, quando diminuíram e apontaram uma melhora nas últimas antecedências. Este comportamento diferenciado no final do horizonte de previsão provavelmente está relacionado com o que foi verificado na análise de climatologia das chuvas médias previstas, onde se notou que para alguns meses nos maiores horizontes de previsão o modelo tende a prever mais chuvas.

Até o horizonte de previsão de aproximadamente 120h (5 dias) a média do EPS que apresentou maiores erros para as análises com limiar foi a do GEFS. Para as análises considerando todos os dados o desempenho foi um pouco melhor que o do CPTEC-pf, variando entre 3mm e 4,5mm ao longo de todo o horizonte de previsão. Para o limiar de 5mm os erros das previsões variaram entre 7mm e 8mm ao longo dos horizontes de previsão, variando pouco desde as antecedências iniciais até as finais. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 10mm a até 14mm ao longo dos horizontes de previsão, aumentando ao longo do intervalo.

Dentre os três EPS testados o que apresentou melhor desempenho foi o ECMWF-pf, com a linha que indica o erro médio do conjunto sempre abaixo das demais. Considerando todos os dados os erros das previsões variaram entre 2,2mm e 3,2mm ao longo dos horizontes de previsão. Para a análise com o limiar de 0,5mm os erros variaram entre 6mm e 7mm. Já para o maior limiar (15mm) os erros variaram entre 7mm a 14mm ao longo dos horizontes de previsão, aumentando ao longo do intervalo, porém sempre menor que os demais EPS até a antecedência 300h aproximadamente.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo erro médio é menor que os erros médios de todos os demais EPS até as antecedências de aproximadamente 100h, para os limiares avaliados nas análises com limiar. Já para as análises sem limiar e nas antecedências maiores

das análises com limiar os resultados da média do Super Ensemble foram piores ou similares aos do ECMWF-pf.

A previsão determinística de referência utilizada, ECMWF-fc, apresentou para a análise com todos os dados erros que variaram entre 2mm e 3,8mm. Para o limiar de 5mm os erros foram de 6mm até 9mm. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 9mm a até 13mm ao longo dos horizontes de previsão. Os erros cresceram ao longo do horizonte de previsão, que é de 240h para a previsão determinística.

Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS pode-se afirmar que nem sempre os EPS apresentaram melhor desempenho que a previsão determinística. Especialmente as médias do CPTEC-pf e do GEFS em geral apresentaram piores resultados que a previsão determinística até o horizonte que ela estava disponível. Já o ECMWF-pf e o Super Ensemble sempre apresentaram resultados melhores que a previsão determinística em termos de EMA.

### 6.1.3. Erro Médio Relativo

Os resultados obtidos para o Erro Médio Relativo (EMR) para cada um dos EPS, previsão determinística, e mais Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 45, na Figura 46 e na Figura 47.

No caso das análises com todos os dados, nos cálculos foram considerados apenas os momentos em que a observação foi maior que zero, já que a métrica não pode ser calculada quando a observação é nula (denominador seria zero).

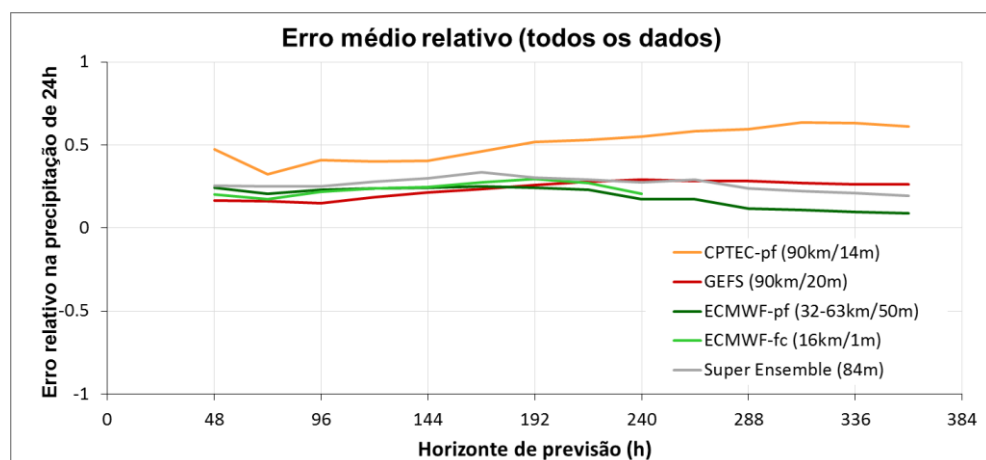
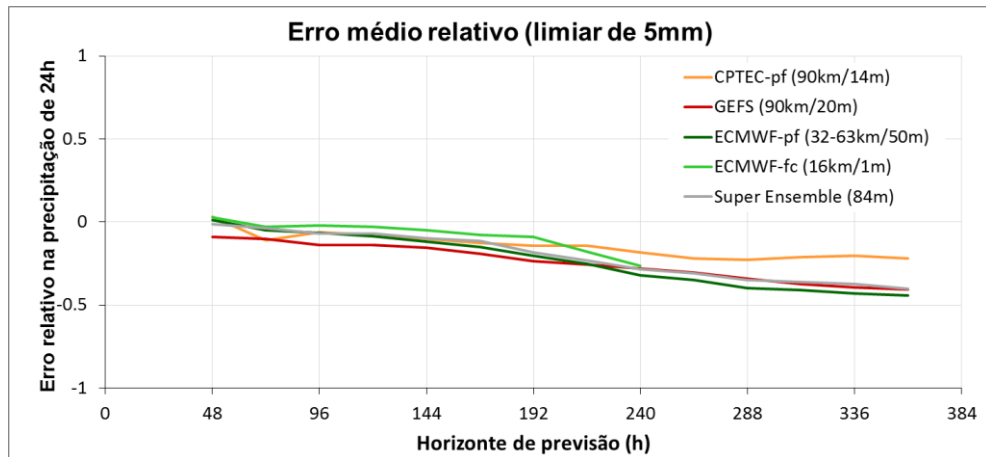
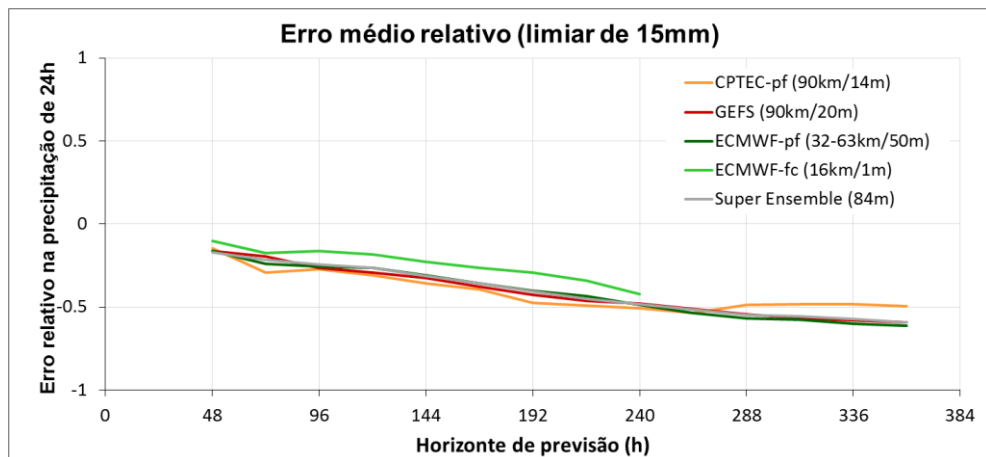


Figura 45. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco.



**Figura 46. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco.**



**Figura 47. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco.**

O primeiro resultado verificado nesta análise é que para a análise considerando todos os dados o viés foi em geral positivo, e já para as análises com limiares os erros tenderam a um viés negativo com o aumento do horizonte de previsão, ou seja, de falta de chuva. A tendência foi de que, quanto maior o limiar, mais negativo foi o erro. Ou seja, que quanto maior a chuva observada, maior a subestimativa dos EPS.

Possivelmente estes resultados de erro considerando todos os dados são influenciados pelos casos onde a chuva observada é muito próxima de zero, e são feitas previsões de ocorrência de chuva na bacia. Com isso, existe sempre uma tendência de viés positivo, e relativamente alto se forem considerados os possíveis pequenos valores em observações.

Os resultados da análise para o CPTEC-pf para todos os dados apontaram erros relativos positivos próximos de 0,5. Para o limiar de 5mm os erros foram de próximos de zero



até cerca de -0,3 na última antecedência. Já para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,1 e -0,5 ao longo do horizonte de previsão, e os erros do CPTEC-pf foram os menores nos horizontes maiores que 300h neste limiar.

Os resultados do GEFS apontaram erros relativos positivos próximos de 0,1 para o uso de todos os dados. Para o limiar de 5mm os erros foram entre 0 e -0,5 e para o limiar de 15mm os erros ficaram entre -0,1 e -0,6.

Já os erros médios relativos do ECMWF-pf para todos os dados variaram entre 0,2 e 0,05 ao longo do horizonte de previsão, diferindo dos demais modelos e diminuindo um pouco com o aumento das antecedências. Para o limiar de 5mm os EMR do ECMWF-pf foram entre 0 e -0,5 e para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,1 e -0,6, resultados similares aos resultados do GEFS.

Na comparação entre os EPS, em geral os resultados de todos foram similares. Na análise considerando todos os dados o CPTEC-pf se destaca um pouco por ter maiores EMR (pior desempenho).

O Super Ensemble apresentou desempenho muito próximo ao do ECWFMF-pf, porém com viés positivo um pouco mais acentuado na análise com todos os dados.

A previsão determinística de referência, ECMWF-fc, apresentou um desempenho em geral similar aos demais modelos para a análise com todos os dados e com limiar de 5mm. Na análise com 15mm de limiar ele foi ligeiramente mais próximo de zero que os EPS. Ela apresentou um EMR variando entre 0 e -0,2, e de -0,05 e -0,4 ao longo das suas 240h de horizonte de previsão nas duas análises com limiar, respectivamente.

#### **6.1.4. Correlação (r)**

Os resultados obtidos para o coeficiente de correlação (r) para cada um dos EPS usados, mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 48, Figura 49 e Figura 50.

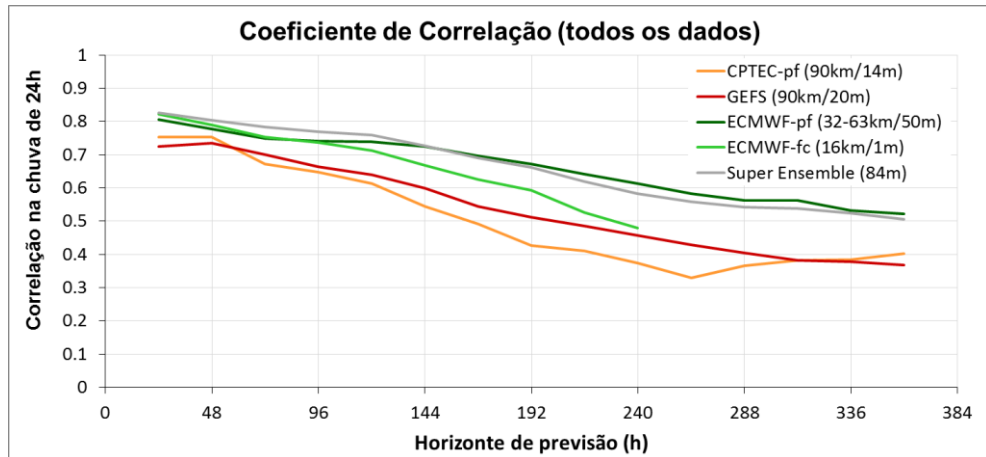


Figura 48. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco.

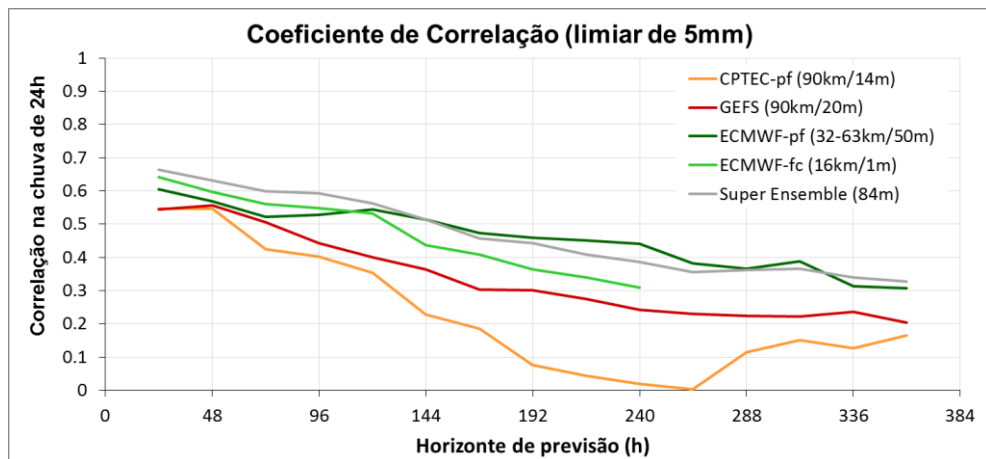


Figura 49. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco.

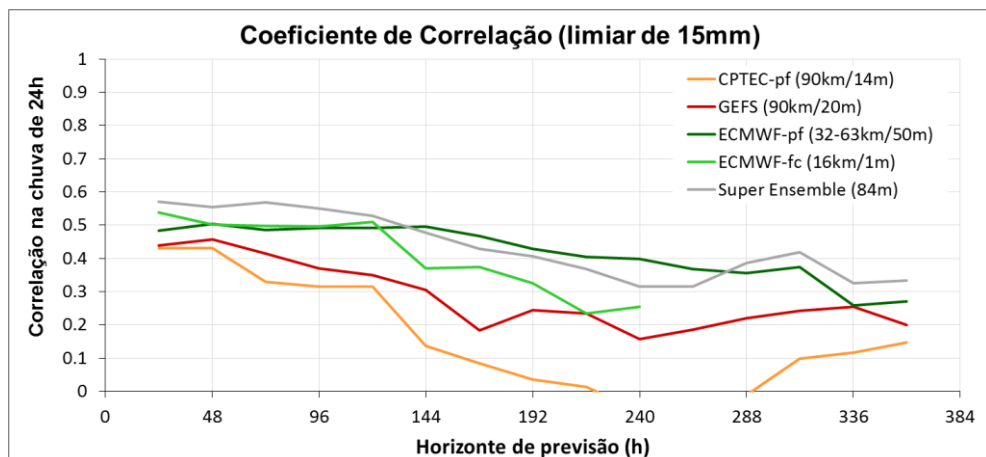


Figura 50. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco.

Conforme esperado com o aumento das incertezas, nesta análise também é verificado um pior desempenho do sistema com o aumento do horizonte de previsão, indicado por uma diminuição do coeficiente de correlação ao longo das antecedências.

Nesta análise, a média do conjunto do CPTEC-pf apresentou os menores valores em comparação com a média dos demais EPS em todos os horizontes de previsão. Ou seja, a chuva da média do conjunto do CPTEC-pf apresentou a pior relação linear com a chuva observada. Para a análise com todos os dados o coeficiente de correlação variou entre 0,7 e 0,3 ao longo dos horizontes de previsão. Para a análise com limiar de 5mm a correlação variou entre 0,55 e 0. Já com o limiar de 15mm as correlações variaram entre 0,42 até valores menores do que zero (indicando relação linear inversa) em antecedências entre 200h e 288h.

O coeficiente de correlação da média do CPTEC em geral decresceu ao longo do horizonte de previsão até cerca de 250h, onde a partir daí apresentam um comportamento um pouco diferente dos demais nas últimas antecedências, aumentando um pouco, mas sempre se mantendo abaixo dos valores encontrados para os outros EPS. Novamente, este comportamento diferenciado no final do horizonte de previsão provavelmente está relacionado com o que foi verificado na análise de climatologia das chuvas médias previstas, onde se notou que para alguns meses nos maiores horizontes de previsão o modelo tende a prever mais chuvas.

Para a média do conjunto do GEFS os resultados de correlação foram intermediários em comparação aos outros EPS. Na análise com todos o coeficiente variou entre 0,7 e 0,38. Para o limiar de 5mm o coeficiente variou entre 0,55 e 0,2 ao longo dos horizontes de previsão, decrescendo desde as antecedências iniciais até as finais. Já para o limiar maior (15mm) os valores de  $r$  variaram entre 0,42 e 0,2 diminuindo ao longo do intervalo.

Dentre os três EPS testados o que apresentou melhor desempenho foi o do ECMWF, com a linha que indica o coeficiente de correlação sempre acima das demais. Para a análise com todos os dados os valores de  $r$  variaram em torno de 0,8 à em torno de 0,5 ao longo dos horizontes de previsão. Para o limiar de 5mm o coeficiente variou entre 0,6 e 0,3. Já para o limiar maior (15mm) os valores variaram em torno de 0,48 a até em torno de 0,28 ao longo dos horizontes de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo desempenho da média é superior a média de todos os demais EPS até as antecedências de aproximadamente 100h-120h, para todos os

limiares avaliados. Já para as antecedências maiores, os resultados da média do Super Ensemble foram um pouco inferiores aos do ECMWF.

A previsão determinística de referência utilizada, ECMWF-fc, apresentou na análise com todos os dados uma correlação que variou entre aproximadamente 0,8 e 0,5 ao longo das 240h de horizonte de previsão. Para a análise com limiar de 5mm a correlação variou entre 0,65 e 0,3. E para a análise com limiar 15mm os valores variaram entre 0,55 a até 0,25 ao longo dos horizontes de previsão.

Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS verificou-se que a da previsão determinística apresentou muito similar ao ECMWF-pf para horizontes de previsão de até aproximadamente 120h. A partir das 120h, o desempenho do ECMWF-pf superou ligeiramente o desempenho da determinística. As médias do CPTEC-pf e do GEFS em geral apresentaram piores resultados que a previsão determinística até o horizonte que ela estava disponível.

Contudo, na comparação da previsão determinística com o Super Ensemble, a média do Super Ensemble foi praticamente sempre melhor que a determinística em todos os intervalos de tempo. Ou seja, a média dos EPS individualmente não foi melhor que a previsão determinística nas primeiras 120h, mas a sua agregação na forma de um conjunto maior foi.

### **6.1.5. CRPS Médio**

Os resultados obtidos para o CRPS Médio com cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

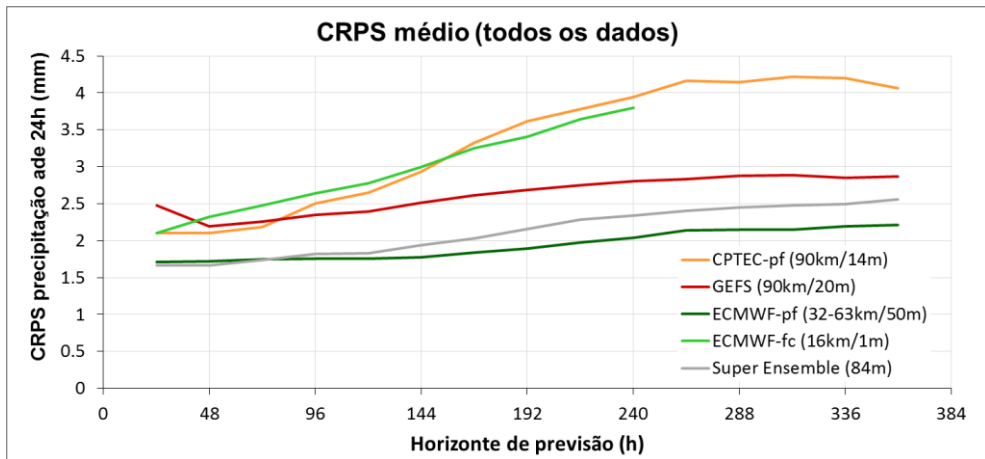


Figura 51. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Alto São Francisco.

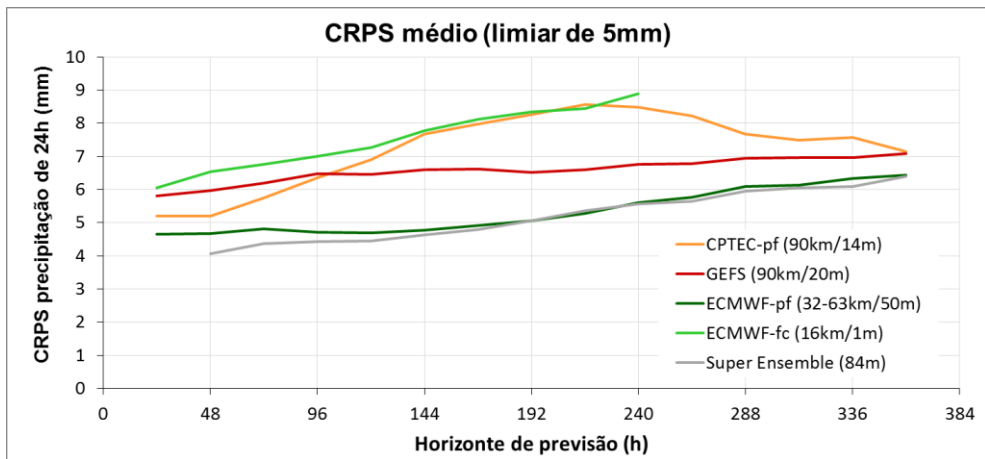


Figura 52. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco.

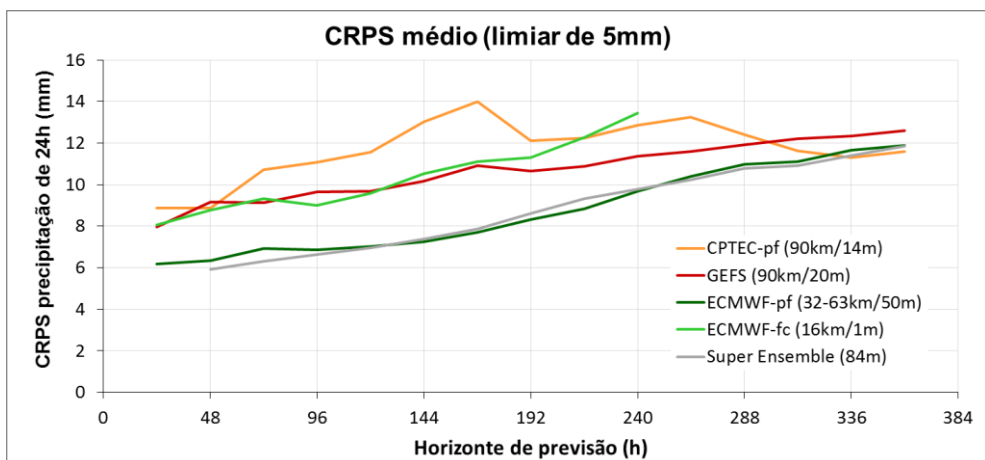


Figura 53. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco.

Da mesma forma que foi verificada na análise das métricas que consideram apenas a média do Ensemble, em geral os erros avaliados pelo CRPS médio tenderam a aumentar com o aumento do horizonte de previsão. Com exceção do CPTEC-pf para as análises com limiar, que após o aumento, apresentou uma pequena diminuição nos erros a partir de cerca de 300h de previsão. Como já comentado, este comportamento diferenciado no final do horizonte de previsão provavelmente está relacionado ao fato de que para alguns meses nos maiores horizontes de previsão o modelo tende a prever mais chuvas.

Em geral, o CPTEC-pf apresentou desempenho inferior aos demais EPS a partir do horizonte de previsão de 96h. Para a análise com todos os dados os valores de CRPS médio variaram entre 2mm e 4mm ao longo das antecedências. Considerando o limiar de 5mm os erros das previsões variaram entre 5mm e 9mm ao longo dos horizontes de previsão. Já para o limiar de 15mm os erros variaram entre 9mm a até 14mm ao longo dos horizontes de previsão. Nas últimas antecedências, quando os erros diminuíram um pouco, os resultados inclusive apontaram um dos melhores desempenhos na antecedência 360h para a análise de limiar de 15mm.

Até o horizonte de previsão de aproximadamente 96h (4 dias) o EPS que apresentou maiores erros foi o GEFS nas duas primeiras análises. Quando usados todos os dados os erros variaram entre 2,5mm e 3mm ao longo dos horizontes de previsão. Considerando o limiar de 5mm os erros das previsões variaram entre aproximadamente 5mm até 6,5mm ao longo dos horizontes de previsão. Já para o limiar de 15mm os erros variaram entre 8mm a até aproximadamente 12mm ao longo dos horizontes de previsão.

Novamente, entre os três EPS testados o que apresentou melhor desempenho de uma forma geral foi o ECMWF-pf, com a linha que indica o CRPS médio muitas vezes abaixo dos demais deste o começo até o fim dos horizontes de previsão. Para a análise com todos os dados os valores variaram entre 1,7mm até 2,2mm. Para o limiar de 5mm os valores variaram entre 4,8mm e 6,3mm. Já para o limiar de 15mm o CRPS médio variou entre 6mm e 12mm.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo CRPS médio só é menor que o dos demais EPS até as antecedências de aproximadamente 120h nas análises com limiar. Já para as antecedências maiores e para a análise com todos os dados, os resultados da média do Super Ensemble foram muito similares ou piores aos do ECMWF-pf.

Para a previsão determinística de referência utilizada, ECMWF-fc, o CRPS médio é equivalente ao EMA. Ou seja, ela apresentou para a análise com todos os dados erros que

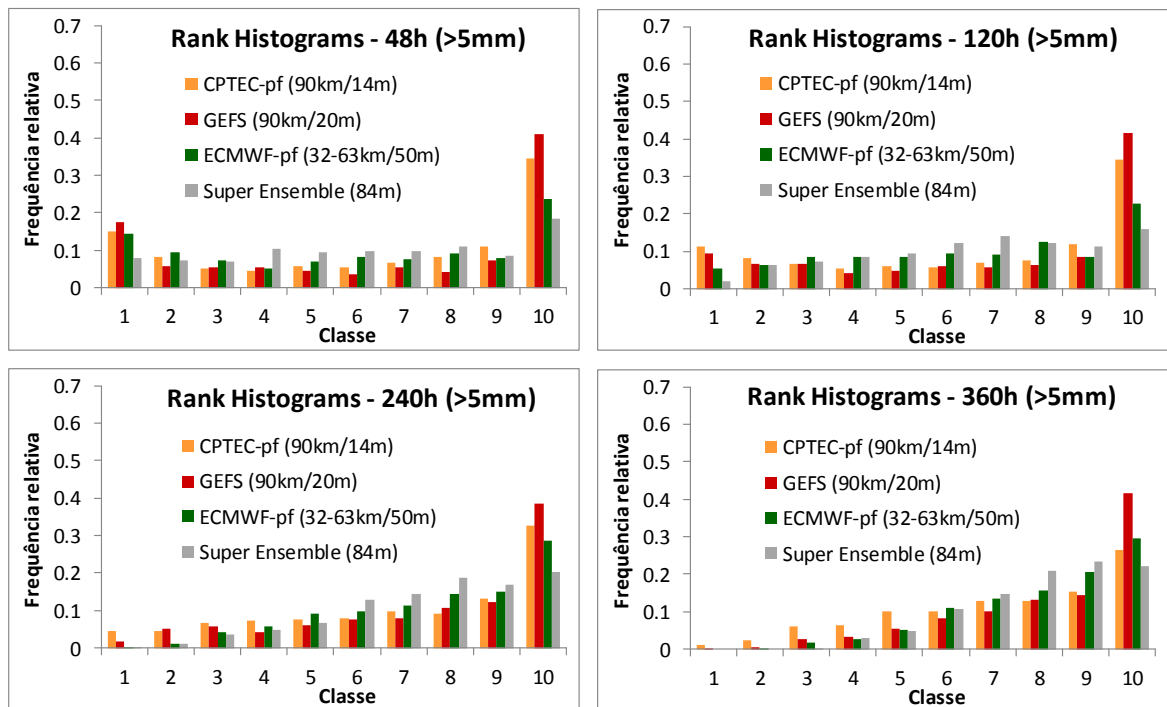
variaram entre 2mm e 3,8mm. Para o limiar de 5mm os erros foram de 6mm até 9mm. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 9mm a até 13mm ao longo dos horizontes de previsão. Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS pode-se afirmar que o ECMWF-pf e o GEFS sempre apresentaram desempenho melhor ou igual que a previsão determinística de referência. Já o CPTEC-pf apresentou desempenho inferior a previsão determinística ECMWF-fc na análise com maior limiar e na análise com todos os dados a partir de cerca de 148h de antecedência.

### 6.1.6. Rank Histograms

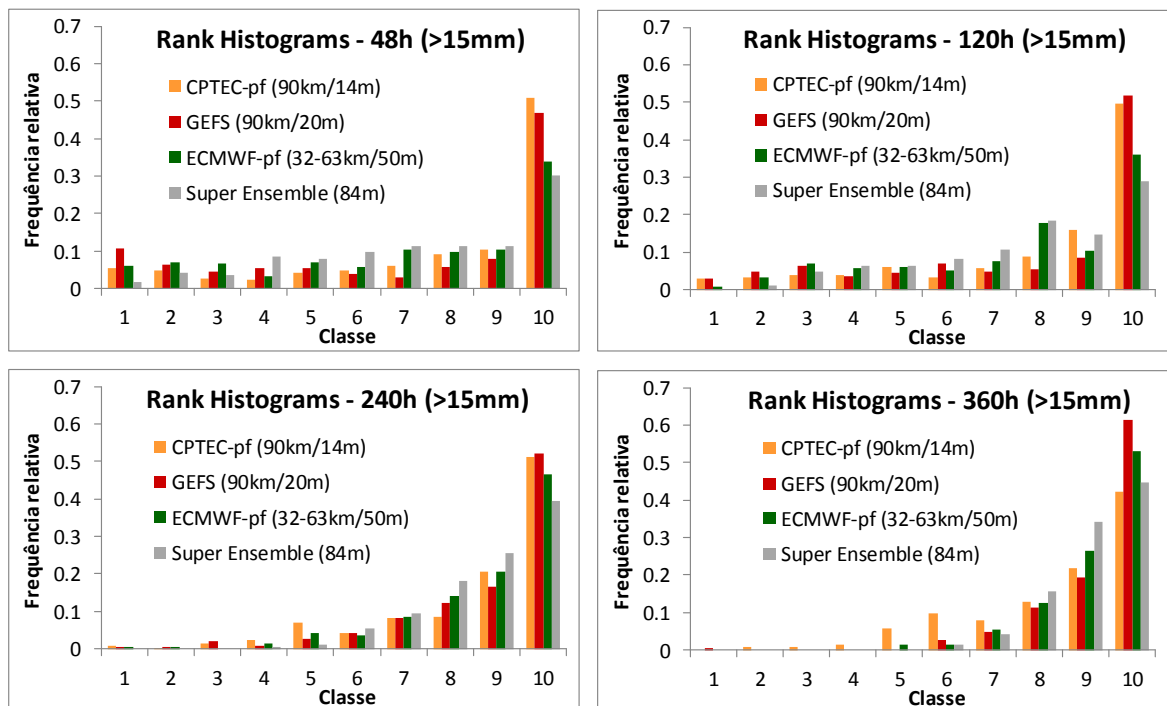
Os Rank Histograms para cada um dos EPS usados e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 54 e na Figura 55. Dado o número diferente de membros entre os EPS avaliados, os Rank Histograms foram montados reamostrando os dados dos EPS em 10 classes cada, para que os mesmos sejam comparáveis em um só gráfico. Esta abordagem é comumente usada em pesquisas que fazem a comparação de modelos.

A classe 1 do histograma indica a frequência de vezes em que a chuva observada ficou na região dos membros mais baixos do conjunto. Já a classe 10 indica a frequência de vezes em que a chuva observada ficou na região dos membros mais acima do conjunto. As classes intermediárias indicam posições intermediárias da observação em relação à previsão.

Os histogramas não foram computados para a análise com todos os dados, por que não existe a possibilidade de chuva menor do que zero. Ou seja, não existe espalhamento abaixo da observação para chuvas observadas nulas, o que automaticamente sempre gera histogramas em forma de “L invertido” com pouco significado para os resultados.



**Figura 54.** Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.



**Figura 55.** Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.

Para o menor limiar utilizado (5mm), em geral os histogramas dos modelos apresentaram uma forma crescente na direção da maior classe. Este formato de “rampa”



indica uma tendência dos EPS em subestimar a chuva nas maiores antecedências, já que mais vezes a observação se posicionou acima de um maior número de membros do conjunto. Os EPS que obtiverem em geral maior concentração na maior classe foram o CPTEC-pf e o GEFS (nessa ordem).

Sempre nas menores antecedências o formato de “rampa” foi menos destacado, e nas maiores antecedências ele ficou mais evidente, indicando maior viés nos maiores horizontes de previsão. Chegando ao ponto de, por exemplo, 60% das previsões do GEFS terem ficado abaixo da observação na antecedência 360h da análise com limiar de 15mm.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que a agregação dos EPS resulta em um histograma ligeiramente mais suavizado, mas é mantida a tendência crescente com o aumento das antecedências.

### 6.1.7. Brier Score (BS)

O BS é a primeira estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Ou seja, ao invés de avaliar os modelos para subconjuntos dos dados, ela na verdade avalia a capacidade do modelo em prever a ultrapassagem dos limiares definido.

Como ela é uma estatística para a detecção de eventos discretos, ela foi computada para a detecção da ultrapassagem dos limiares de 5mm e 15mm. Os resultados obtidos para o BS de cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 56 e na Figura 57.

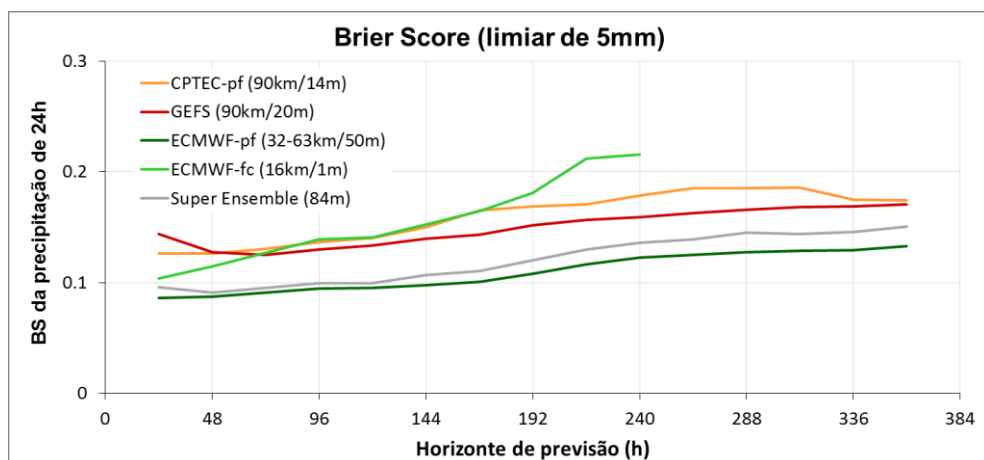
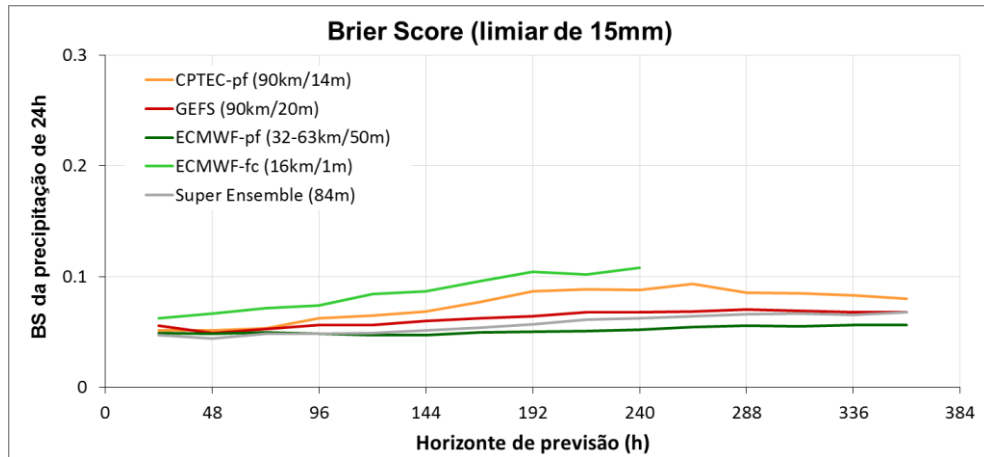


Figura 56. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Alto São Francisco.



**Figura 57. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Alto São Francisco.**

Nesta análise de BS o CPTEC-pf apresentou geralmente desempenho um pouco inferior aos demais modelos. Em geral os resultados do CPTEC-pf se situaram em torno de 0,12 a 0,19 para o limiar de 5mm. Para os limiares de 15mm o CPTEC-pf apresentou desempenho entre 0,05 e 0,09 ao longo do horizonte de previsão.

O GEFS apresentou desempenho um pouco melhor que o CPTEC-pf, e não tão bom quanto o do ECMWF-pf. Os valores situaram-se em torno de 0,12 a 0,17 para o limiar de 5mm, e de 0,05 a 0,07 para o limiar de 15mm.

O ECMWF-pf foi o EPS que apresentou melhor desempenho em termos de Brier Score. Os valores se situaram em torno de 0,09 a 0,13 para o menor limiar, e se situaram em torno de 0,05 para o maior limiar ao longo de todo o horizonte de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados não indicaram benefícios na composição, se comparados ao ECMWF-pf, que obteve melhor desempenho na análise.

A previsão determinística de referência (ECMWF-fc) apresentou geralmente desempenho inferior a todos os EPS, subindo entre 0,1 e 0,21 dentro do horizonte de previsão para o menor limiar (5mm), e subindo entre 0,06 e 0,1 para o limiar maior (15mm). Ou seja, nesta análise para previsões discretas, os resultados apontam um benefício geral das previsões probabilísticas, embora com diferentes qualidades.

### 6.1.8. Diagramas ROC

O diagrama ROC é a segunda estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados obtidos. Assim como o BS, ela é uma estatística para a detecção de

eventos discretos, e então computada para a detecção da ultrapassagem dos limiares de 5mm e 15mm.

Os diagramas ROC obtidos para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 58 e na Figura 59.

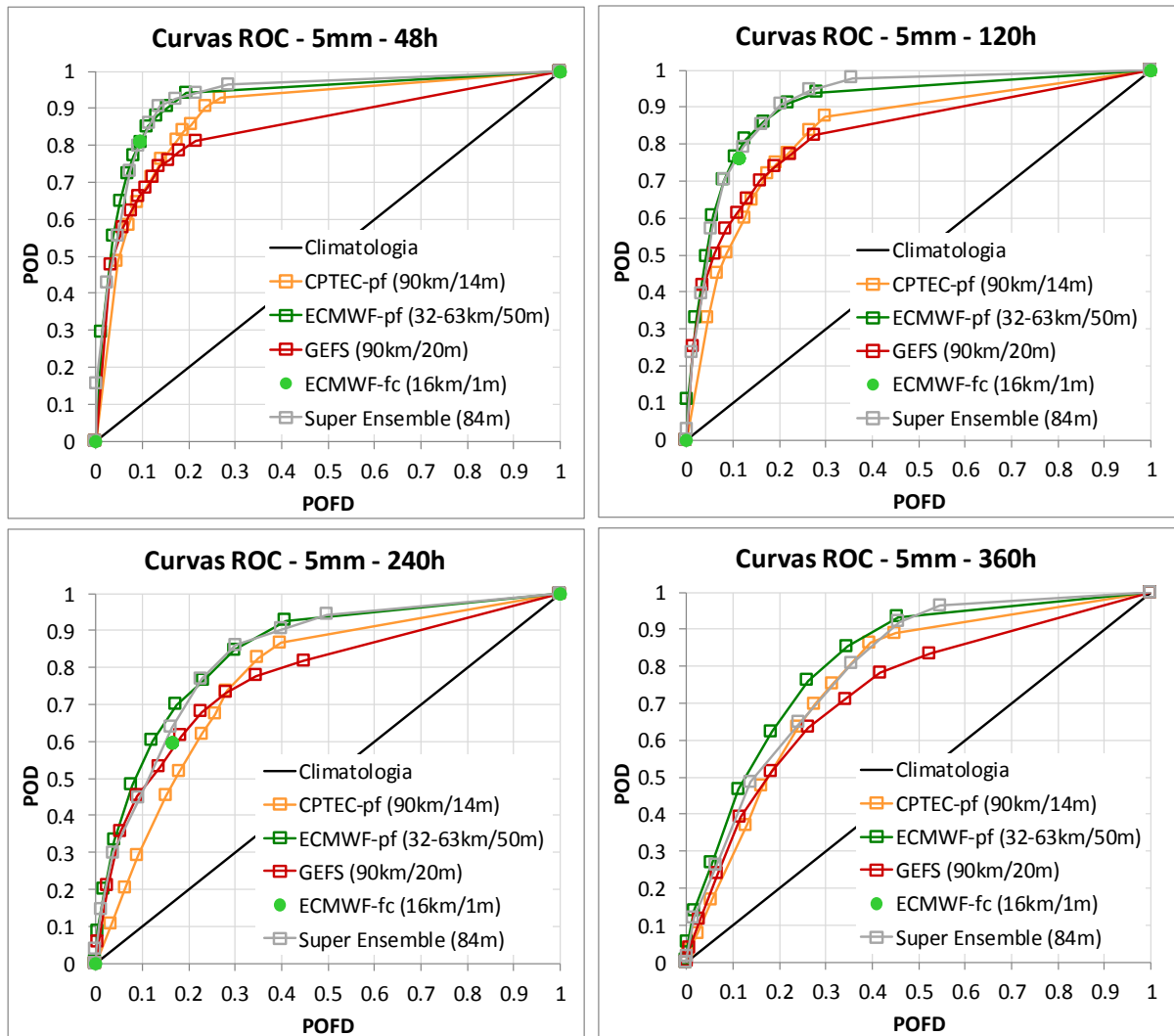
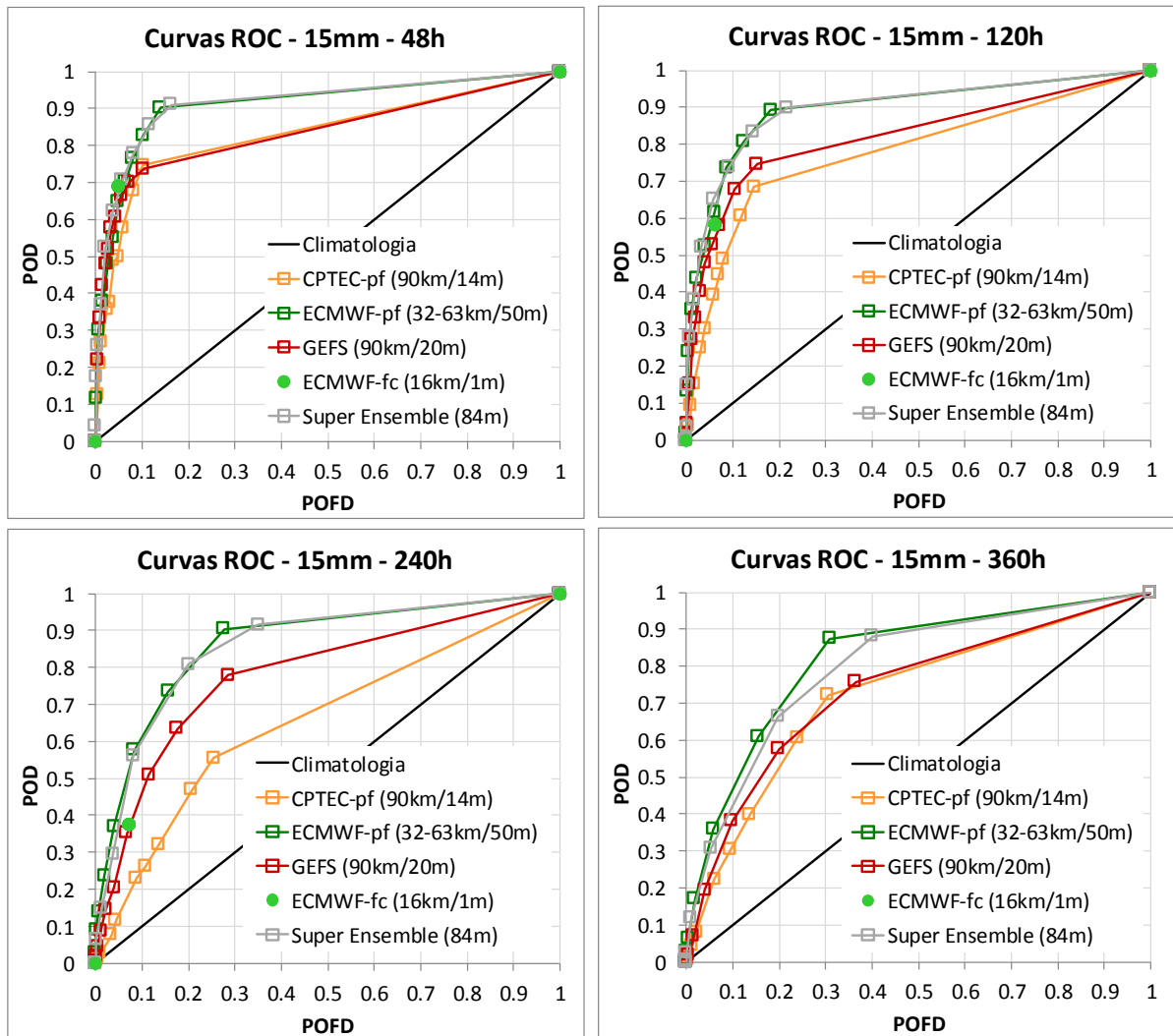


Figura 58. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.



**Figura 59. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.**

Os diagramas ROC permitem entender o *trade-off* entre os acertos na detecção dos limiares testados, e os alarmes falsos de detecção destes limiares. Neste sentido, os resultados entre os modelos apresentaram desempenhos distintos nos resultados verificados.

Os pontos dos percentis superiores dos EPS (maiores que 50%) em geral apresentaram o comportamento mais próximo do ideal (canto superior esquerdo) no diagrama. Especialmente os percentis 90% e o 80% nas análises com o maior limiar.

As curvas ROC montadas pelos pontos do CPTEC-pf em geral ficaram em uma posição intermediária entre as curvas do ECMWF-pf e do GEFS para o limiar de 5mm, principalmente quando são considerados os percentis superiores do conjunto. Estes percentis indicam, por exemplo, POD em torno de 0,9 para muitos casos, e uma POFD maior em torno de 0,2 a 0,45 aumentando ao longo do horizonte de previsão. Já para o limiares de 15mm as

curvas ROC do CPTEC-pf apresentaram um desempenho um pouco pior que os demais EPS. Em geral as taxas de POD do CPTEC-PF para estes limiares, considerando os maiores percentis do conjunto, foram iguais ou menores do que 0,7 com uma grande concentração de pontos abaixo de 0,4 nas maiores antecedências. E as taxas de falsa detecção (POFD) se concentraram em valores menores que 0,3.

As curvas ROC compostas pelos pontos do GEFS em geral ficaram abaixo das curvas representadas pelos outros EPS para o limiar 5mm, principalmente quando são considerados os percentis superiores do conjunto. O percentil superior para a antecedência de 360h indica, por exemplo, um POD próximo 0,82 e uma POFD em torno 0,52. Considerando percentis inferiores, algumas vezes o GEFS apresentou desempenho um pouco superior ao CPTEC-pf nos horizontes de 120h e 240h (melhor POD). Já para o limiar de 15mm, as curvas ROC do GEFS apresentaram um desempenho intermediário, com curvas posicionadas entre o ECMWF-pf e o CPTEC-pf. Em geral a POD do GEFS considerando os maiores percentis do conjunto foi de 0,7 a 0,8. Contudo, as taxas de falsa detecção (POFD) chegaram a valores de 0,3 a 0,4 nos horizontes de 240h e 360h.

As curvas ROC dadas pelos pontos do ECMWF-pf apresentaram o melhor desempenho entre os três EPS analisados. Por exemplo, os percentis superiores do ECMWF para o limiar de 5mm apresentaram POD na ordem de 0,9 para uma taxa de alarmes falsos (POFD) em torno de 0,2 a 0,3 na antecedência de 120h, onde os outros EPS mantiveram um POD menor que 0,9. Para o maior limiar testado, de 15mm, o percentil superior do ECMWF-pf apresentou uma POD em torno de 0,9, com uma POFD em torno de 0,1 a 0,2 (horizontes de 48h e 120h), e 0,2 a 0,3 (horizontes de 240h e 360h). Este desempenho também foi superior aos demais EPS.

Na análise geral das curvas, considerando todos os pontos e não apenas os percentis superiores, pode-se afirmar também que o ECMWF-pf tem um desempenho que supera os demais EPS, pois as suas curvas sempre estão mais próximas da configuração ideal. Isto significa que geralmente elas possuem PODs maiores que as demais para uma mesma dada POFD, ou POFDs menores para uma mesma dada POD.

Em todos os casos, presenciou-se uma queda do desempenho dos modelos com o aumento do horizonte de previsão e com o aumento dos limiares de detecção. Isto é um indicativo de que, além das incertezas aumentarem com o horizonte de previsão, possivelmente os modelos também têm mais dificuldades de detectar maiores chuvas, especialmente as que ocorrem em horizontes mais distantes.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados não indicaram resultados muito diferentes do ECMWF-pf. Em alguns casos o Super Ensemble apresentou melhores similares ao ECMWF-pf e em outros resultados um pouco piores, onde não é possível ver nenhuma vantagem aparente com seu uso.

Já a previsão determinística de referência (ECMWF-fc), que é mostrada como um ponto verde claro nos diagramas, apresentou um desempenho que pode ser considerado melhor que os ensembles do GEFS e do CPTEF-pf para o limiar 5mm e horizontes de 48h e 120h. Nestes casos, a previsão determinística apresentou POD de 0,8e POFD em torno de 0,1. Esta posição é melhor que os percentis do GEFS e do CPTEF-pf, porém inferior ao desempenho dos percentis superiores do ECMWF-pf. Já para os horizontes de previsão de 240h, o desempenho da previsão determinística foi um pouco inferior, sendo superada em geral pelos percentis superiores de todos os EPS para este limiar.

Ainda sobre as previsões determinísticas, para o limiar de 15mm verificou-se que os percentis superiores dos EPS sempre obtiveram um desempenho superior à previsão determinística. Enquanto a previsão determinística apontava para taxas de detecção de aproximadamente 0,7 (48h de antecedência), 0,6 (120h de antecedência), e 0,4 (240h de antecedência) - para uma POFD menor que 0,1 - alguns percentis dos EPS apresentaram valores de POD mais elevados, próximos de 0,8-0,9.

Com isso, a comparação entre os resultados da previsão determinística e dos EPS na detecção dos limiares sugere que para os limiares pequenos (até 5mm) e horizontes de até 120h, a determinística teve desempenho um pouco superior aos EPS do NCEP e CPTEC. Porém, para maiores limiares e horizontes de previsão, em geral os resultados são melhores considerando o os percentis superiores dos ensembles em detrimento da previsão determinística. A previsão determinística nunca foi melhor que a previsão probabilística do ECMWF-pf, ou do Super Ensemble.

### **6.1.9. Reliability Diagrams**

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo I das previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades. É válido lembrar que o viés condicional tipo I é uma medida diferente do viés. O viés simples é dado pelo grau de correspondência entre as médias das observações e das previsões, e já o viés condicional

tipo I é dado pelo grau de correspondência entre as probabilidades das previsões e as frequências de observações verificadas para estas probabilidades.

O Reliability Diagram é a terceira estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os resultados em termos de *Reliability Diagrams* obtidos neste trabalho para cada um dos EPS e para o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 60 e na Figura 61. Estes diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf apresentaram em geral um comportamento relacionado com um viés condicional positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foi maior que a frequência condicional observada correspondente. Isto foi especialmente mais observado para previsões com probabilidades (eixo horizontal) maiores que 0,5. Considerando o limiar de 5mm, por exemplo, quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,9 os eventos foram observados com frequências de 0,5 no horizonte de 360h. Para o limiar de 15mm os resultados de viés condicional positivo foram mais expressivos, onde para os maiores horizontes de previsão houve casos onde as previsões indicaram ocorrências probabilidades de 0,9 e os eventos foram observados com frequência relativa menor que 0,2 (como no horizonte de 240h).

Em relação à contagem de amostras do CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi um pouco maior do que para as demais classes, especialmente nos maiores horizontes.

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões. Embora com menos viés condicional que o CPTEC-pf, em alguns casos como no horizonte de previsão de 240h para o limiar de 15mm as previsões indicaram probabilidades de ocorrências maiores que 0,9 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,4.

Em relação a contagem de amostras do GEFS, assim como para o CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi maior (sempre entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 500).

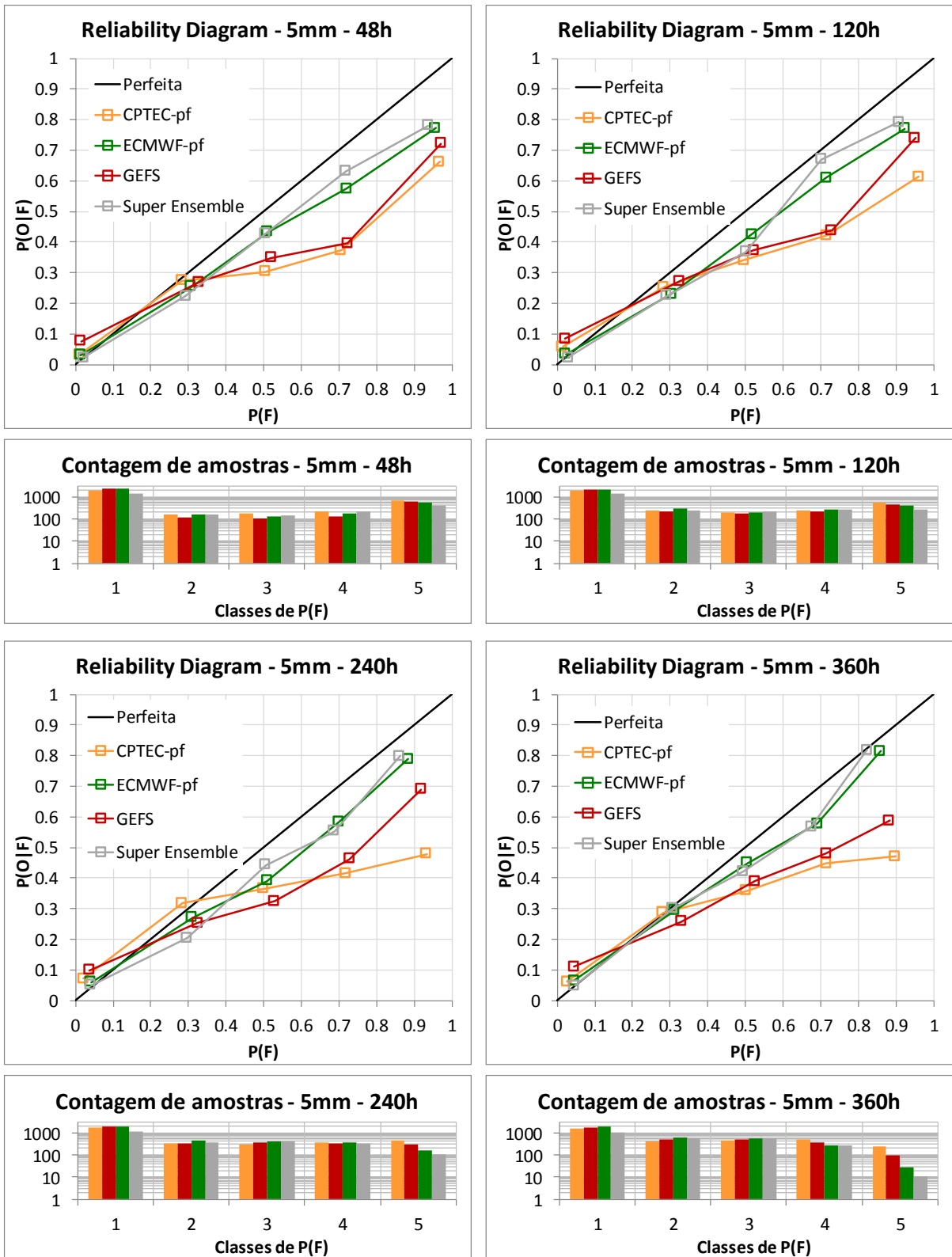
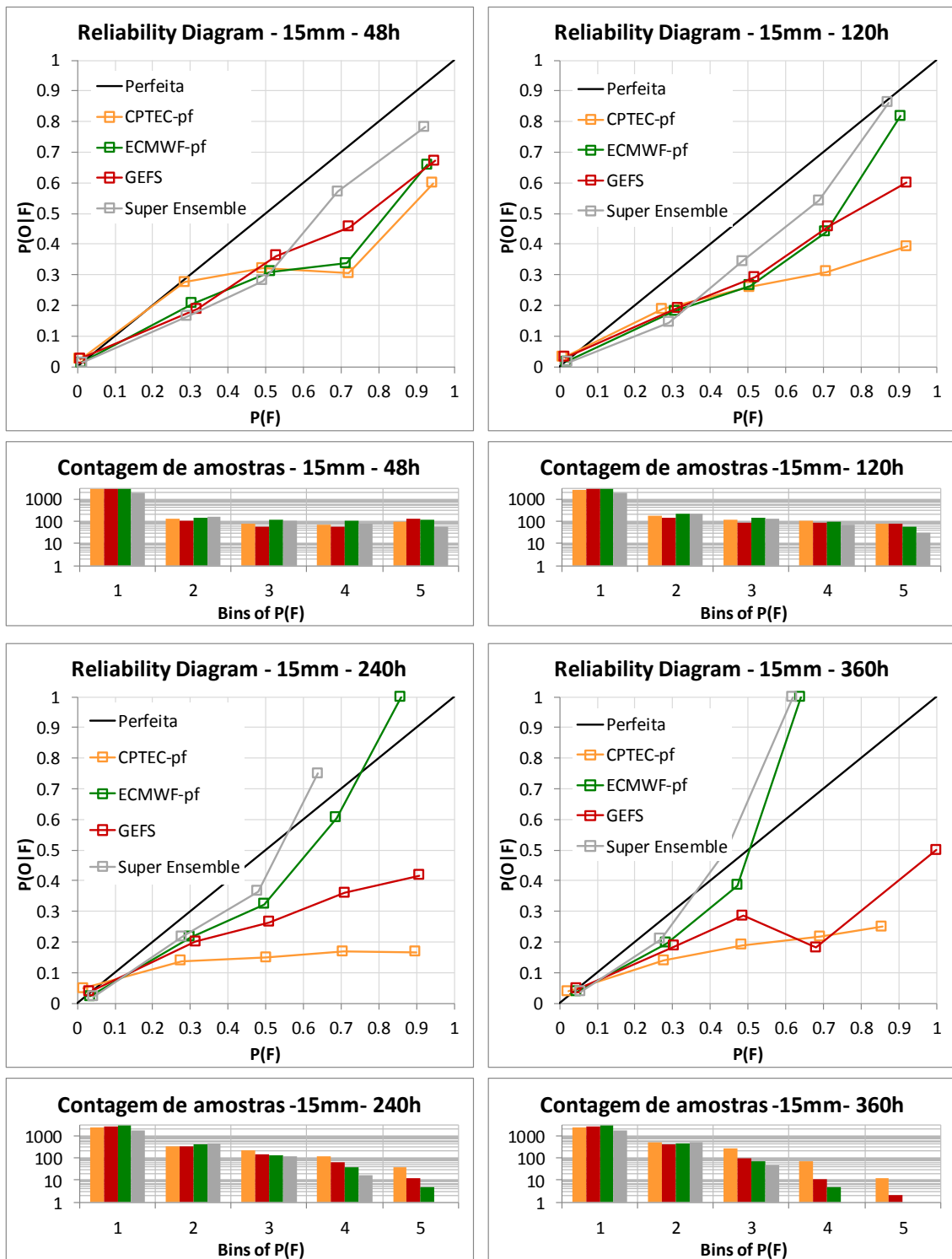


Figura 60. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.





**Figura 61. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Alto São Francisco.**

O desempenho do diagrama obtido com o ECMWF-pf pode ser considerado o melhor em comparação com os demais EPS, embora também tenha apresentado um viés condicional tipo I positivo, com as curvas mais deslocadas para a parte inferior da curva de quarenta e

cinco graus (apesar de alguns pontos acima na análise de 15mm). Para os menores horizontes de previsão, quando o conjunto indicou ocorrências com probabilidade de 0,9, em muitos casos elas aconteceram entre 0,7 e 0,8 das vezes. Para horizontes um pouco maiores as diferenças foram um pouco maiores e em alguns casos com características de previsões com alta resolução, como na previsão de antecedência de 240h e limiar de 15mm, quando o conjunto indicou ocorrências com probabilidade de 0,85 e elas aconteceram com frequência 1.

Apesar do desempenho um pouco melhor no que se relaciona com a curva de calibração do ECMWF-pf, a contagem de amostras foi um dos limitantes da análise para este EPS. Os resultados se concentraram muito na primeira classe de probabilidades, chegando na análise de 360h e 15mm a não ser suficiente o número de amostras para o cálculo dos pontos das curvas do diagrama, especialmente para os maiores limiares e horizontes.

Esta tendência observada no diagrama de contagem de amostras nos EPS, onde para os maiores limiares e maiores horizontes de previsão existe um número expressivamente menor de amostras, está relacionado com o viés negativo verificado em outras métricas do sistema de previsão. Uma vez que foi verificado um viés negativo em geral mais importante nos horizontes mais distantes e para os maiores limiares, isto se reflete em uma ocorrência muito menor da ultrapassagem do limiar para estes casos, o que se traduz em menos amostras nos diagramas de agudeza apresentados.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram resultados em geral muito similares aos do ECMWF-pf, sem benefícios evidentes mostrados.

Por fim, é válido ressaltar que todos os resultados do diagrama são dependentes do número de amostras, e espera-se que as amostras usadas aqui sejam suficientes para que estes resultados sejam coerentes.

#### **6.1.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do alto São Francisco**

Os principais resultados encontrados para as análises de chuva para o alto São Francisco podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros médios absolutos do ECMWF-pf foram os menores ao longo de todo o horizonte de previsão. Com todos os dados, os resultados da média do CPTEC-pf indicaram os maiores erros. Considerando limiares, os do GEFS foram maiores até aproximadamente 120h, a partir de onde os maiores foram do CPTEC-pf. A previsão determinística apresentou

desempenho em geral superior a média do CPTEC-pf e do GEFS, mas inferior a média do ECMWF-pf. O Super Ensemble apresentou desempenho melhor que o ECMWF-pf (e portanto, superior aos demais) até as 120h de antecedência.

- Os resultados de EMR em geral apontaram para uma tendência de um maior viés negativo na média das previsões com o aumento do horizonte de previsão, e com o aumento do limiar utilizado. Na análise com todos os dados o viés foi positivo, provavelmente causado por previsões de chuva quando a ocorrência é próxima de zero. A previsão determinística apresentou valores mais próximos de zero que a média dos EPS para alguns casos.

- O coeficiente de correlação mostrou a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que a correlação da previsão determinística apresentou um desempenho superior que a da média dos conjuntos para horizontes de previsão de até aproximadamente 120h. Já na comparação com o Super Ensemble, a média do Super Ensemble foi sempre melhor que todas as demais somente até as 120h.

- O CRPS médio indicou o ECMWF-pf com melhor desempenho. Os resultados do GEFS foram sempre um pouco piores ou similares aos do CPTEC-pf no início da previsão (96h), a partir de onde os maiores erros foram do CPTEC-pf. A previsão determinística apresentou desempenho em geral superior ao CPTEC-pf e o GEFS, mas inferior ao ECMWF-pf. O Super Ensemble apresentou desempenho ligeiramente melhor que o ECMWF-pf (e portanto, superior aos demais) até as 120h de antecedência.

- O Rank Histogram indicou um formato predominante de existência de um viés negativo nas precipitações, mais expressivo nos maiores horizontes de previsão.

- A análise de BS indicou também a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que o BS a da previsão determinística apresentou um desempenho geralmente inferior ao das probabilísticas em todo o horizonte de previsão. Já na comparação com o Super Ensemble, não foi detectado nenhum benefício padrão no uso da combinação de dados em comparação com o ECMWF-pf.

- A análise das curvas ROC indicou um desempenho superior dos percentis superiores do ECMWF-pf na detecção dos limiares de cheia. O GEFS apresentou desempenho pior que o CPTEC-pf no limiar de 5mm, e melhor no limiar de 15mm. Na comparação com a previsão determinística, nem sempre o GEFS e o CPTEC-pf superaram o desempenho da mesma, ao passo que o ECMWF-pf foi em geral sempre melhor. Na

comparação com o Super Ensemble novamente não foi detectado nenhum benefício padrão no uso da combinação de dados em relação ao ECMWF-pf.

- Na análise dos *Reliability Diagrams* os resultados apontaram para uma tendência geral dos modelos de mostrar um viés condicional do tipo I positivo. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais correspondentes observadas. O desempenho dos modelos tendeu a ser melhor para o ECMWF-pf. E a contagem de amostras em cada classe conjecturou com o viés negativo geral observado anteriormente, onde poucas observações foram feitas nas classes mais altas e afetaram um pouco a análise.

- Sobre os resultados de uma forma geral, é importante considerar que todos eles foram calculados com um número limitado de amostras, especialmente os resultados com maio limiar. Assim, é importante considerar que algumas das pequenas diferenças registradas podem ser apenas devidas a questões amostrais.

A partir deste resumo, é possível ter um panorama geral dos resultados de chuva para a bacia. Em termos de qualidade verificou-se que os resultados tem um viés negativo que é mais expressivo nos maiores horizontes e para maiores valores de chuva. Esta constatação indica que a confiança na medida da tendência central dos ensembles pode não ser a melhor opção na interpretação de seus resultados, especialmente para altas chuvas em maiores horizontes.

Além disso, as probabilidades das previsões não são propriamente calibradas, especialmente também para os maiores horizontes e maiores chuvas. Esta propriedade indica que não é possível confiar plenamente na distribuição dos membros do conjunto como um indicativo de quantificação da incerteza no futuro.

No quesito de comparação determinística versus probabilística é possível conjecturar que nem sempre a previsão determinística é pior que a previsão probabilística, estando sempre a comparação dependente da qualidade dos sistemas. Em algumas métricas a previsão determinística se destacou positivamente na comparação com o GEFS e o CPTEC-pf. Contudo em praticamente todas as análises a previsão determinística ECMWF-fc foi superada pelo ensemble ECMWF-pf, mostrando que a previsão probabilística de maior qualidade sempre superou a determinística.

Sobre as questões de resolução espacial e do número de membros no conjunto, como o ECMWF-pf possui maior resolução e maior número de membros, é possível que estes fatores

---

sejam benéficos para o desempenho. Contudo, possivelmente estes não são os únicos fatores, pois o GEFS possui a mesma resolução espacial do CPTEC-pf, e apenas seis mais membros, e mesmo assim seus resultados são geralmente melhores. Também, o ECMWF-fc possui maior resolução espacial do que todos os demais modelos, mas nem sempre ele é o melhor modelo, pois não é uma previsão por conjunto. Isto sugere que existe um benefício do sacrifício de resolução espacial em contrapartida de que o modelo seja rodado várias vezes para formar o conjunto.

Na análise de composição do Super Ensemble verificou-se que em alguns casos, principalmente nas estatísticas de erro médio absoluto, correlação, e CRPS médio, existiu uma vantagem na composição do conjunto usando todos os modelos até um horizonte de cerca de 120h. Este horizonte de certa forma é o que possui menores incertezas na previsão, e possivelmente o benefício da composição do Super Ensemble para estas antecedências está relacionado com a adição de mais informação aos primeiros intervalos de tempo. Contudo, para outras métricas, como para a de detecção de limiares, o uso do Super Ensemble não indicou vantagens aparentes em relação ao ECMWF-pc, embora sempre tenha apresentado resultados próximos a este modelo, que é o que mostrou melhores resultados nesta bacia.

---

## 6.2. Bacia do Rio Doce

Os resultados das análises de chuva para a Bacia do Rio Doce, para cada uma das métricas avaliadas, são apresentados nos itens seguintes. Assim como para a bacia da UHE Três Marias, os resultados de cada métrica são apresentados e descritos em cada um dos itens. Mas o seu significado e suas implicações (discussões dos mesmos) são feitas de maneira conjunta em um item específico ao final da sequência.

O número de amostras usadas nestes cálculos para a bacia do Rio Doce foi:

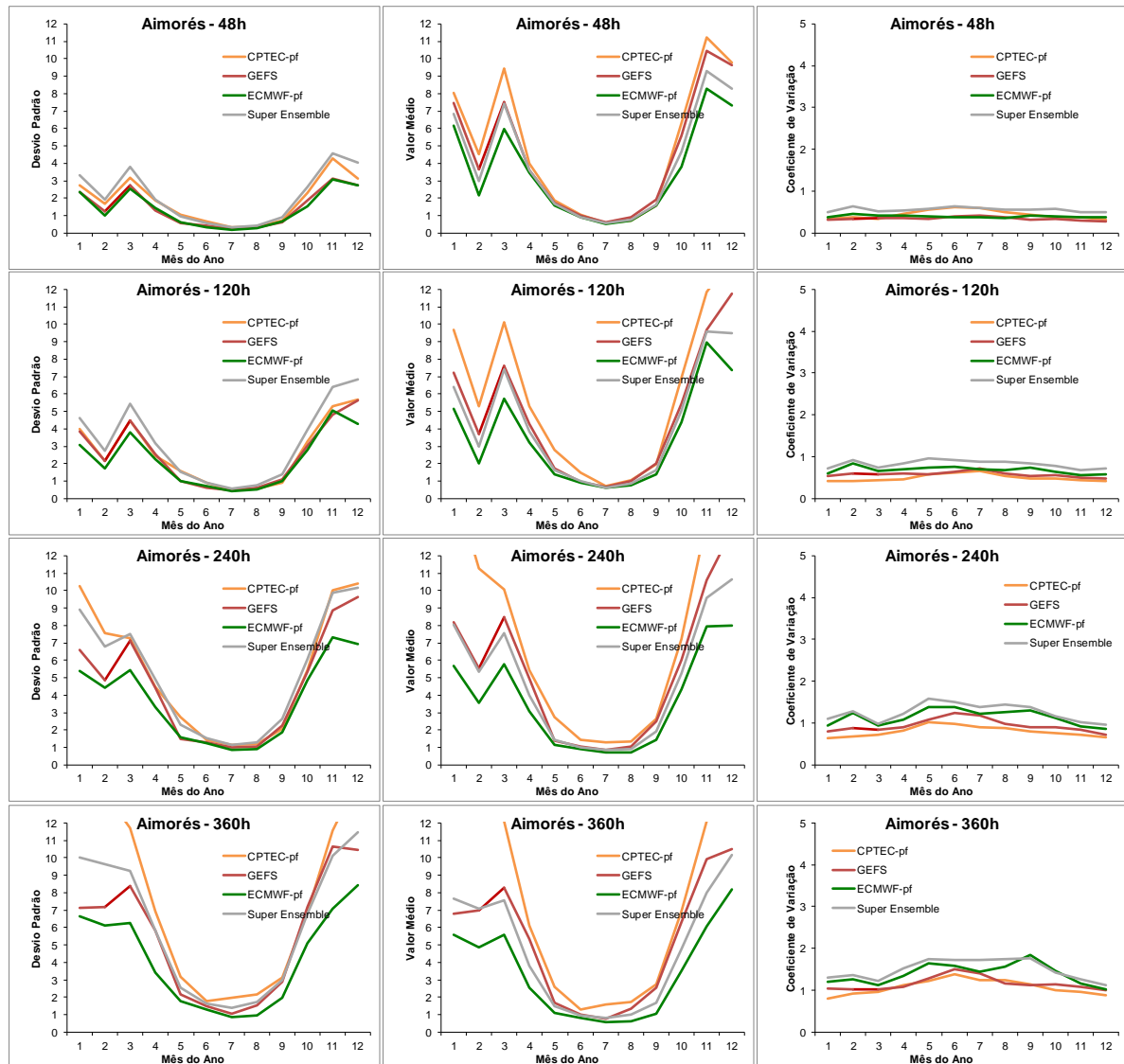
- Todos os dados – 3241 amostras
- >5mm - 657 amostras
- >15mm - 203 amostras

### 6.2.1. Análise da climatologia do desvio padrão dos ensembles

Na Figura 62 é apresentada a análise da média, desvio padrão e coeficiente de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a previsão foi emitida. Os valores apresentados para cada mês correspondem ao valor médio computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.

Assim como verificado na bacia de Três Marias, o formato de “U” das curvas de desvio e média mostra que durante os meses de Maio a Setembro (meses secos do clima tropical) o desvio padrão das previsões é menor, por que todos os membros do conjunto geralmente preveem chuvas mais próximas de zero. Já durante os meses de Outubro a Abril os valores de desvio e média são maiores, que é o período chuvoso nas bacias.

Com o aumento dos horizontes de previsão também nota-se um aumento no desvio padrão das previsões. Por exemplo, na antecedência de 120h os desvios padrão para o mês de Janeiro se situaram em torno de 2mm a 4mm, e na antecedência de 360h os desvios padrão para o mês de Janeiro se situaram entre 6mm a até 14mm. Este aumento é esperado em função do aumento da incerteza das previsões com as antecedências crescentes. Onde com o aumento do horizonte de previsão mais os membros dos conjuntos diferem entre si.



**Figura 62. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de precipitação para a bacia do Rio Doce.**

Em relação às médias, nota-se que para esta bacia uma diferença entre a média dos conjuntos é perceptível, usualmente com o ECMWF-pf tendo menores valores e com o CPTEC-pf tendo os maiores valores no período chuvoso. O comportamento das médias do CPTEC-pf também sugere um aumento no valor médio das suas chuvas previstas com o aumento dos horizontes de previsão nos meses de Janeiro a Março.

Em relação ao coeficiente de variação, os valores geralmente se posicionaram entre 0,5 e 1 nos meses mais chuvosos, e são um pouco mais elevados nos meses menos chuvosos. Isso significa que os desvios padrão dos EPS correspondem a valores entre 50% e 100% do valor da média nos meses úmidos. Já para os meses mais secos os valores do coeficiente de

variação são mais elevados também devido aos baixos valores trabalhados, conforme comentado na análise dos resultados de Três Marias.

Em relação ao comportamento do Super Ensemble, nos dois primeiros horizontes analisados ele sugeriu um desvio maior que os EPS que o compõem, e nos dois maiores horizontes ele sugeriu um desvio igual ou menor que o CPTEC-pf.

### 6.2.2. Erro Médio Absoluto

Os resultados obtidos de Erro Médio Absoluto (EMA) para cada um dos EPS, previsão determinística, e Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 63, na Figura 64, e na Figura 65.

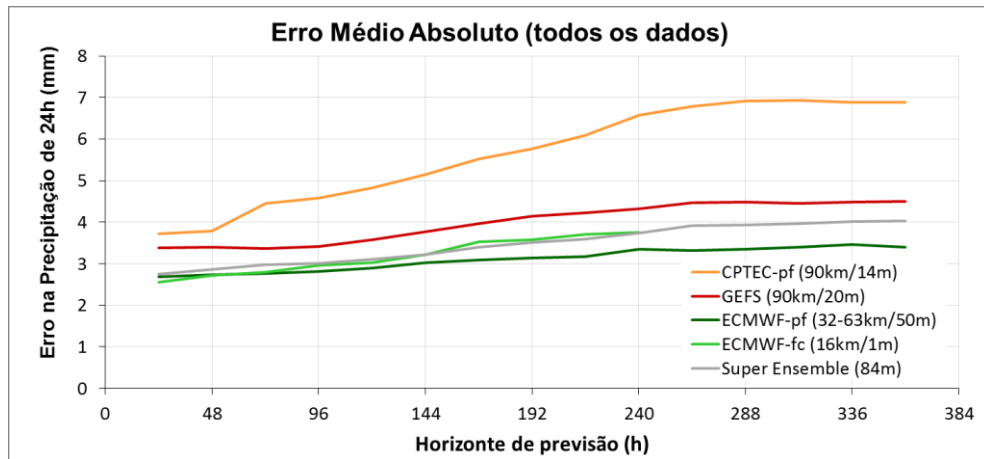


Figura 63. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce.

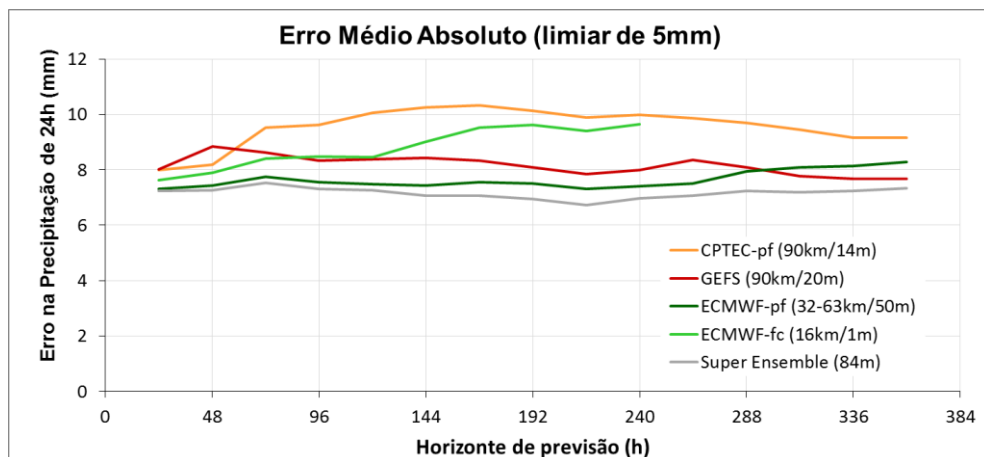
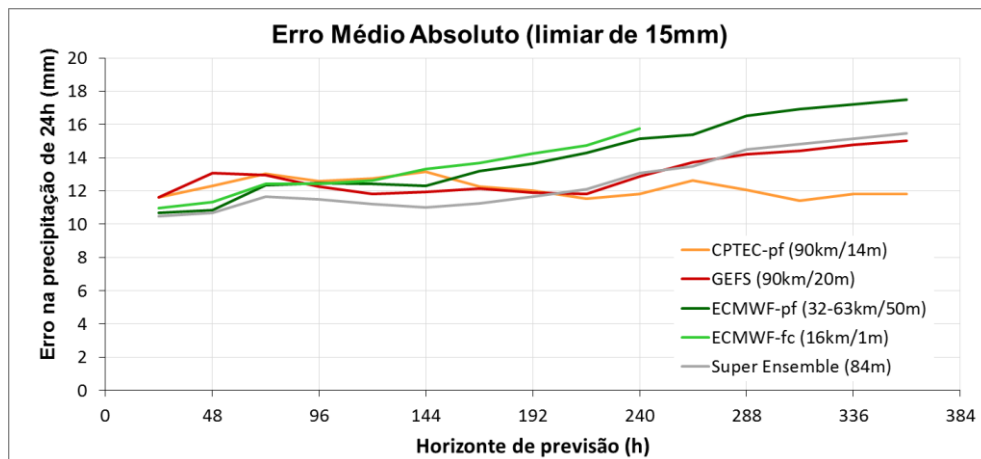


Figura 64. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce.





**Figura 65. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce.**

Nas análises com todos os dados e com o limiar de 5mm nestes resultados a média do CPTEC-pf em geral apresentou um erro mais elevado que os demais EPS. Na primeira análise os erros variaram entre 3,8mm nos primeiros horizontes de previsão até 7mm nos últimos horizontes. Na segunda, os erros ficaram entre 8mm e 10mm ao longo da previsão. Já para o limiar maior (15mm) o desempenho do CPTEC variou pouco ao longo do horizonte de previsão, ficando em torno de 12mm. A partir do horizonte de previsão de aproximadamente 192h este foi o melhor desempenho entre os EPS para este limiar.

Os resultados de EMA para o GEFS mostraram um desempenho geralmente intermediário entre os demais EPS. Na análise com todos os dados os erros variaram entre 3,5mm e 4,5mm ao longo do horizonte de previsão. Já nas análises com limiar de 5mm os resultados ficaram em torno de 8mm. Finalmente na análise com limiar de 15mm os erros variaram entre 12mm e 15mm, sendo mais elevados a partir de cerca de 200h de antecedência.

A linha que indica o erro médio do conjunto do ECMWF-pf apresentou um comportamento diferenciado entre as três análises. Nas análises com todos os dados e na análise com o limiar de 5mm os erros foram os menores, variando entre 2,8mm e 3,2mm na primeira e entre 7,5mm e 8,1mm na segunda. Já na análise com limiar de 15mm os erros do ECMWF-pf estiveram entre os maiores observados (pior desempenho), especialmente a partir do horizonte de 144h. Os erros chegaram a mais de 17mm no final da previsão. Isto é um indicativo de que o ECMWF-pf apresenta problemas de estimativas das maiores chuvas na bacia. Possivelmente isto está conectado com os valores de médias mensais das chuvas, que foram verificados como menores para o ECMWF-pf.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo erro médio teve um desempenho variado nas três análises. Considerando todos os dados os erros ficaram concentrados entre o ECMWF-pf e o GEFS. Já para a análise com limiar de 5mm os erros foram os menores em comparação com todos os EPS. Finalmente na análise com limiar de 15mm os erros foram os menores até a antecedência de aproximadamente 192h, a partir de onde foram muito próximos ao GEFS. Acredita-se que este desempenho acontece em função dos diferentes tipos de erros existentes no EPS, que ao serem combinados acabam se compensando.

A previsão determinística de referência, ECMWF-fc, apresentou erros que variaram entre 2,8mm e 3,5mm (todos os dados), entre 8mm até 10mm (5mm) e . entre 11mm a até 16mm (15mm) ao longo dos horizontes de previsão. Os erros cresceram ao longo do horizonte de previsão (que é de 240h para a previsão determinística).

Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS pode-se afirmar que nem sempre os EPS apresentaram melhor desempenho que a previsão determinística. Especialmente os EPS do CPTEC e do GEFS na análise com todos os dados, e o CPTEC-pf na análise com limiar de 5mm foram piores que a previsão determinística. Na análise com limiar de 15mm a previsão determinística mostrou um desempenho pior que todos os EPS a partir do horizonte de cerca de 100h. A previsão por ensemble do ECMWF-pf foi sempre melhor que a determinística nesta métrica, indicando sempre um benefício no uso da média deste conjunto. Já o Super Ensemble também sempre apresentou resultados melhores que a previsão determinística em termos de EMA.

### 6.2.3. Erro Médio Relativo

Os resultados obtidos de Erro Médio Relativo (EMR) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados nas Figura 66, Figura 67 e Figura 68.

No caso das análises com todos os dados foram considerados apenas os momentos em que a observação foi maior que zero, já que a métrica não pode ser calculada quando a observação é nula.

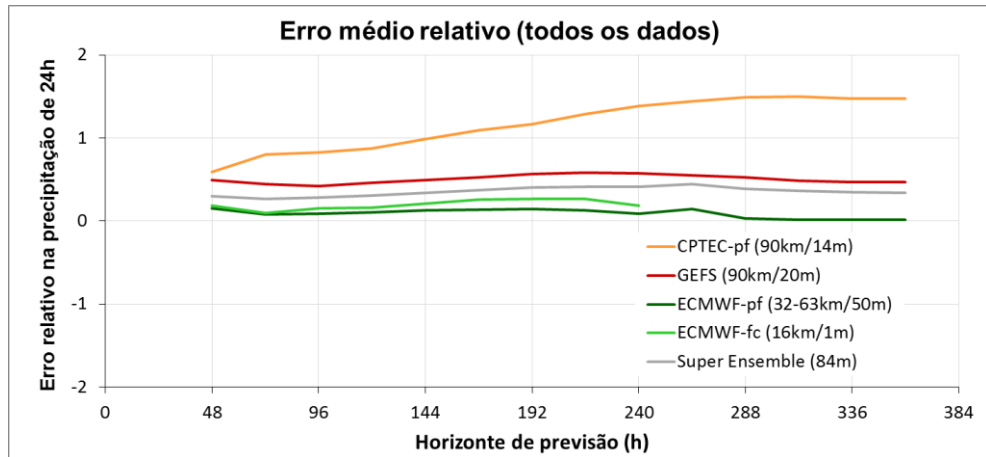


Figura 66. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do rio Doce.

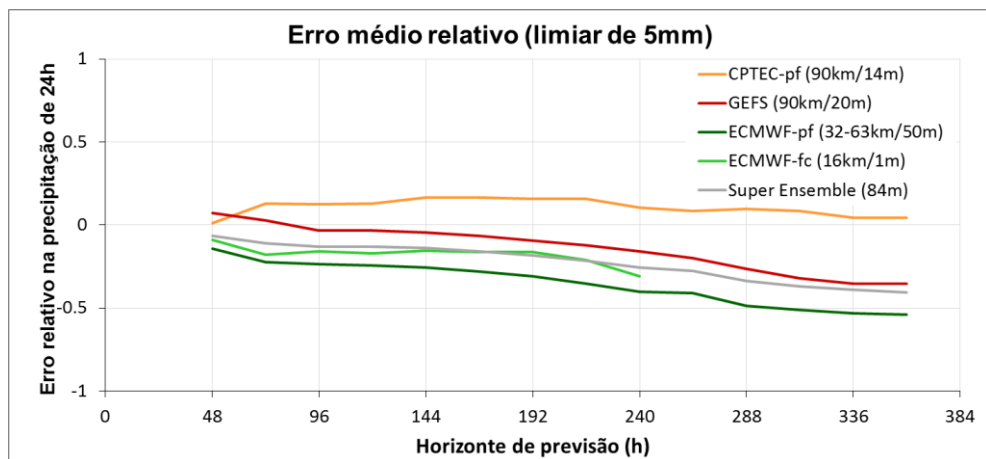


Figura 67. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do rio Doce.

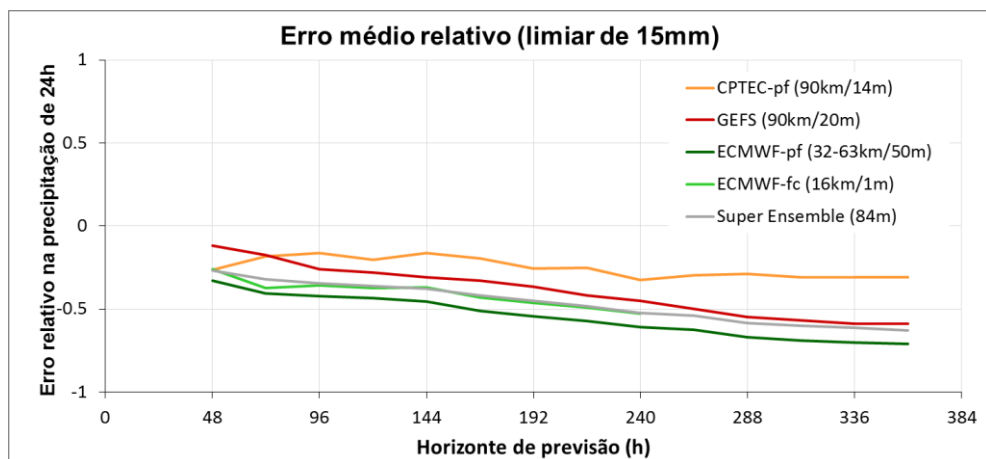


Figura 68. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do rio Doce.

Nos resultados de EMR considerando todos os dados o viés foi em geral positivo, e para as análises com limiar os erros tenderam a um viés negativo com o aumento do horizonte de previsão, ou seja, de falta de chuva (com exceção do CPTEC-pf, que na análise de 5mm ainda apresentou tendência positiva).

Novamente, estes resultados de erro considerando todos os dados são influenciados pelos casos onde a chuva é nula ou muito próxima de zero nas observações, mas são feitas previsões de ocorrência de chuva na bacia. Com isso, existe sempre uma tendência de viés positivo, e relativamente alto se forem considerados os possíveis pequenos valores em observações.

Os resultados da análise para o CPTEC-pf para todos os dados apontaram erros relativos positivos próximos de 0,6 a até 1,6 no final do horizonte de previsão. Para o limiar de 5mm os erros se posicionaram entre 0 e 0,2. Já para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,1 e -0,3. Isto indica que para todos os dados e menores chuvas a tendência do CPTEC-pf é positiva, e já para as maiores chuvas existe uma tendência de subestimativa. Sendo que ele foi o modelo que apresentou erros mais próximos de zero (melhores resultados) na análise com limiar de 15mm.

Os resultados do GEFS apontaram erros relativos positivos próximos de 0,1 para o uso de todos os dados. Para o limiar de 5mm os erros foram entre 0,1 e -0,3 e para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,1 e -0,5. Isto indica uma tendência de mais subestimava com os maiores horizontes e para as maiores chuvas.

Os erros médios relativos do ECMWF-pf para todos os dados foram muito próximos de zero ao longo do horizonte de previsão. Contudo, para o limiar de 5mm os EMR do ECMWF-pf foram entre -0,2 e -0,5 e para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,3 e -0,6. Estes resultados foram os mais distantes de zero entre os EPS testados, indicando que o ECMWF-pf apresenta uma maior tendência de subestimar chuvas na bacia.

O Super Ensemble apresentou desempenho geralmente situado entre o ECWWMF-pf e o GEFS. A previsão determinística de referência, ECMWF-fc, apresentou um desempenho em geral similar ao ECMWF-pf, porém com erros mais próximos de zero nas análises com limiar. Ela apresentou um EMR variando entre -0,05 e -0,3 (limiar de 5mm), e de -0,1 e -0,5 (limiar de 15mm) ao longo das suas 240h de horizonte de previsão. Este desempenho considerando os limiares foi sempre pior que o do GEFS.

### 6.2.4. Correlação (r)

Os resultados obtidos para o coeficiente de correlação ( $r$ ) para cada um dos EPS usados, mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 69, Figura 70, e Figura 71.

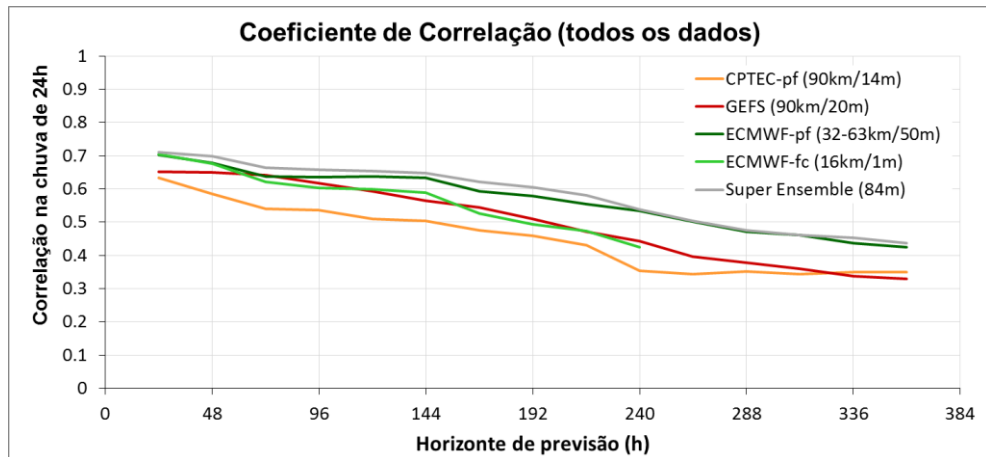


Figura 69. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce.

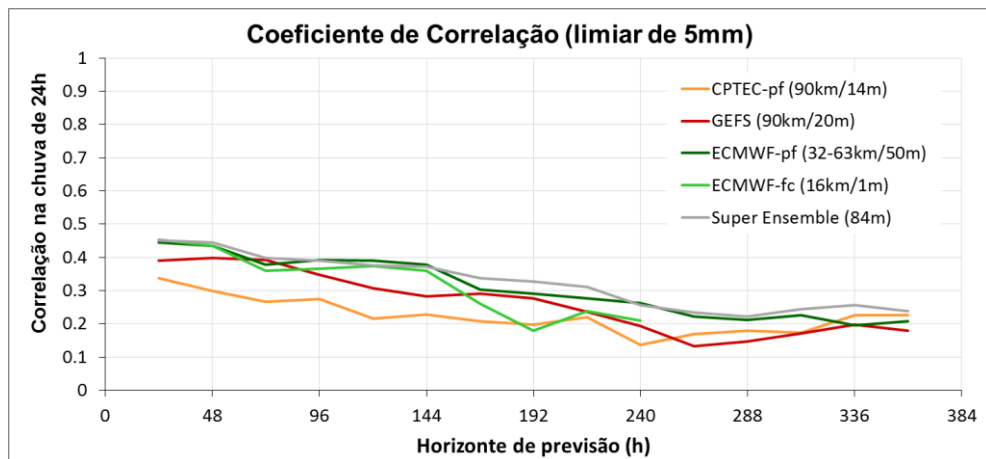
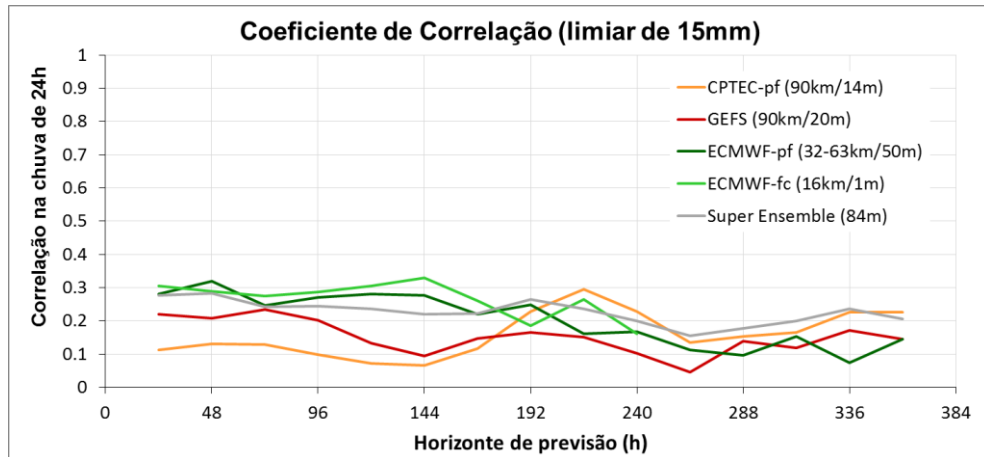


Figura 70. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce.



**Figura 71. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce.**

A média do conjunto do CPTEC-pf apresentou um desempenho um pouco abaixo dos demais EPS na análise com todos os dados, onde a correlação variou entre 0,62 e 0,35. Já nas análises considerando limiares, as correlações foram ligeiramente menores ou similares aos demais. Também, o comportamento do CPTEC-pf foi diferenciado nesta análise, já que ele apresentou um pequeno aumento na correlação no horizonte de previsão, ao passo que os outros modelos uma diminuição. Provavelmente isto se deve ao fato verificado do CPTEC-pf geralmente prever chuvas mais altas ao final dos horizontes de previsão.

Para a média do conjunto do GEFS os resultados de correlação para todos os dados foram intermediários em comparação com os outros EPS, e variaram entre 0,68 e 0,3. Dentre os três EPS testados o que apresentou melhor desempenho para a análise com todos os dados foi o do ECMWF, variando entre 0,7 e 0,44.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo desempenho da média é superior ou similar a média de todos os demais EPS. Embora em algumas antecedências ele tenha sido superado por um EPS, em geral os seus resultados podem ser considerados melhores.

A previsão determinística de referência utilizada, ECMWF-fc, apresentou na análise com todos os dados uma correlação que varou entre aproximadamente 0,8 e 0,45 ao longo das 240h de horizonte de previsão. Para a análise com limiar de 5mm a correlação variou entre 0,45 e 0,2. E para a análise com limiar 15mm os valores variaram entre 0,3 a até 0,18 ao longo dos horizontes de previsão. Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS verificou-se que a da previsão determinística apresentou um desempenho sempre muito similar ao ECMWF-pf.

### 6.2.5. CRPS Médio

Os resultados obtidos de CRPS Médio para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 72, na Figura 73 e na Figura 74.

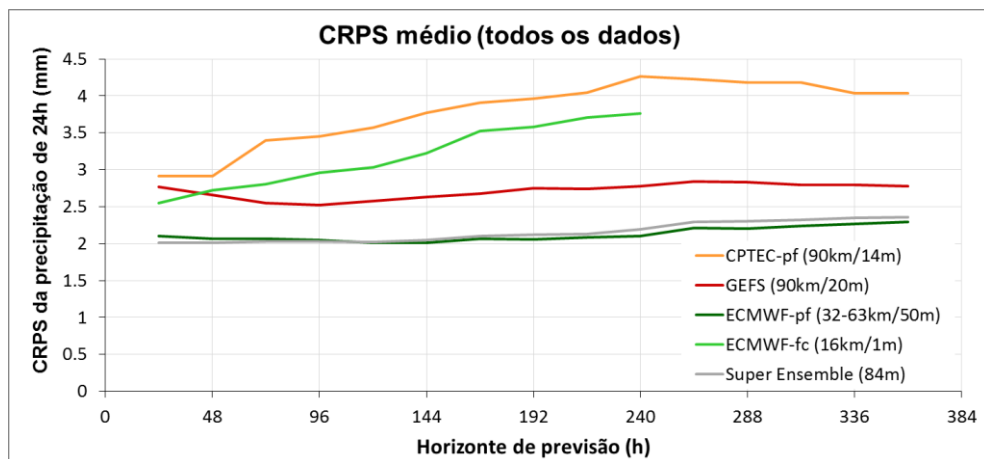


Figura 72. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Doce.

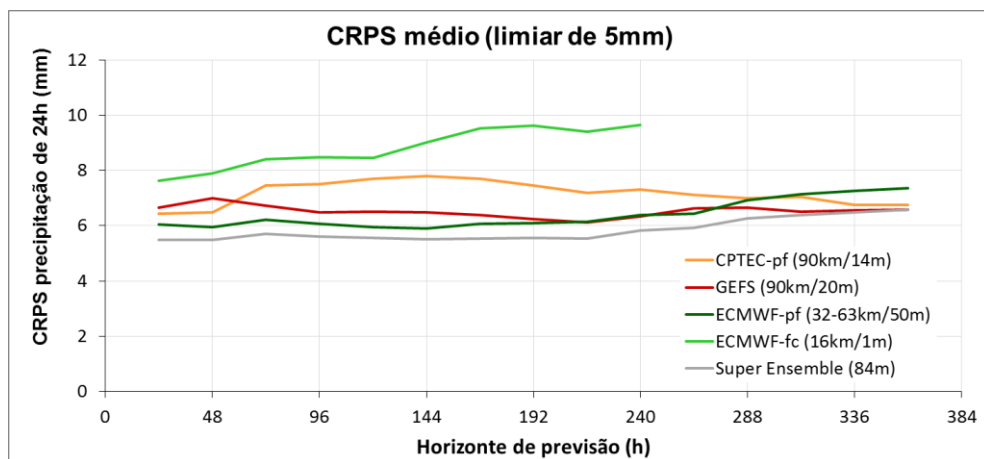
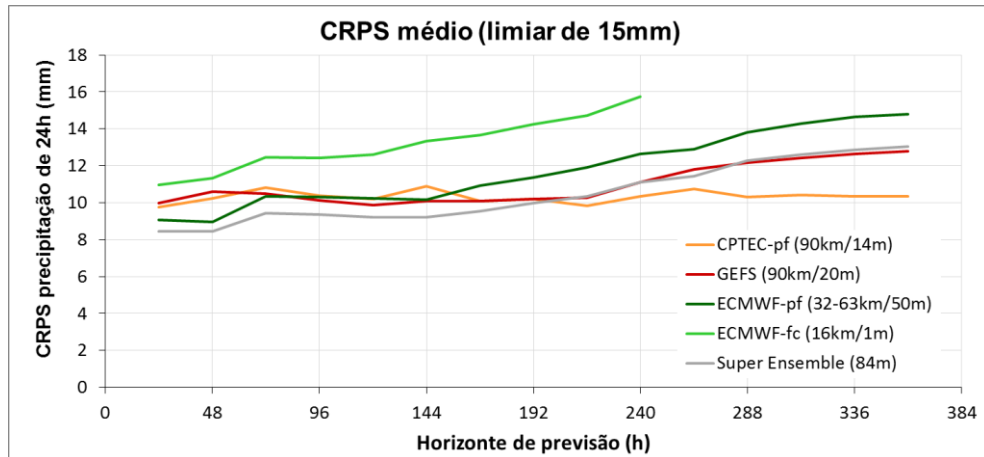


Figura 73. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce.



**Figura 74. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce.**

Para as duas primeiras análises o CPTEC-pf em geral apresentou desempenho inferior aos demais EPS para as duas primeiras análises, onde os valores de CRPS variaram entre 3mm e 4mm (todos os dados) e entre 6,5mm e 8mm (limiar de 5mm) ao longo das antecedências. Já para o limiar de 15mm os erros ficaram em torno de 10mm ao longo de todo o horizonte de previsão. O CPTEC-pf foi o EPS com melhor desempenho em termos de CRPS médio para o limiar de 15mm e antecedências maiores que 192h. Provavelmente isto acontece na medida em que para os maiores horizontes de previsão ele tende a aumentar os valores de chuva média.

Assim como aconteceu para a análise de EMA, na análise do CRPS médio o GEFS apresentou um desempenho sempre intermediário em comparação com os outros dois EPS. Quando usados todos os dados os erros variaram entre 2,5mm e 2,8mm ao longo dos horizontes de previsão. Considerando o limiar de 5mm os erros das previsões variaram em torno de 7mm. Já para o limiar de 15mm os erros variaram entre 10mm a até aproximadamente 13mm ao longo dos horizontes de previsão.

Os resultados do ECMWF-pf, indicaram que ele foi o melhor modelo em termos de CRPS médio para a análise com todos os dados, onde os erros se situaram entre 2mm e 2,4mm. Para o limiar de 5mm ele foi o EPS com menores erros até a antecedência de aproximadamente 272h (cerca de 6mm), e no final do horizonte seu desempenho acabou sendo pior que os demais (CRPS médio de 7,6mm). Já para o limiar de 15mm o CRPS médio variou entre 9mm e 15mm., sendo que o ECMWF-pf obteve o pior resultado no horizonte de previsão a partir de 150h. Este erro maior nas maiores chuvas evidencia os potenciais do problema em prever eventos com mais intensidade.



Em relação ao Super Ensemble, assim como na análise de EMA os resultados indicaram um desempenho variado nas análises para os três limiares. Considerando todos os dados o desempenho foi muito similar ao ECMWF-pf. Já para a análise com limiar de 5mm os erros foram os menores em comparação com todos os EPS. E na análise com limiar de 15mm os erros foram os menores até a antecedência de aproximadamente 192h, a partir de onde foram muito próximos ao GEFS. Assim como para a análise de EMA, aqui se acredita que este desempenho também acontece em função dos diferentes tipos de erros existentes no EPS, que ao serem combinados acabam se compensando.

Para a previsão determinística (ECMWF-fc), o CRPS médio é equivalente ao EMA. Ou seja, para a análise com todos os dados erros que variaram entre 2,8mm e 3,5mm. Para o limiar de 5mm os erros foram de 8mm até 10mm. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 11mm a até 16mm ao longo dos horizontes de previsão. Com exceção da primeira análise, onde ela foi melhor que o CPTEC-pf, os resultados da previsão determinística foram sempre inferiores aos resultados dos EPS, indicando vantagens no uso da previsão por Ensemble.

### **6.2.6. Rank Histograms**

Os Rank Histograms obtidos neste trabalho para cada um dos EPS usados e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 75 e na Figura 76. Assim como foi feito para o Alto São Francisco, dado o número diferente de membros entre os EPS avaliados, os Rank Histograms foram montados reamostrando os dados dos EPS em 10 classes cada, para que os mesmos sejam comparáveis. E os histogramas não foram computados para a análise com todos os dados, por que não existe a possibilidade de chuva menor do que zero.

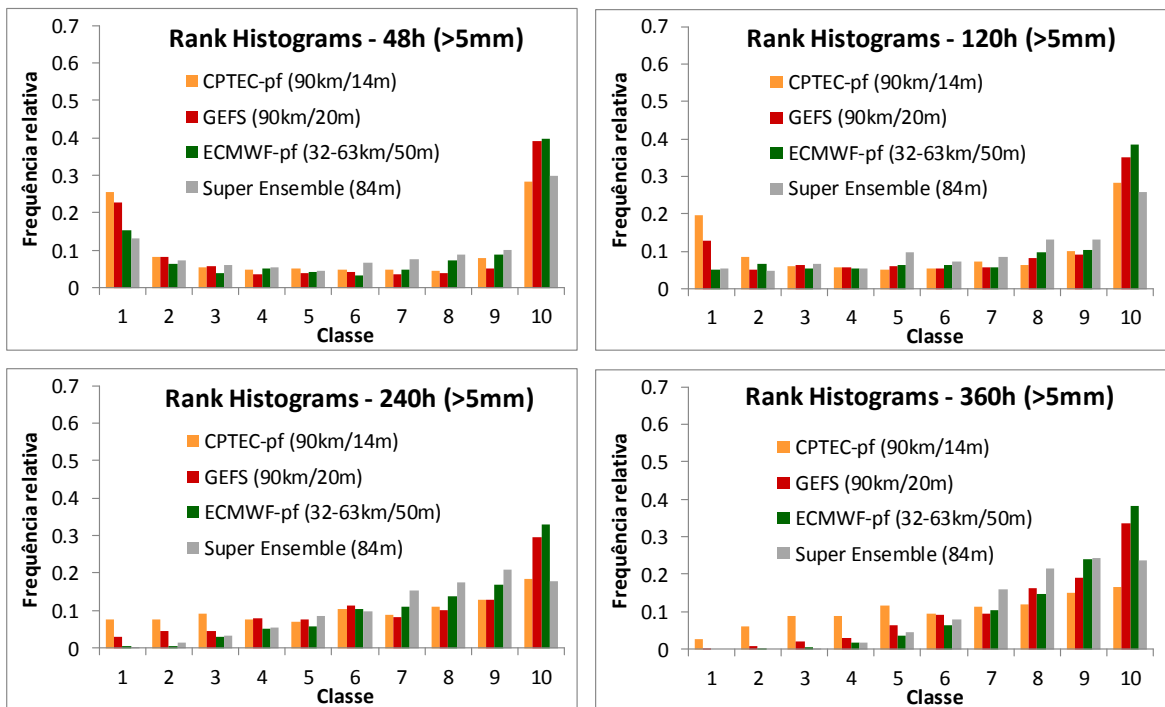


Figura 75. Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

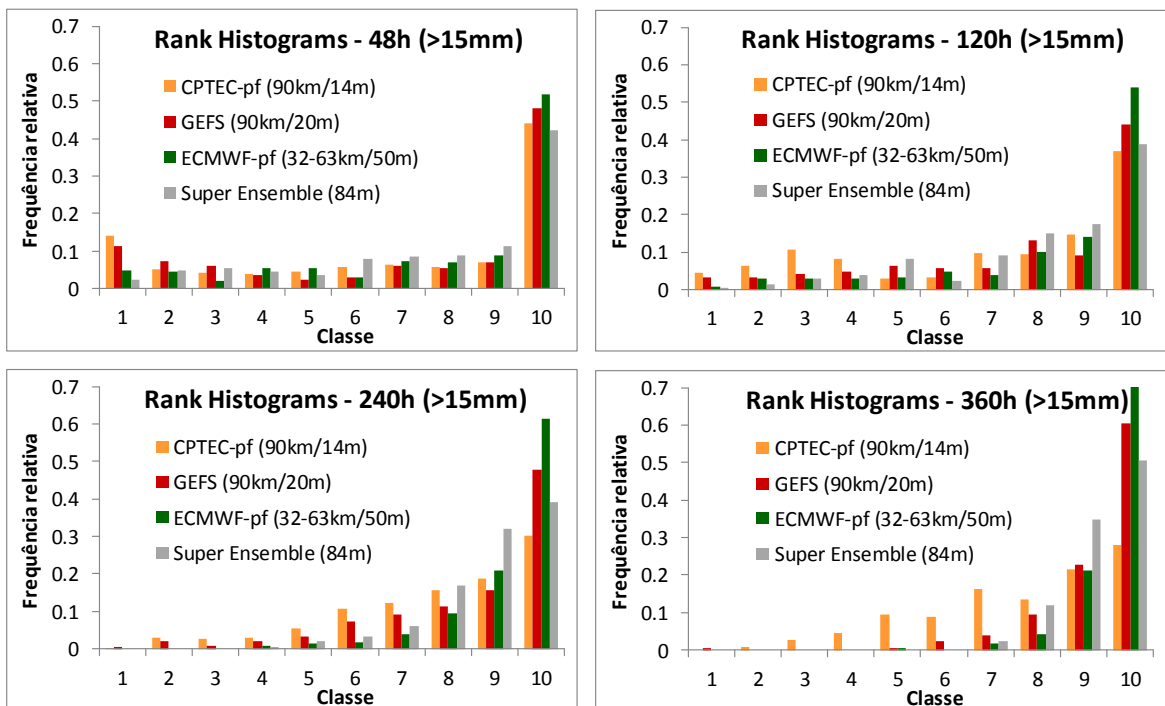


Figura 76. Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

Para o menor limiar utilizado (5mm) nos horizontes de 48h e 120h em geral os histogramas dos modelos apresentaram um formato de “U”, com frequências ligeiramente

maiores na classe 10. Isto indica que as previsões possuem pouco espalhamento nestes horizontes, com uma tendência maior de viés negativo do que positivo nos resultados.

Ainda para o limiar de 5mm, nos horizontes de 240h e 360h, o CPTEC-pf apresentou formato mais plano, indicando um espalhamento mais bem distribuído do conjunto. Enquanto que o GEFS e o ECMWF-pf apresentaram um histograma crescente na direção da maior classe, indicando um viés negativo nestes horizontes, mais marcante que nos horizontes iniciais.

Já para a análise com o maior limiar, todos os EPS apresentaram histogramas em forma de rampa, com maiores frequências dentro das maiores classes. Isto indica que todos os modelos sofrem com viés negativo nas maiores chuvas, especialmente o ECMWF-pf, que mostrou as maiores frequências na classe 10, chegando a frequências de mais de 70% das observações situadas acima de todos os membros do conjunto no horizonte de 360h.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que a agregação de todos os membros do conjunto resulta em um histograma ligeiramente mais suavizado, mas é mantida a tendência crescente com o aumento das antecedências, principalmente pela grande influência do ECMWF-pf (ensemble com mais membros).

### 6.2.7. Brier Score (BS)

Os resultados de BSS para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 77 e na Figura 78.

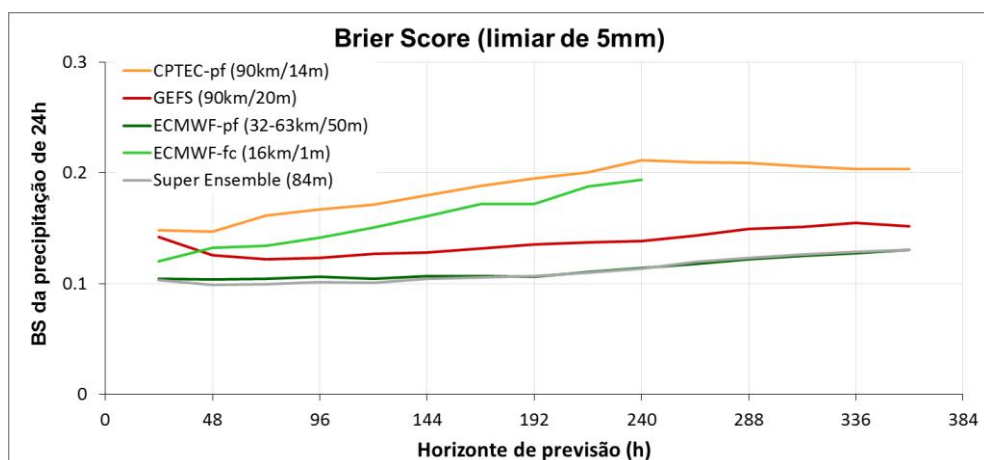
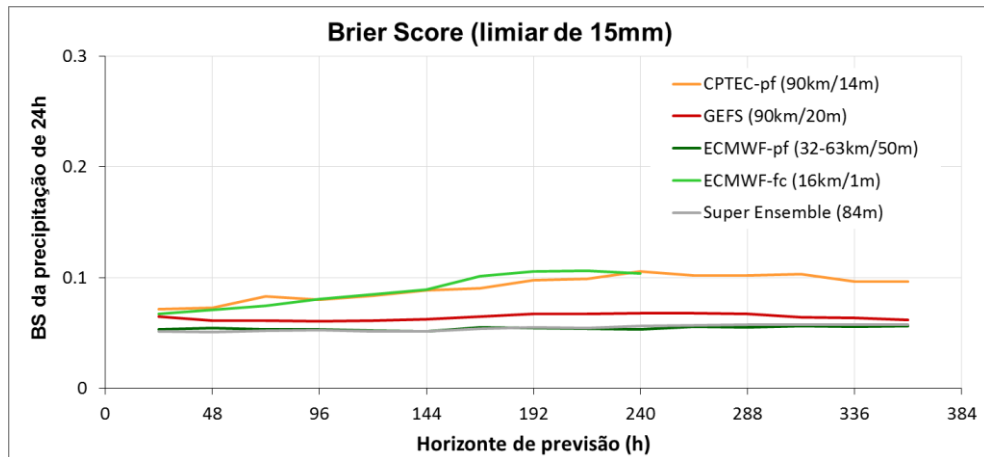


Figura 77. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Doce.



**Figura 78. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Doce.**

Nesta análise de BS o CPTEC-pf apresentou geralmente desempenho um pouco inferior aos demais modelos. Os resultados do CPTEC-pf se situaram em torno de 0,15 a 0,21 para o limiar de 5mm e entre 0,08 a 0,1 para o limiar de 15mm ao longo do horizonte de previsão.

O GEFS apresentou desempenho ligeiramente melhor que o CPTEC-pf, e um pouco inferior ao ECMWF-pf. Os valores situaram-se em torno de 0,12 a 0,15 para o limiar de 5mm, e em torno de 0,06 para o limiar de 15mm.

O ECMWF-pf foi o EPS que apresentou melhor desempenho em termos de Brier Score, até mesmo para o maior limiar de 15mm onde não teve desempenho tão bom nas demais estatísticas. Os valores se situaram em torno de 0,1 a 0,13 para o menor limiar (5mm), e em torno de 0,05 para o maior limiar (15mm) ao longo de todo o horizonte de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, foram praticamente idênticos aos resultados do ECMWF-pf, que obteve melhor desempenho na análise. A previsão determinística de referência (ECMWF-fc) apresentou geralmente desempenho inferior ao ECMWF-pf e ao GEFS, e desempenho pior ou igual ao CPTEC-pf. Para o menor limiar os seus valores ficaram entre 0,12 e 0,2 dentro do horizonte de previsão de 240h, e para o maior limiar seus valores ficaram entre 0,06 e 0,1.

### 6.2.8. Diagramas ROC

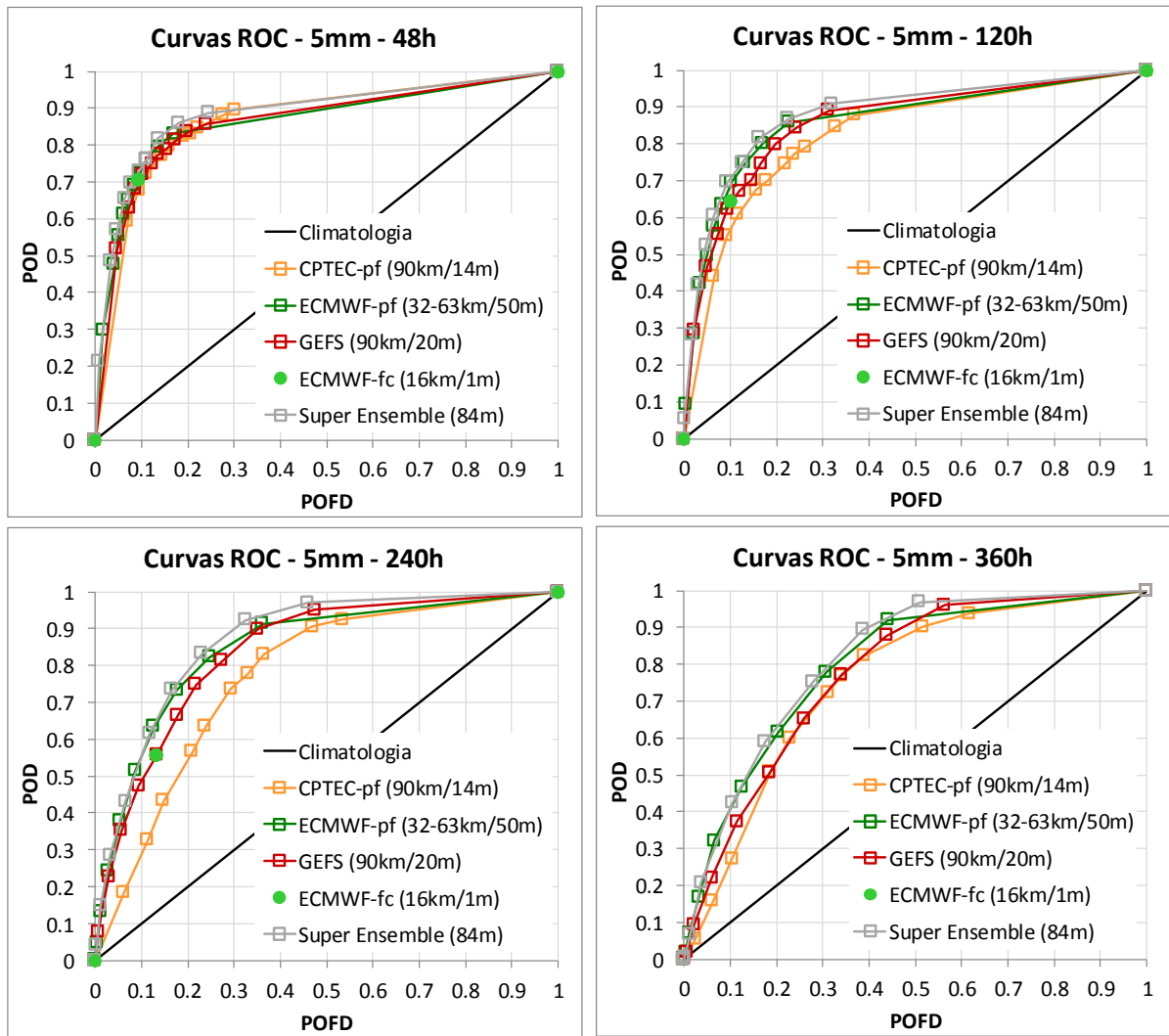
Os resultados de diagramas ROC para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 79 e na Figura 80.

Nos diagramas ROC os resultados de todos os modelos foram muito similares na antecedência de 48h (para ambos os limiares), não ficando clara a vantagem de um EPS sobre o outro neste horizonte de previsão.

As curvas ROC compostas pelos pontos do CPTEC-pf em geral ficaram abaixo das curvas representadas pelos outros EPS para o limiar 5mm, principalmente nos horizontes de 120h e 240h. Em termos de valores, o percentil superior do CPTEC-pf para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo 0,91 e uma POFD em torno 0,53.

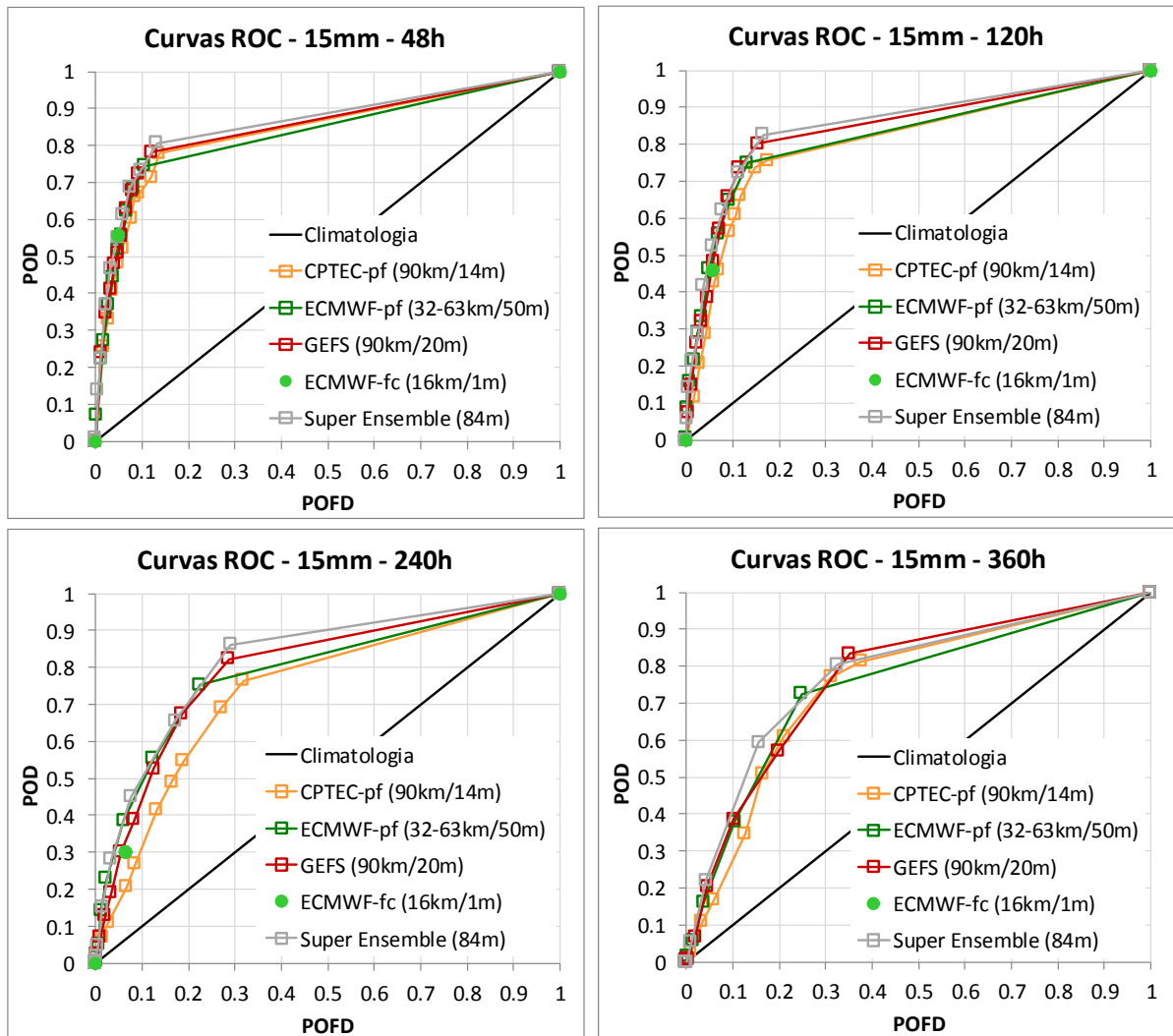
Para a análise com limiar de 15mm o CPTEC-pf também não apresentou o melhor desempenho nos horizontes de 120h e 240h, com a curva formada pelos seus pontos posicionada mais longe do ponto considerado ideal ( $POD=1$  e  $POFD=0$ ). Em termos de valores, o percentil superior do CPTEC-pf para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo 0,78 e uma POFD em torno 0,31.

As curvas ROC compostas pelos pontos do GEFS mostraram um desempenho intermediário entre os outros dois EPS para o limiar 5mm. Em termos de valores, o percentil superior do GEFS para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo 0,93 e uma POFD em torno 0,48. Estes valores são mais próximos das condições ideais do que os encontrados para o CPTEC-pf.



**Figura 79. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.**

Para a análise com limiar de 15mm o GEFS pode ser o modelo com melhor desempenho, com a curva formada pelos seus pontos posicionada mais longe da curva de quarente e cinco graus do que as curvas dos demais EPS. Em termos de valores, o percentil superior do GEFS para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo 0,81 e uma POFD em torno 0,29. Esta foi a POD mais alta detectada entre os EPS neste horizonte de previsão.



**Figura 80. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.**

As curvas ROC dadas pelos pontos do ECMWF-pf apresentaram o melhor desempenho entre os três EPS testados na análise de 5mm, onde seu percentil superior indicou POD na ordem de 0,9 para uma faixa de alarmes falsos (POFD) em torno de 0,35 na antecedência de 240h. Este desempenho consiste em uma POD ligeiramente menor do que a encontrada para o GEFS, porém com uma POFD 13% menor.

Na análise de 15mm o ECMWF-pf apresentou desempenho com PODs menores, sendo elas superadas pelas PODs do GEFS, embora com diferenças na POFD. Por exemplo, o percentil superior do ECMWF-pf para a antecedência de 240h indicou um POD próximo 0,75 e uma POFD em torno 0,22. Esta foi a POD mais alta detectada entre os EPS neste horizonte de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que é possível obter curvas ligeiramente superiores aos demais modelos utilizando a combinação dos EPS. Isto foi constatado para todos os horizontes e limiares testados, indicando um benefício na composição do super ensemble.

Já a previsão determinística de referência (ECMWF-fc), que é mostrada como um ponto verde nos diagramas, apresentou um desempenho que pode ser considerado sempre pior que os ensembles para todos os horizontes de previsão e limiares. Isto por que praticamente em todas as análises os resultados indicam que é possível obter melhores POD utilizando os limiares superiores das previsões por conjunto para uma mesma dada POFD do ECMWF-fc.

### **6.2.9. Reliability Diagrams**

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo I das previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades. É válido lembrar que o viés condicional tipo I é uma medida diferente do viés. O viés simples é dado pelo grau de correspondência entre as médias das observações e das previsões, e já o viés condicional tipo I é dado pelo grau de correspondência entre as probabilidades das previsões e as frequências de observações verificadas para estas probabilidades.

Os *Reliability Diagrams* para cada um dos EPS usados e o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 81 e na Figura 82. Estes diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf apresentaram em geral um comportamento relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais observadas correspondentes. Considerando o limiar de 5mm, por exemplo, quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,91 os eventos foram observados com frequências de 0,4 no horizonte de 360h. Para o limiar de 15mm os resultados de viés condicional positivo foram mais expressivos, onde para a antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,71 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,18.



Em relação a contagem de amostras do CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) novamente foi expressivamente maior que para as demais classes. O número foi sempre maior que 1000, enquanto que nas demais classes o número de amostras se manteve entre 1000 e 100. Especialmente nos horizontes maiores.

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões. Embora os resultados tenham sido um pouco melhores que o CPTEC-pf (mais próximos da linha de quarenta e cinco graus). Como exemplo, no horizonte de previsão de 360h para o limiar de 5mm as previsões indicaram probabilidades de ocorrências maiores que 0,89 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,51. Para o limiar de 15mm e antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,71 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,29.

Em relação a contagem de amostras do GEFS, assim como para o CPTEF-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi maior (sempre entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 500). Somente na antecedência de 360h e limiar de 15mm ocorreu um número pequeno de amostras (entre 1 e 10).

A função de calibração do ECMWF-pf pode ser considerada a melhor de todas entre os EPS para a análise de 5mm, por estar mais próxima da linha de quarenta e cinco graus. Apesar de os resultados também indicarem um viés condicional tipo I positivo. Como exemplo, no horizonte de previsão de 360h para o limiar de 5mm as previsões indicaram probabilidades de ocorrências maiores que 0,85 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,6. Para o limiar de 15mm ela foi muito similar ao GEFS. Por exemplo, na antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,7 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,4.

Em relação a contagem de amostras do ECMWF-pf, assim como nos demais EPS o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi maior (sempre entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 500). Contudo, o ECMWF-pf sofreu com um problema adicional que foi a falta de amostras nas maiores classes dos maiores horizontes para a análise de 15mm. Com isso, as estatísticas não puderam ser calculadas de forma correta nestes locais. Esta falta de amostras pode estar relacionada com o viés negativo verificado e outras métricas.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram resultados em geral muito similares aos do ECMWF-pf.

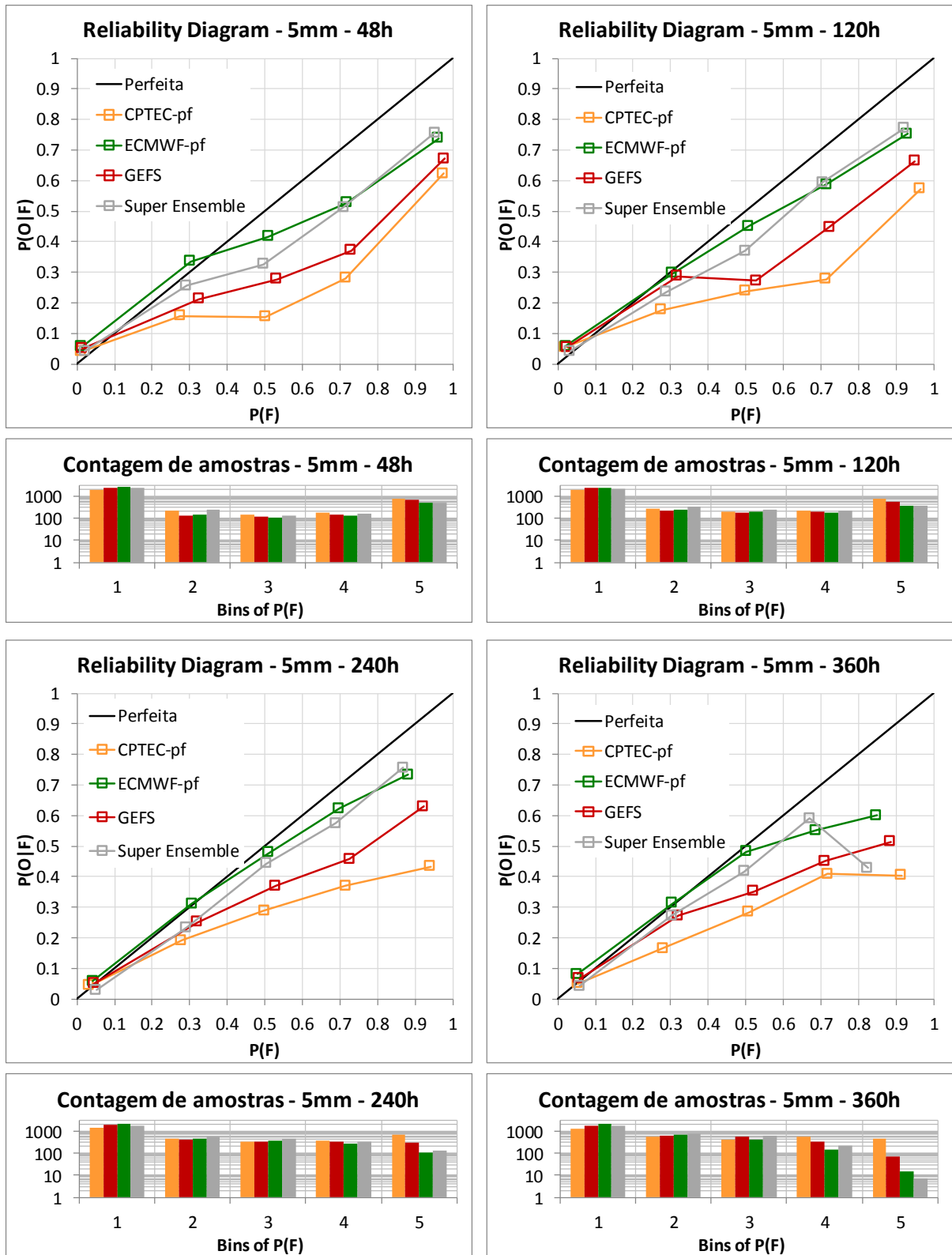


Figura 81. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

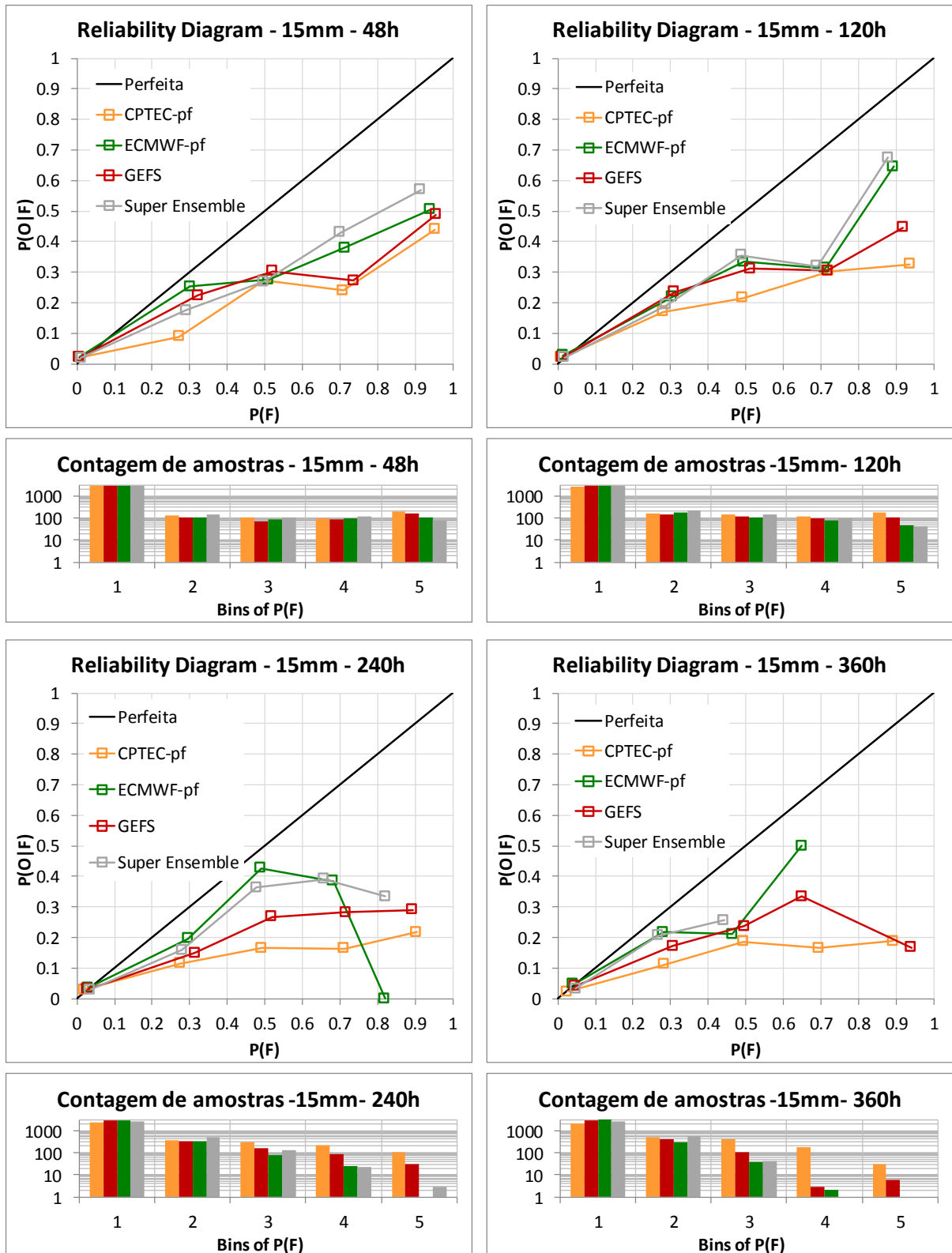


Figura 82. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

### 6.2.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do Rio Doce

Os principais resultados encontrados para as análises de chuva para o a bacia do Rio Doce podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros médios absolutos do ECMWF-pf foram em geral os menores para as análises com todos os dados e com limiar de 5mm, enquanto que os do CPTEC-pf foram os maiores. Contudo, para a análise com limiar de 15mm os maiores erros foram do ECMWF-pf, e os do CPTEC-pf os menores. Indicando que o ECMWF-pf pode ter maiores problemas nas maiores chuvas. O GEFS apresentou desempenho intermediário e mais estável entre os dois modelos. O Super Ensemble apresentou desempenho melhor que os demais EPS na análise de 5mm, e próximo ao GEFS nas demais.

- Para o EMR, na análise com todos os dados o viés foi positivo, provavelmente causado por previsões de chuva quando a ocorrência é próxima de zero. Já os resultados de análises com limiares apontaram para uma tendência de um maior viés negativo na média das previsões com o aumento do horizonte de previsão, e com o aumento do limiar utilizado. Com exceção do CPTEC-pf que mostrou um viés positivo também para o limiar de 5mm. Este resultado mostra que os modelos podem tender a subestimar maiores chuvas, nos maiores horizontes de previsão, com pior desempenho para o ECMWF-pf nesse caso.

- O coeficiente de correlação mostrou a seguinte ordem de desempenho para as análises com todos os dados: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Já nas análises com limiar o desempenho foi similar entre todos os modelos. Verificou-se que a previsão determinística apresentou um desempenho superior que o CPTEC-pf e que o GEFS em muitos momentos das análises. Já na comparação com o Super Ensemble, a média do Super Ensemble apresentou um desempenho superior aos demais na análise com todos os dados e com limiar de 5mm.

- Os resultados de CRPS médio foram muito similares aos resultados de EMA. Neles, o ECMWF-pf mostrou menos erros para as análises com todos os dados e com limiar de 5mm, enquanto que os do CPTEC-pf mostrou os maiores erros. Contudo, para a análise com limiar de 15mm os maiores erros foram do ECMWF-pf, e os do CPTEC-pf os menores, principalmente nos maiores horizontes de previsão. Corroborando com a indicação que o ECMWF-pf pode ter maiores problemas nas maiores chuvas. O GEFS apresentou

desempenho intermediário entre os dois modelos e o Super Ensemble apresentou desempenho melhor que os demais EPS na análise de 5mm, e próximo ao GEFS nas demais.

- O Rank Histogram indicou um formato predominante de existência de um viés negativo nas precipitações, com exceção do CPTEC-pf para a análise de 5mm, onde ele mostrou previsões com maior espalhamento nas antecedenças 240h e 360. Para as análises com limiar de 15mm o ECMWF-pf apresentou a tendência de viés negativo mais marcante.

- A análise de BS indicou também a seguinte ordem de desempenho entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que a da previsão determinística apresentou um desempenho geralmente inferior ao das probabilísticas do ECMWF-pf e do GEFS em todo o horizonte de previsão, e similar ou superior ao do CPTEC-pf. Já na comparação com o Super Ensemble os resultados foram muito similares ao ECMWF-pf.

- A análise das curvas ROC indicou um desempenho superior dos percentis superiores do ECMWF-pf na detecção do limiar de 5mm, e do GEFS na detecção do limiar de 15mm. Foi verificado um ligeiro benefício no uso do Super Ensemble em comparação com os EPS individualmente. E na comparação com a previsão determinística os limiares superiores das previsões por conjunto sempre se sobressaíram.

- Na análise dos *Reliability Diagrams* os resultados apontaram para uma tendência geral dos modelos de mostrar um viés condicional do tipo I positivos. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais correspondentes observadas. O desempenho dos modelos tendeu a ser melhor para o ECMWF-pf, embora este também tenha sofrido com falta de amostras para a análise considerando o maior limiar, o que compactua com o seu viés negativo observado em outras métricas.

- Sobre os resultados é importante considerar que todos eles foram calculados com um número limitado de amostras, especialmente os resultados com maior limiar. Assim, é importante considerar que algumas das pequenas diferenças registradas podem ser apenas devidas a questões amostrais. Por este motivo, quando as linhas das métricas estavam muito próximas evitou-se uma comparação mais rígida entre os modelos.

Traçando um panorama das previsões de chuva na bacia a partir destas análises, pode-se dizer que as previsões do ECMWF-pf e do GEFS em geral possuem um viés negativo, que aumenta com o horizonte de previsão e com a intensidade da chuva, sendo este mais expressivo no ECMWF-pf. As previsões do CPTEC-pf também possuem um viés negativo

para as maiores chuvas (menor que os outros dois modelos), contudo, elas também possuem outros tipos de erros para as menores chuvas, provavelmente indicando a ocorrência de eventos que não são observados, o que causa um viés positivo para a análise com menor limiar de 5mm e menores correlações também nas análises com todos os dados e com limiar de 5mm. E ela tende a gerar mais chuva conforme o crescimento do horizonte de previsão no período chuvoso.

Este resultado indica que a medida de tendência central das previsões por conjunto não é a melhor opção para a utilização dos resultados do modelo, principalmente para os maiores horizontes de previsão e quando ocorrem grandes chuvas. Principalmente o ECMWF-pf. Isto deve ser tomado em conta no momento da utilização dos resultados, e possivelmente uma estratégia de remoção de viés na tendência central do conjunto poderia melhorar este desempenho.

Em relação à calibração dos ensembles, as probabilidades das previsões não são propriamente calibradas, contendo um viés de superestimativa das probabilidades de ocorrência em relação as frequências relativas observadas. Isto prejudica o uso do espalhamento do conjunto como uma inferência sobre a incerteza do futuro.

As previsões do ECMWF-pf, apesar de seu problema mais expressivo no que se relaciona com a detecção de maiores chuvas ainda assim apresentam um desempenho superior em análises com o BS. Todavia, na análise de ROC ela apresentou desempenho inferior ao GEFS na análise do maior limiar. Assim, devido ao viés, talvez elas não sejam tão indicadas para a detecção de cheias se utilizadas sem nenhum pré-processamento nesta bacia. Contudo, o uso de seus maiores percentis ainda sugerem taxas aceitáveis de acerto de ocorrência dos eventos.

No quesito de comparação determinística versus probabilística muitas vezes foi verificado que nem sempre a previsão determinística é pior que a previsão probabilística, estando sempre esta comparação dependente da qualidade dos modelos. Na comparação da probabilística do ECMWF-pf com a determinística do ECMWF-fc, a previsão por ensemble foi praticamente sempre superior. Mas, para algumas métricas a previsão determinística se destacou em comparação com o GEFS e o CPTEC-pf. Especialmente nas análises de detecção de cheias (BS, ROC) as previsões probabilísticas sempre se sobressaíram, mostrando vantagem da previsão por conjunto para este tipo de aplicação.

Sobre as questões de resolução espacial e do número de membros no conjunto, como o ECMWF-pf possui maior resolução e maior número de membros, é possível que estes fatores

sejam benéficos para o desempenho principalmente para as métricas de detecção de limiares. Contudo, possivelmente estes não são os únicos fatores, pois assim como foi visto para a bacia do São Alto São Francisco o GEFS possui a mesma resolução espacial do CPTEC-pf, e apenas seis mais membros, e mesmo assim seus resultados são geralmente melhores. Também, o ECMWF-fc possui maior resolução espacial do que todos os demais modelos, mas nem sempre ele é o melhor modelo, pois não é uma previsão por conjunto. Especialmente na comparação com o ECMWF-fc. Isto sugere que existe um benefício do sacrifício de resolução espacial em contrapartida de que o modelo seja rodado várias vezes para formar o conjunto.

Na análise de composição do Super Ensemble verificou-se que em alguns casos existiu uma vantagem na composição do conjunto usando todos os modelos, e para algumas outras métricas este benefício não ficou evidente, principalmente na comparação com o ECMWF-pf. Contudo, uma vantagem da composição do Super-Ensemble é que ele também nunca apresentou os piores resultados. Ou seja, a sua utilização pode ser encarada como robusta, já que apesar de nem sempre os melhores resultados serem encontrados, os piores também não são.

### 6.3. Bacia do Rio Tocantins

Os resultados das análises de chuva para a Bacia do Rio Tocantins, para cada uma das métricas avaliadas, são apresentados nos itens seguintes. Assim como para as duas demais bacias, os resultados de cada métrica são apresentados e descritos em cada um dos itens. Mas o seu significado e suas implicações (discussões dos mesmos) são discutidas ao final da sequência.

O número de amostras usadas nestes cálculos para a bacia do Rio Tocantins foi:

- Todos os dados – 1873 amostras
- >5mm - 425 amostras
- >15mm - 98 amostras

### 6.3.1. Análise da climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles

Na Figura 83 é apresentada uma análise da média, desvio padrão e coeficiente de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a previsão foi emitida. Os valores apresentados para cada mês correspondem ao desvio padrão, média, e coeficiente de variação médios computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.

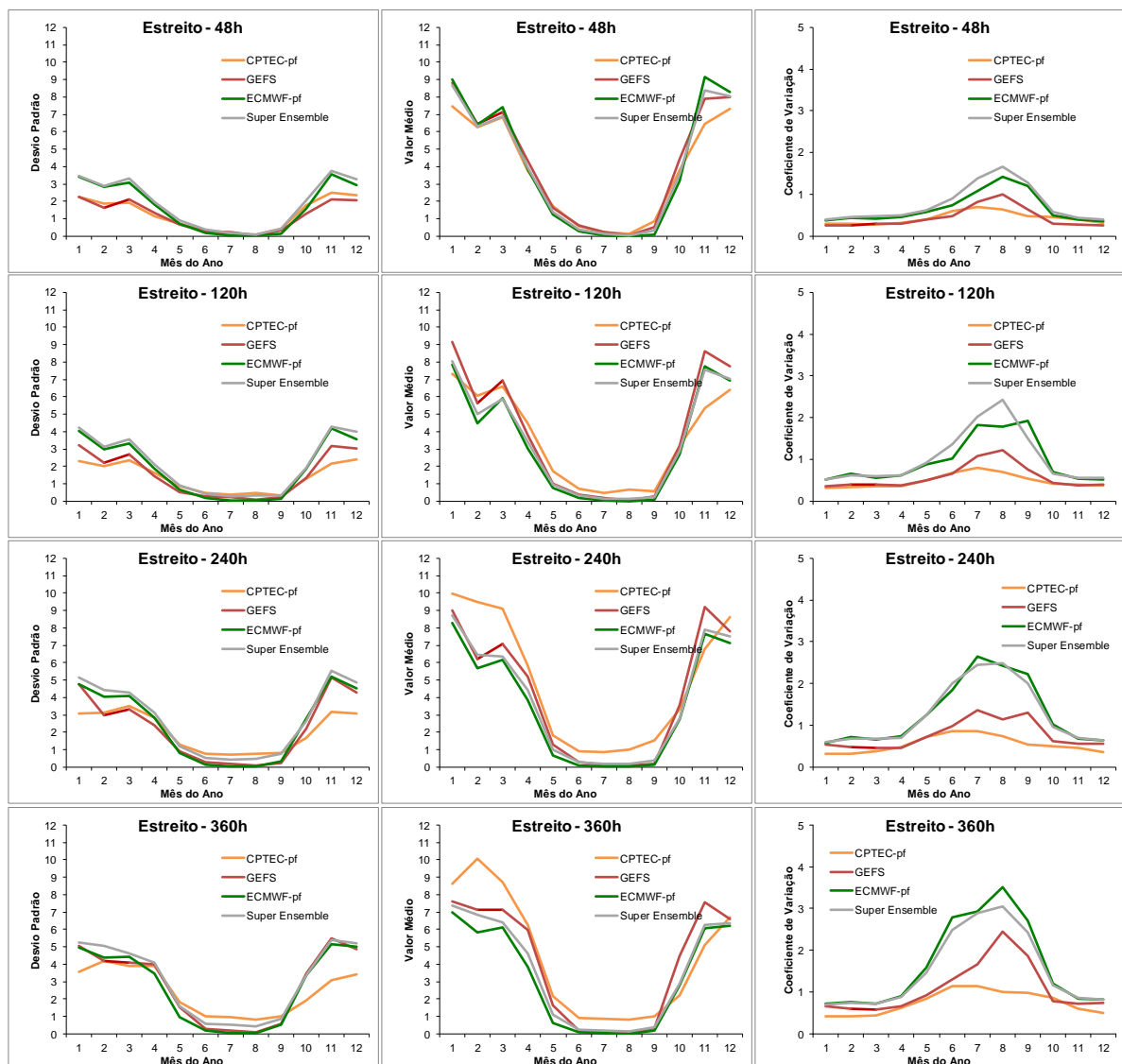


Figura 83. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.



Assim como verificado nas demais bacias, o formato de “U” das curvas mostra que durante os meses de Maio a Setembro (meses secos do clima tropical) o desvio padrão e a média das previsões são menores, possivelmente por que todos os membros do conjunto geralmente preveem chuvas mais próximas de zero. Já durante os meses de Outubro a Abril os valores de desvio e média são maiores, que é o período chuvoso nas bacias.

Com o aumento dos horizontes de previsão nota-se um aumento no desvio padrão das previsões para o período chuvoso. O aumento é de cerca de 1mm entre o horizonte de 120h e 240h, e também de cerca de 1mm entre 240h e 360h.

Em relação a média, nota-se especialmente que o CPTEC-pf sugere um aumento no valor médio da chuva prevista durante o período úmido nos maiores horizontes. Ou seja, que ele tem uma tendência de prever mais chuva nos maiores horizontes em Janeiro, Fevereiro e Março.

Em relação ao coeficiente de variação, similar ao encontrado para o São Francisco e o Doce, nota-se que durante os meses mais chuvosos seu valor está posicionado entre 0,3 e 1, ou seja, os desvios padrão dos EPS correspondem a valores entre 30% e 100% do valor da média. Já para os meses mais secos os valores do coeficiente de variação foram mais elevados e chegaram a valores maiores que 3 em alguns casos. Isto acontece basicamente devido aos valores trabalhados nesta época serem mais baixos, onde desvios padrão na ordem de 1mm a 2mm divididos pelas médias menores que a unidade sugerem os coeficientes de variação mais elevados. Para o Tocantins também as médias do CPTEC-pf foram um pouco mais elevadas durante o período seco, sugerindo coeficientes de variação menores.

Em relação ao comportamento do Super Ensemble, em geral ele sugeriu um desvio maior que os EPS que o compõem. Acredita-se que isto possivelmente ocorre devido ao fato de ele ser formado por três conjuntos que quando combinados indicam um leque de trajetórias mais amplo que qualquer um dos EPS individualmente.

### **6.3.2. Erro Médio Absoluto**

Os resultados obtidos de Erro Médio Absoluto (EMA) para cada um dos EPS, previsão determinística, e Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 84, na Figura 85, e na Figura 86.

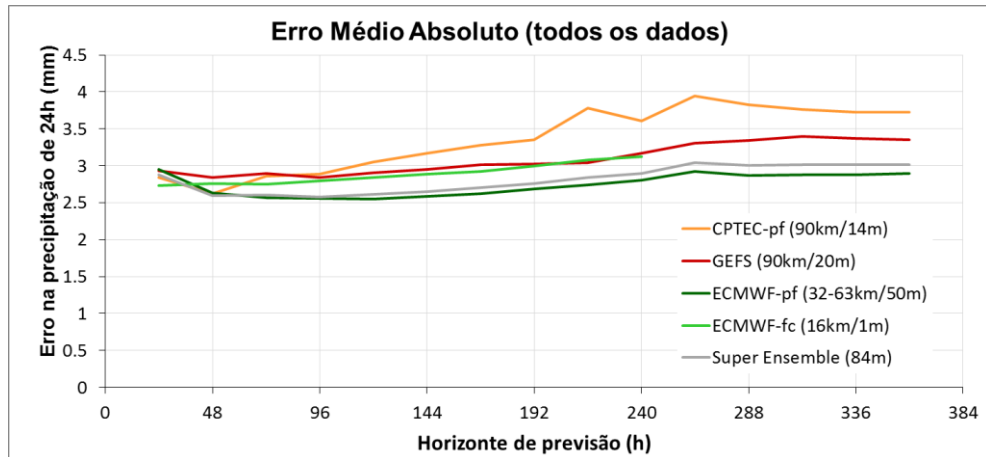


Figura 84. Resultados de EMA na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins.

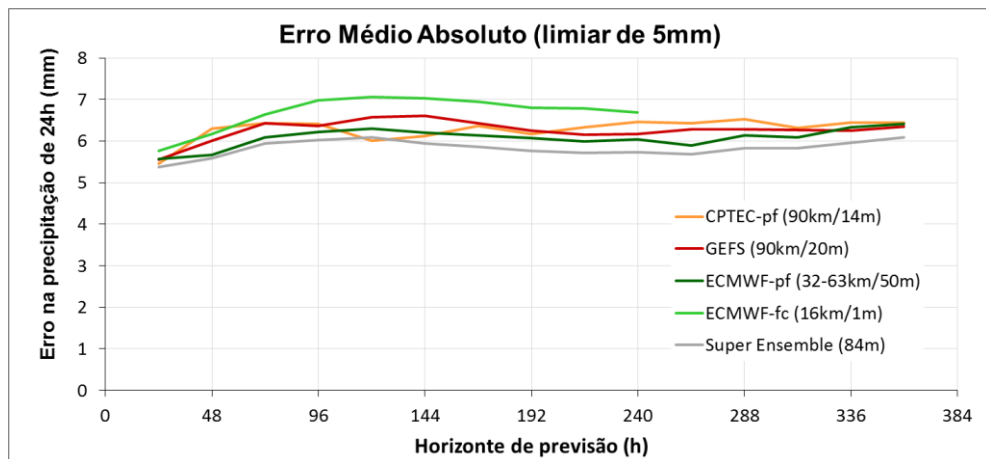


Figura 85. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.

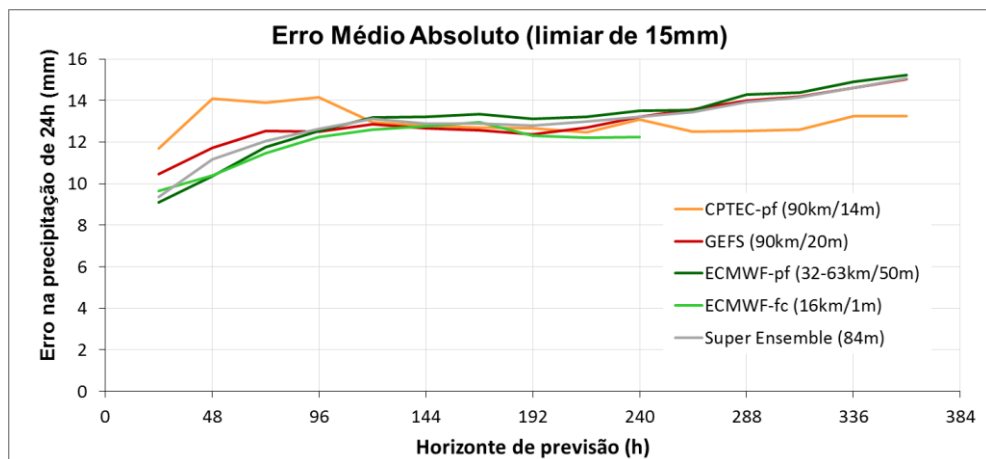


Figura 86. Resultados de EMA na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.

Nestes resultados com todos os dados, a média do CPTEC-pf em geral apresentou um erro mais elevado que os demais EPS, onde os erros variaram entre 3,5mm (48h) e 3,7mm (360h). Nas análises com limiar os erros foram similares aos demais EPS nos diferentes horizontes de previsão, incluindo erros mais baixos nos maiores horizontes da análise de 15mm. Na análise de 5mm os erros variaram entre 5,5mm nos primeiros horizontes de previsão até 7,5mm nos últimos horizontes. Na segunda análise de 15mm, os erros ficaram entre 12mm e 14mm ao longo da previsão.

Os resultados de EMA para o GEFS mostraram um desempenho intermediário entre os demais EPS na análise com todos os dados, onde os erros variaram entre 3mm e 3,5mm ao longo do horizonte de previsão. Nas análises com limiar os resultados do GEFS foram próximos aos dos outros modelos. Nas análises com limiar de 5mm os resultados ficaram em torno de 6mm. Na análise com limiar de 15mm os erros variaram entre 11mm e 15mm.

A linha que indica o erro médio do conjunto do ECMWF-pf apresentou os menores erros nas análises com todos os dados e na análise com o limiar de 5mm. Os erros variaram entre 2,5mm e 3mm na primeira e entre 5,5mm e 6,5mm na segunda. Já na análise com limiar de 15mm os erros do ECMWF-pf estiveram entre os maiores observados (pior desempenho), especialmente a partir do horizonte de 144h. Os erros chegaram a aproximadamente 17mm no final da previsão. Isto é um indicativo de que o ECMWF-pf pode apresentar deficiências na estimativa das maiores chuvas na bacia.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que o uso combinado dos resultados de todos os EPS gera um conjunto cujo erro médio teve um desempenho muito similar ao ECMWF-pf nas três análises.

Já a previsão determinística de referência, ECMWF-fc, apresentou para a análise com todos os dados erros que variaram entre 2,7mm e 3mm. Para o limiar de 5mm os erros foram de 5,8mm até 7mm. Já para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 10mm a até 12mm ao longo dos horizontes de previsão. Os erros cresceram ao longo do horizonte de previsão (que é de 240h para a previsão determinística).

Na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS pode-se afirmar que nem sempre os EPS apresentaram melhor desempenho que a previsão determinística. Especialmente os EPS do CPTEC e do GEFS na análise com todos os dados. Já na análise com limiar de 15mm a previsão determinística mostrou um desempenho muito similar aos EPS, inclusive com alguns erros menores em alguns horizontes de previsão.

### 6.3.3. Erro Médio Relativo

Os resultados obtidos de Erro Médio Relativo (EMR) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados nas Figura 87, Figura 88, e Figura 89.

No caso das análises com todos os dados foram considerados apenas os momentos em que a observação foi maior que zero, já que a métrica não pode ser calculada quando a observação é nula.

Nos resultados de EMR considerando todos os dados o viés foi em geral positivo (excesso de chuva), e para as análises com limiar os erros tenderam a um viés negativo com o aumento do horizonte de previsão, ou seja, de falta de chuva. Mais uma vez, estes resultados de erro considerando todos os dados são influenciados pelos casos onde a chuva é nula ou muito próxima de zero nas observações, mas são feitas previsões de ocorrência de chuva na bacia. Com isso, existe sempre uma tendência de viés positivo, e relativamente alto se forem considerados os possíveis pequenos valores em observações.

Os resultados da análise para o CPTEC-pf com todos os dados apontaram erros relativos positivos próximos de 0,4 no final do horizonte de previsão. Para o limiar de 5mm os erros se posicionaram em torno de -0,4 e -0,5. Já para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,5 e -0,6. Na análise com todos os dados ele foi o modelo com maiores erros, e nas demais análises os seus resultados foram similares aos demais modelos.

Os resultados do GEFS apontaram erros relativos positivos próximos de 0,2 para o uso de todos os dados. Para o limiar de 5mm os erros foram entre -0,2 e -0,4 e para o limiar de 15mm os erros foram entre -0,5 e -0,6. Isto indica uma tendência de subestimava maior com os maiores horizontes e para as maiores chuvas.

Já os erros médios relativos do ECMWF-pf para todos os dados foram em torno de 0 e 0,1 ao longo do horizonte de previsão. E para os demais limiares os erros foram ligeiramente menores que os do GEFS.

O Super Ensemble apresentou desempenho muito similar ao ECMWF-pf, com exceção da análise com todos os dados, onde ele apresentou maiores erros. A previsão determinística de referência, ECMWF-fc, apresentou um desempenho em geral similar ao ECMWF-pf, porém com erros ligeiramente maiores ao longo das suas 240h de horizonte de previsão. Este desempenho por vezes foi melhor do que o GEFS e o CPTEC-pf.

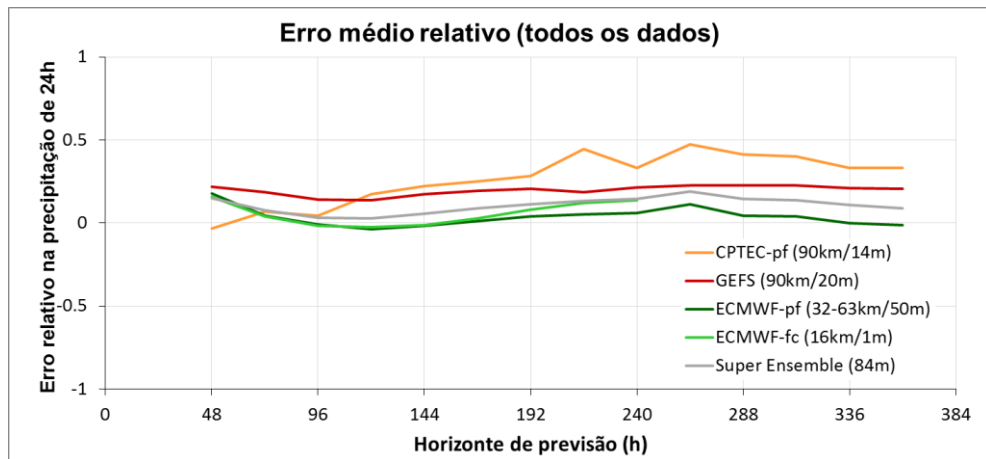


Figura 87. Resultados de EMR na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do rio Tocantins.

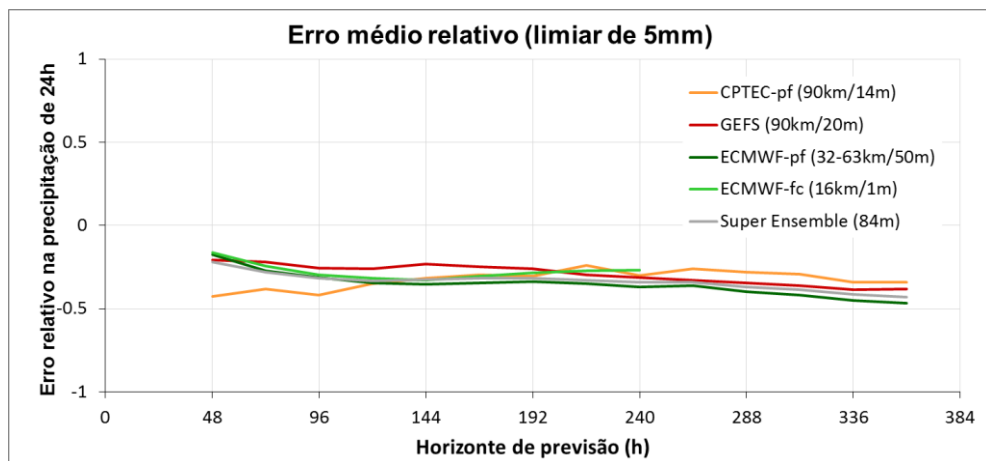


Figura 88. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do rio Tocantins.

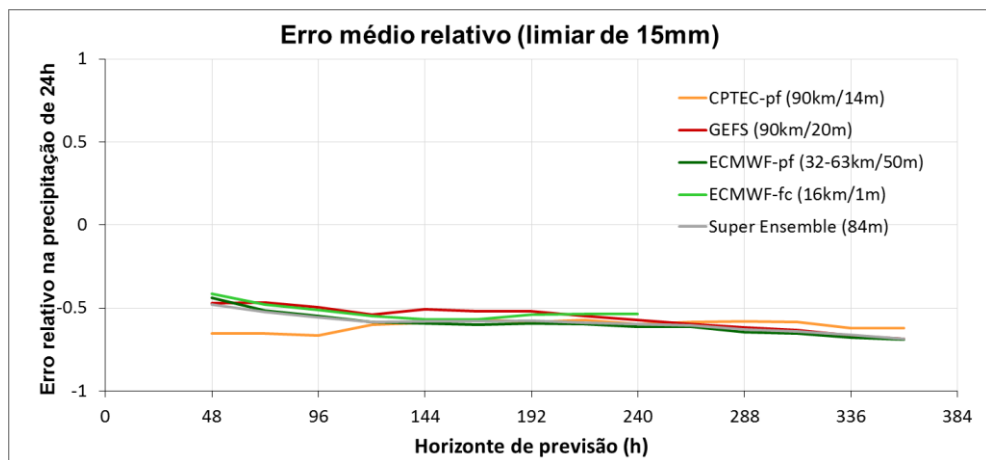


Figura 89. Resultados de EMR na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do rio Tocantins.

#### 6.3.4. Correlação (r)

Os resultados obtidos para o coeficiente de correlação (r) para cada um dos EPS usados, mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 90, Figura 91, e Figura 92.

Na análise considerando o limiar de 15mm em geral todos os EPS mostraram um desempenho similar, que pode ser considerado um valor não satisfatório de correlação, próxima de 0,05. Isto indica que para as grandes chuvas geralmente todos os modelos meteorológicos tiveram uma representação que não se correlacionou devidamente com as observações.

A média do conjunto do CPTEC-pf apresentou um desempenho um pouco abaixo dos demais EPS na análise com todos os dados e na análise com 5mm. Na primeira a correlação variou entre 0,6 e 0,42. Na segunda a correlação variou entre 0,2 e 0,05.

Para a média do conjunto do GEFS os resultados de correlação foram intermediários em comparação com os outros EPS. Na análise com todos os dados variaram entre 0,62 e 0,42. Para o limiar de 5mm o coeficiente variou entre 0,29 e 0,05 ao longo dos horizontes de previsão, decrescendo desde as antecedências iniciais até as finais.

Dentre os três EPS testados o que apresentou melhor desempenho para a análise com todos os dados e com limiar de 5mm foi o do ECMWF. Na primeira a correlação variou entre 0,68 e 0,5. Na segunda a correlação variou entre 0,34 e 0,16.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram geralmente valores muito similares ao ECMWF-pf. E a previsão determinística de referência utilizada, ECMWF-fc, apresentou correlações mais altas que o GEFS e o CPTEC-pf nas análises com todos os dados e com limiar de 5mm. Nesta última, seus resultados foram muito similares ao modelo por ensemble ECMWF-pf. Na análise com todos os dados seus resultados foram ligeiramente piores que o ECMWF-pf, sendo muito similares ao da média do GEFS.

Assim, na comparação entre os resultados da previsão determinística e da média dos EPS verificou-se que a da previsão determinística apresentou um desempenho geral sempre muito similar ou um pouco inferior ao ECMWF-pf, e melhor ou igual aos demais EPS, nas análises com todos os dados e com limiar de 5mm. Na análise com limiar de 15mm ela também indicou valores um pouco maiores que os EPS.

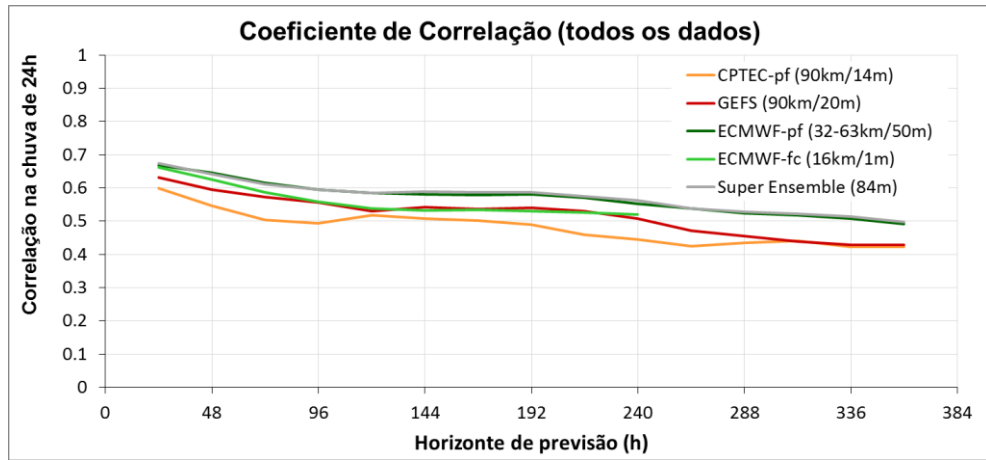


Figura 90. Resultados de correlação na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins.

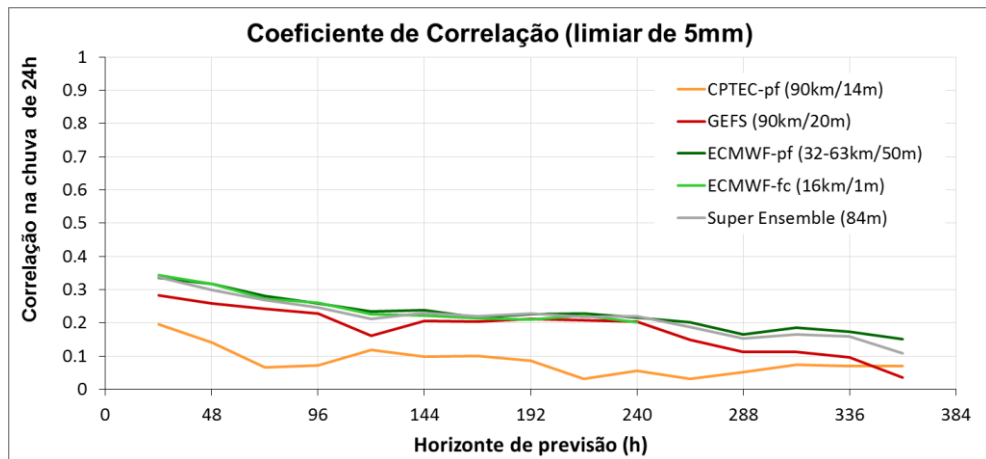


Figura 91. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.

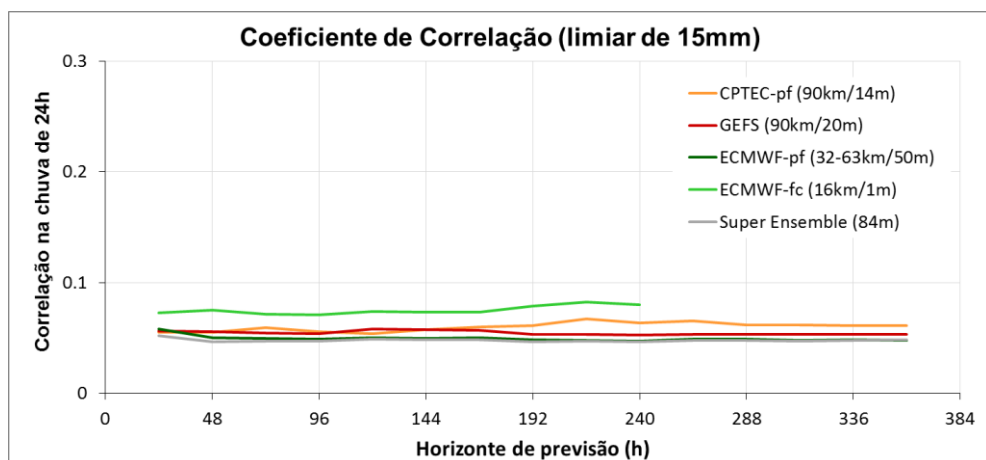


Figura 92. Resultados de correlação na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.

### 6.3.5. CRPS Médio

Os resultados obtidos de CRPS Médio para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 93, Figura 94 e na Figura 95.

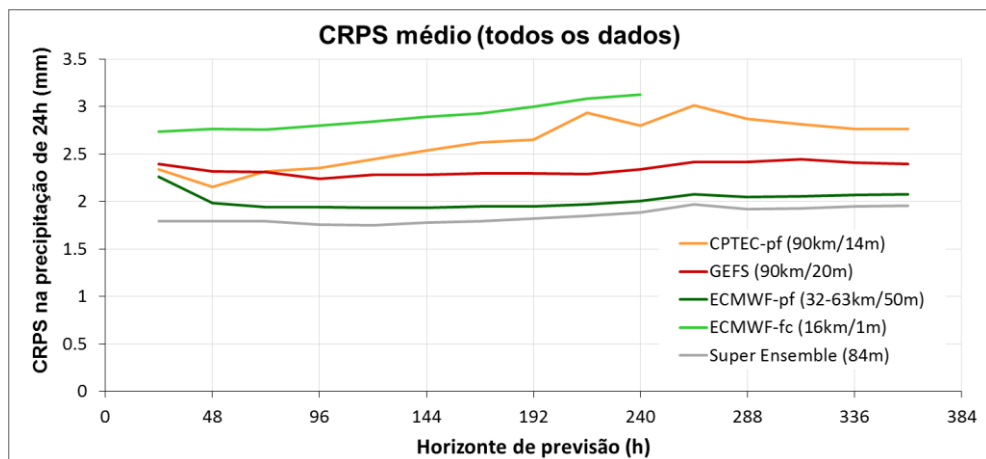


Figura 93. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com todos os dados para a bacia do Rio Tocantins.

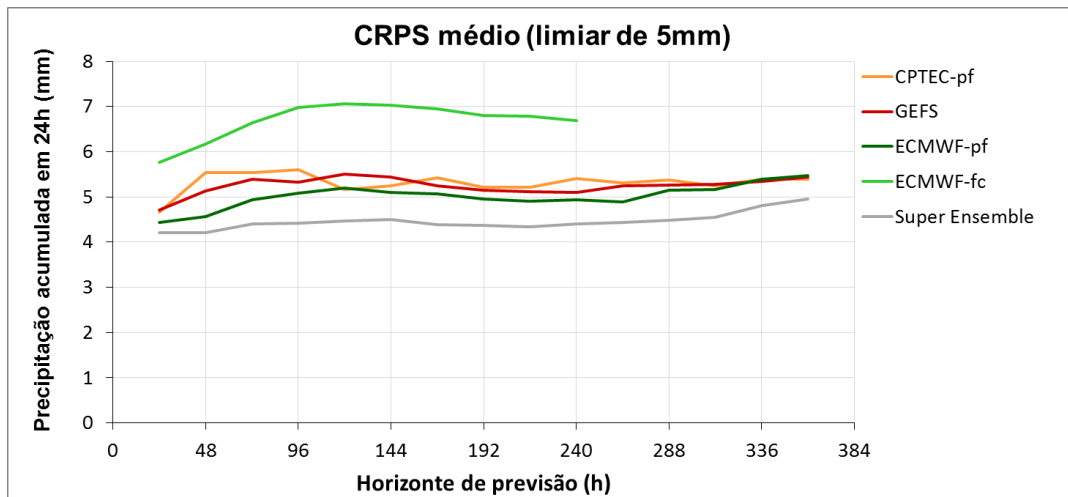
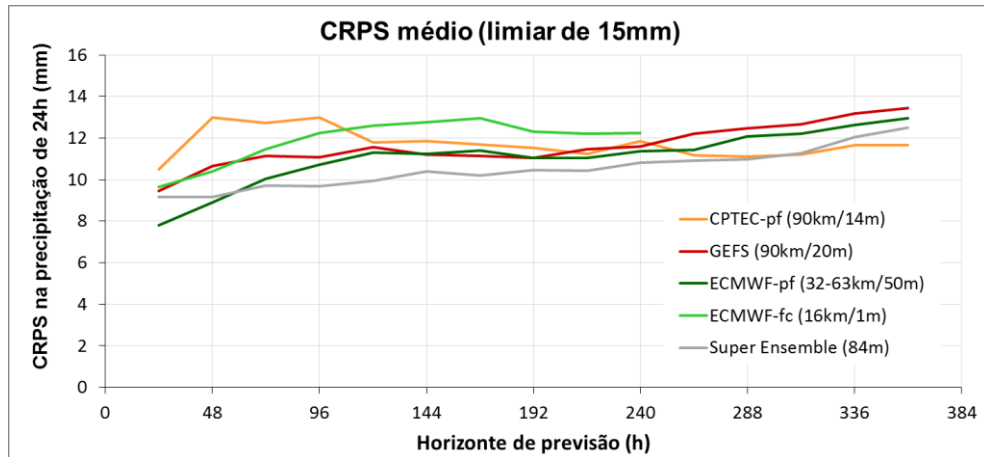


Figura 94. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.





**Figura 95. Resultados de CRPS médio na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.**

Para a análise com todos os dados o CPTEC-pf em geral apresentou desempenho inferior aos demais EPS, onde os erros variaram entre 2,3mm e 2,8mm. Na análise com limiar de 5mm todos os EPS apresentaram resultados similares mostrando valores de CRPS médio entre 4,5mm e 5,5mm. E na análise com limiar de 15mm todos os resultados foram similares (em torno de 12mm) nos horizontes de previsão intermediários (120h a 240h), mas o CPTEC-pf apresentou erros maiores nos primeiros horizontes de previsão, e menores nos últimos em comparação com os demais EPS.

Na análise do CRPS médio considerando todos os dados o GEFS apresentou um desempenho intermediário em comparação com os outros dois EPS, com erros em torno de 2,4mm. Considerando o limiar de 5mm os erros das previsões foram similares aos demais EPS, com CRPS médio entre 4,5mm e 5,5mm. Já para o limiar de 15mm os erros variaram entre 10mm a até aproximadamente 13,5mm ao longo dos horizontes de previsão, em desempenho também similar aos demais EPS.

Os resultados do ECMWF-pf, indicaram que ele foi o melhor EPS em termos de CRPS médio para a análise com todos os dados, onde os erros se situaram em torno de 2mm. Para o limiar de 5mm os seus resultados foram similares ao GEFS e ao CPTEC-pf. Já para o limiar de 15mm o CRPS médio variou entre 8mm e 13mm., mostrando resultados ligeiramente melhores que os demais EPS nos primeiros horizontes de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, ele mostrou um desempenho em geral melhor que os demais EPS, com valores de CRPS médio mais baixos que os modelos na maioria dos horizontes de previsão nas três análises. Assim como para outras análises, aqui se acredita que

este desempenho também acontece em função dos diferentes tipos de erros existentes no EPS, que ao serem combinados acabam se compensando.

Para a previsão determinística (ECMWF-fc), o CRPS médio é equivalente ao EMA. Ou seja, para a análise com todos os dados os erros variaram entre 2,7mm e 3mm, para o limiar de 5mm os erros foram de 5,8mm até 7mm, e para o limiar maior (15mm) os erros variaram entre 10mm a até 12mm ao longo dos horizontes de previsão de 240h. Nestes casos, (com exceção das primeiras antecedências do CPTEC-pf na análise com limiar de 15mm), os resultados da previsão determinística foram sempre inferiores aos resultados dos EPS, indicando vantagens no uso da previsão por ensemble.

### 6.3.6. Rank Histograms

Os Rank Histograms obtidos neste trabalho para cada um dos EPS usados e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 96 e na Figura 97. Dado o número diferente de membros entre os EPS avaliados, os Rank Histograms foram montados reamostrando os dados dos EPS em 10 classes cada, para que os mesmos sejam comparáveis. Os histogramas não foram computados para a análise com todos os dados, por que não existe a possibilidade de chuva menor do que zero. Ou seja, não existe espalhamento abaixo da observação para chuvas observadas nulas, o que automaticamente sempre gera histogramas em forma de “L invertido” com pouco significado para os resultados.

Para o menor limiar utilizado (5mm) nos horizontes de previsão todos os EPS apresentaram um histograma crescente na direção da maior classe, indicando um viés negativo, que é mais marcante nos maiores horizontes de previsão.

Já para a análise com o limiar de 15mm, todos os EPS apresentaram histogramas em forma de “L invertido”, com maiores frequências dentro das maiores classes. Isto indica que todos os modelos sofrem com viés negativo nas maiores chuvas, chegando a frequências de mais de 70% em praticamente todos os horizontes de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que a agregação de todos os membros do conjunto resulta em um histograma com frequências intermediárias se comparadas aos EPS que o compõem.

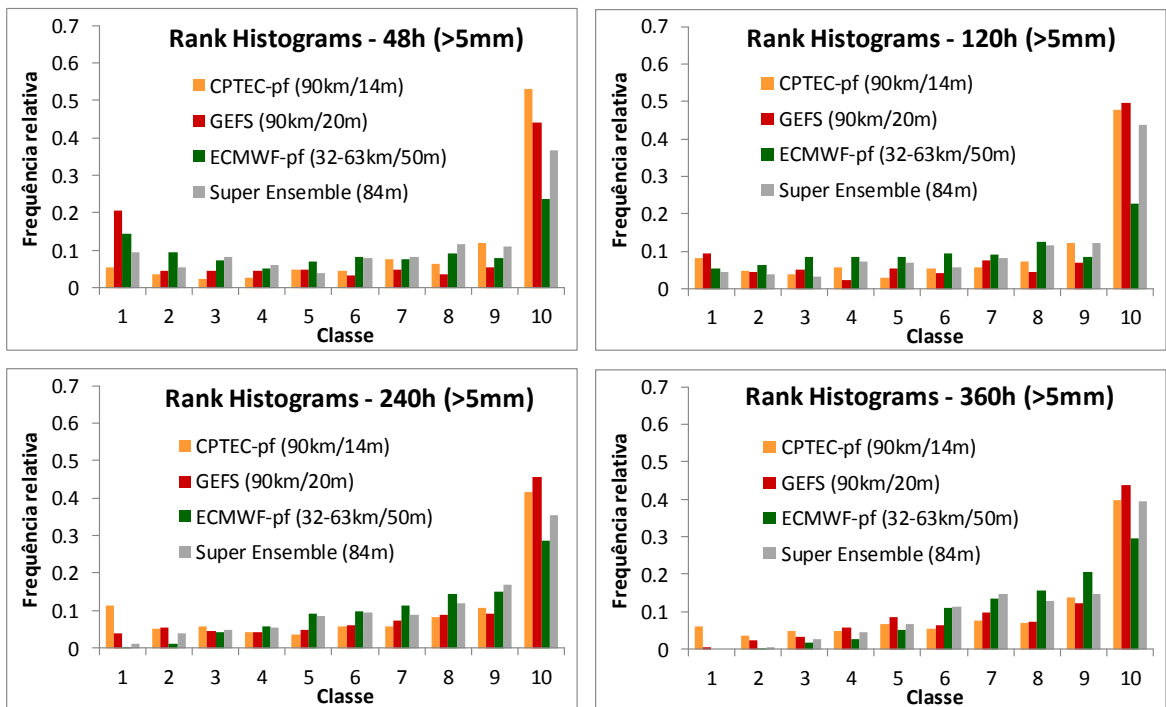


Figura 96. Rank Histograms com limiar de 5mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

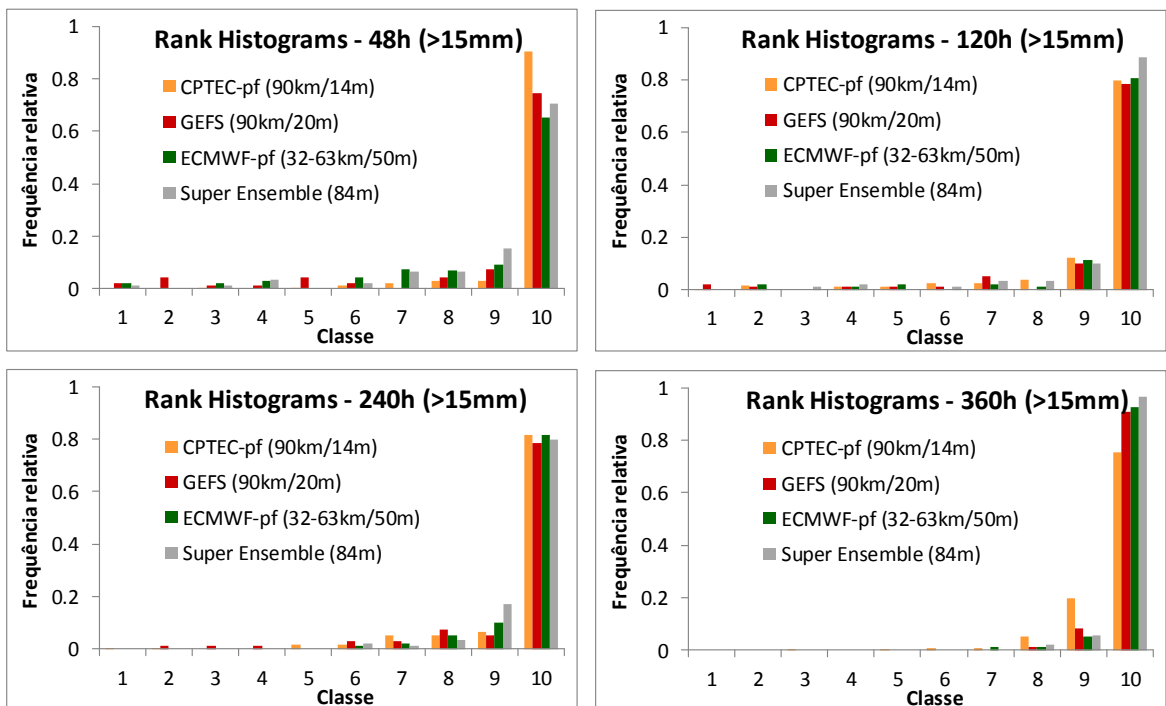


Figura 97. Rank Histograms com limiar de 15mm da análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.

### 6.3.7. Brier Score (BS)

Os resultados de BSS para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 98 e na Figura 99.

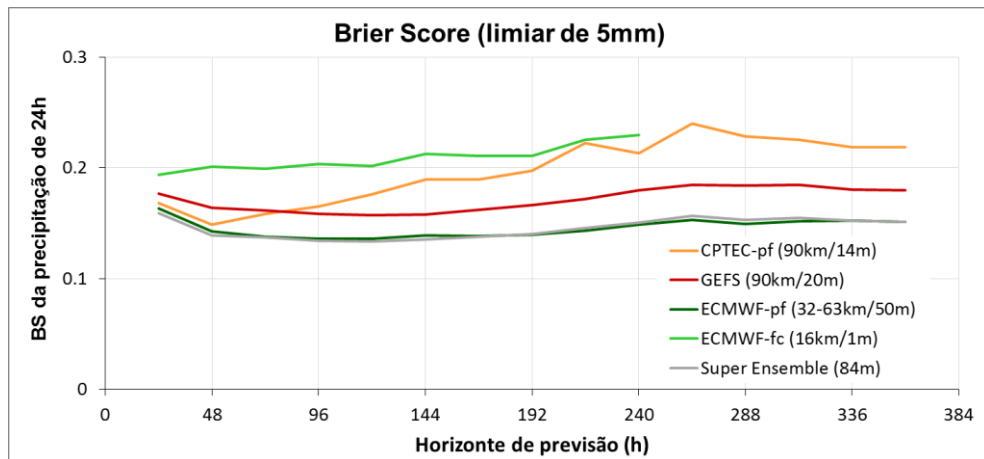


Figura 98. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 5mm para a bacia do Rio Tocantins.

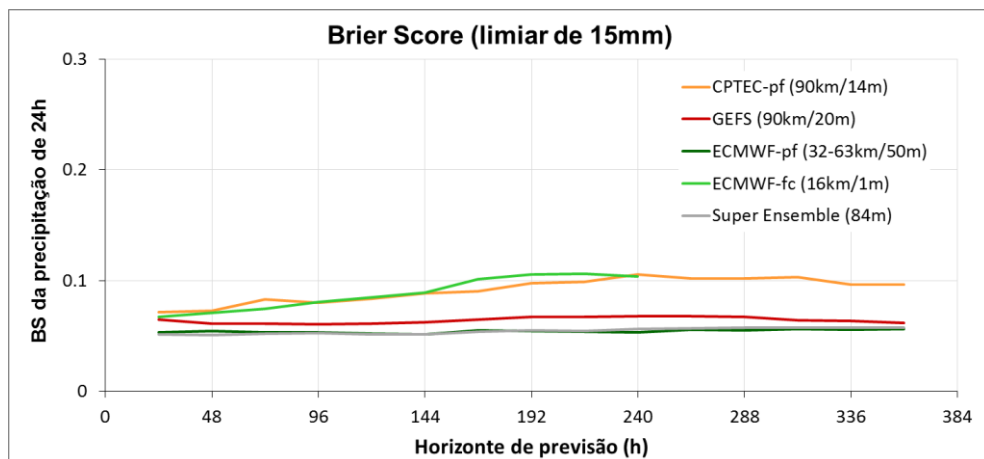


Figura 99. Resultados de BS na análise de precipitação com limiar de 15mm para a bacia do Rio Tocantins.

Nesta análise de BS o CPTEC-pf apresentou geralmente desempenho um pouco inferior aos demais modelos. Os resultados do CPTEC-pf se situaram em torno de 0,15 a 0,23 para o limiar de 5mm. Para os limiares de 15mm o CPTEC-pf apresentou desempenho entre 0,08 a 0,1 ao longo do horizonte de previsão.

O GEFS apresentou desempenho ligeiramente melhor que o CPTEC-pf, e próximo ao ECMWF-pf. Os valores situaram-se em torno de 0,18 para o limiar de 5mm, e em torno de 0,06 para o limiar de 15mm.

O ECMWF-pf foi o EPS que apresentou melhor desempenho em termos de Brier Score. Os valores se situaram em torno de 0,15 para o menor limiar (5mm), e em torno de 0,05 para o maior limiar (15mm) ao longo de todo o horizonte de previsão.

Em relação ao Super Ensemble, foram praticamente idênticos aos resultados do ECMWF-pf, que obteve melhor desempenho na análise e também é o modelo com maior número de membros (exerce mais influência no conjunto).

A previsão determinística de referência (ECMWF-fc) apresentou desempenho inferior aos demais EPS na análise com limiar de 5mm, e apresentou geralmente desempenho inferior ao ECMWF-pf e ao GEFS, e similar ao CPTEC-pf, para a análise com limiar de 15mm. Para o menor limiar os seus valores ficaram entre 0,2 e 0,23 dentro do horizonte de previsão de 240h, e para o maior limiar seus valores ficaram entre 0,06 e 0,1.

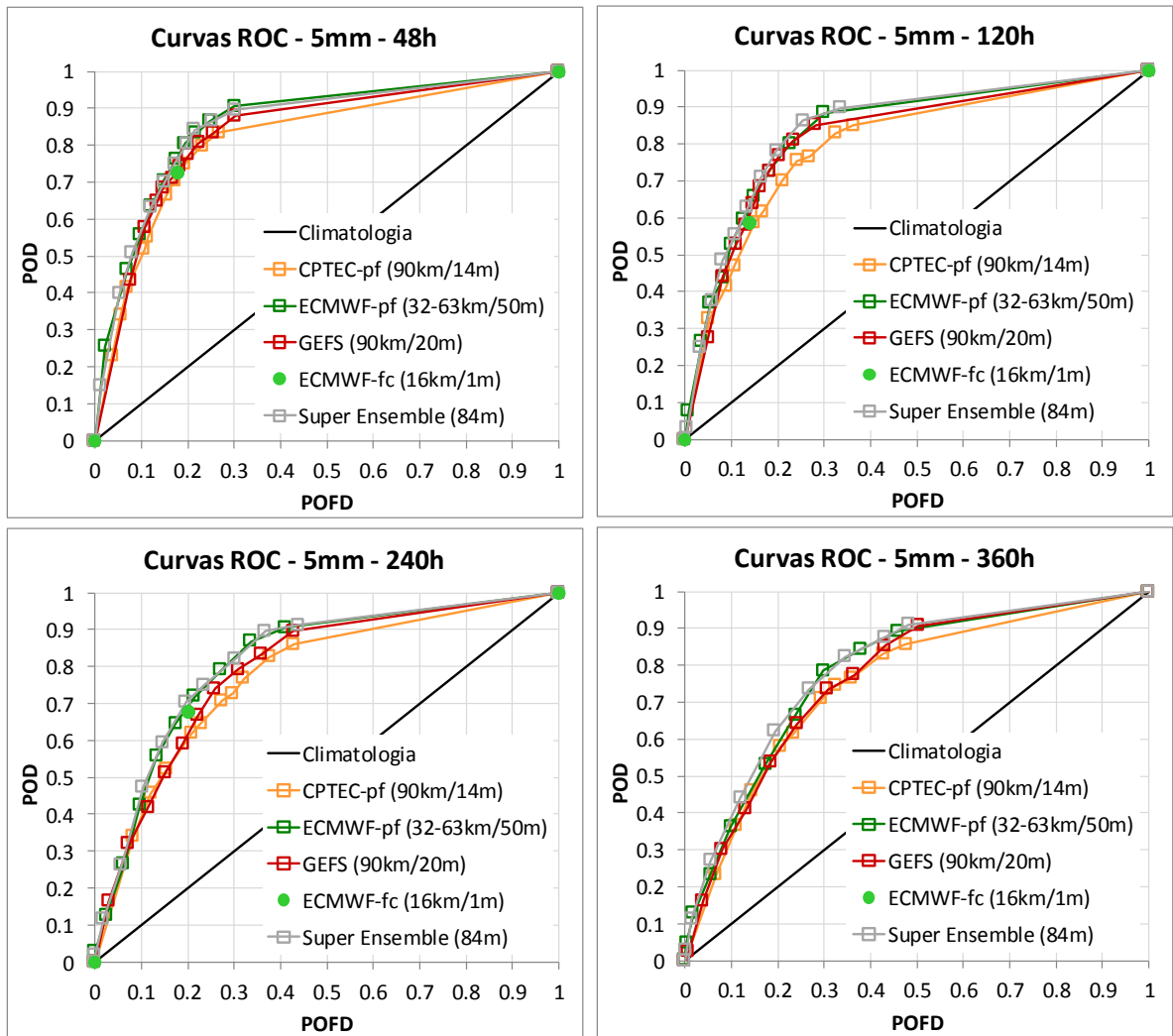
### 6.3.8. Diagramas ROC

O diagrama ROC é a segunda estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados de chuva para a bacia do Tocantins. Assim como o BS, ela foi computada para a detecção da ultrapassagem dos limiares de 5mm e 15mm.

Os resultados de diagramas ROC para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 100 e na Figura 101.

As curvas ROC de todos os EPS e do Super Ensemble podem ser consideradas similares para o limiar de 5mm. Em termos de valores, os percentis superiores do CPTEC-pf indicaram que é possível obter PODs acima de 0,8 para POFDs que entre 0,2-0,3 (48h) até 0,4-0,5 (360h).

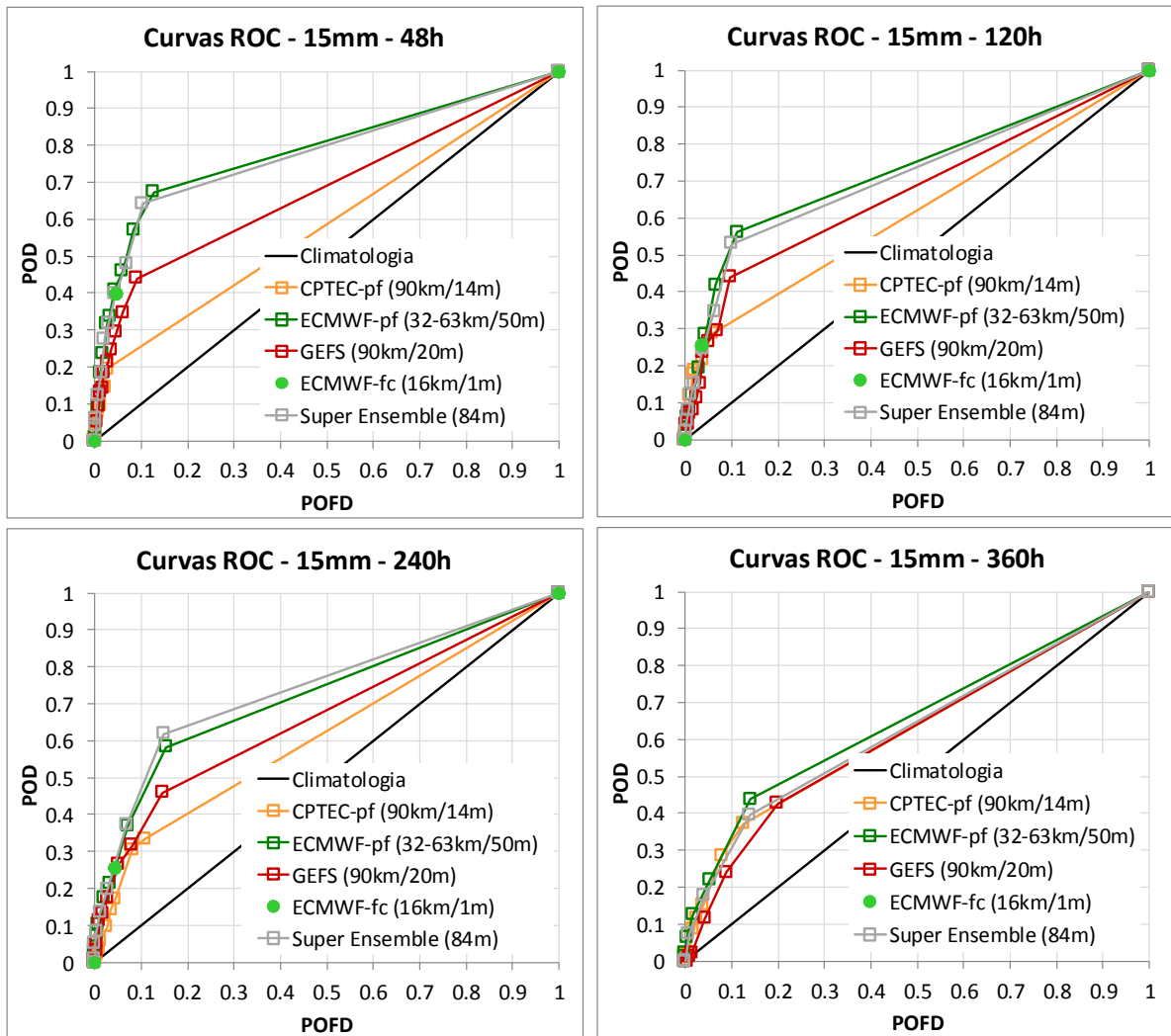
Para a análise com limiar de 15mm o CPTEC-pf apresentou curvas formadas pelos seus pontos posicionadas mais longe do ponto considerado ideal ( $POD=1$  e  $POFD=0$ ) do que os demais modelos. Em termos de valores, o percentil superior do CPTEC-pf para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo 0,32 e uma POFD em torno 0,1.



**Figura 100. Resultados das curvas ROC com limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.**

O GEFS para a análise com limiar de 15mm pode ser considerado com desempenho intermediário entre os demais EPS. Em termos de valores, o percentil superior do GEFS para a antecedência de 240h indicou, por exemplo, um POD próximo a 0,45 e uma POFD em torno 0,15.

As curvas ROC dadas pelos pontos do ECMWF-pf apresentaram o melhor desempenho entre os três EPS testados na análise de 15mm, onde seu percentil superior indicou POD na ordem de 0,6 para uma faixa de alarmes falsos (POFD) em torno de 0,15 na antecedência de 240h, por exemplo. Esta foi a POD mais alta detectada entre os EPS neste horizonte de previsão.



**Figura 101. Resultados das curvas ROC com limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Doce.**

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram geralmente curvas próximas das curvas do ECMWF-pf, que foi o EPS com melhor desempenho geral nas análises. Isto foi constatado para todos os horizontes e limiares testados.

Já a previsão determinística de referência (ECMWF-fc), que é mostrada como um ponto verde nos diagramas, apresentou um desempenho que pode ser considerado sempre pior que os ensembles, para todos os horizontes de previsão e limiares quando consideramos os limiares superiores das previsões por ensemble. Isto por que praticamente em todas as análises os resultados indicam que é possível obter POD melhores ou iguais utilizando os limiares superiores das previsões por conjunto para a mesma dada POFD do ECMWF-fc.

### 6.3.9. *Reliability Diagrams*

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo I das previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades. É válido lembrar que o viés condicional tipo I é uma medida diferente do viés. O viés simples é dado pelo grau de correspondência entre as médias das observações e das previsões, e já o viés condicional tipo I é dado pelo grau de correspondência entre as probabilidades das previsões e as frequências de observações verificadas para estas probabilidades.

Os *Reliability Diagrams* para cada um dos EPS usados e o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 102 e na Figura 103. Os diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf apresentaram em geral um comportamento relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais observadas correspondentes. Considerando o limiar de 5mm, por exemplo, quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,95 os eventos foram observados com frequências de 0,49 no horizonte de 360h. Para o limiar de 15mm os resultados de viés condicional positivo foram mais expressivos, onde para a antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,71 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,25.

Em relação a contagem de amostras do CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) novamente foi expressivamente maior que para as demais classes. O número foi sempre maior que 1000, enquanto que nas demais classes o número de amostras se manteve entre 1000 e 100. Especialmente nos horizontes maiores. Na análise de 15mm o número de amostras nas classes elevadas para a antecedência de 360h foi pequeno.



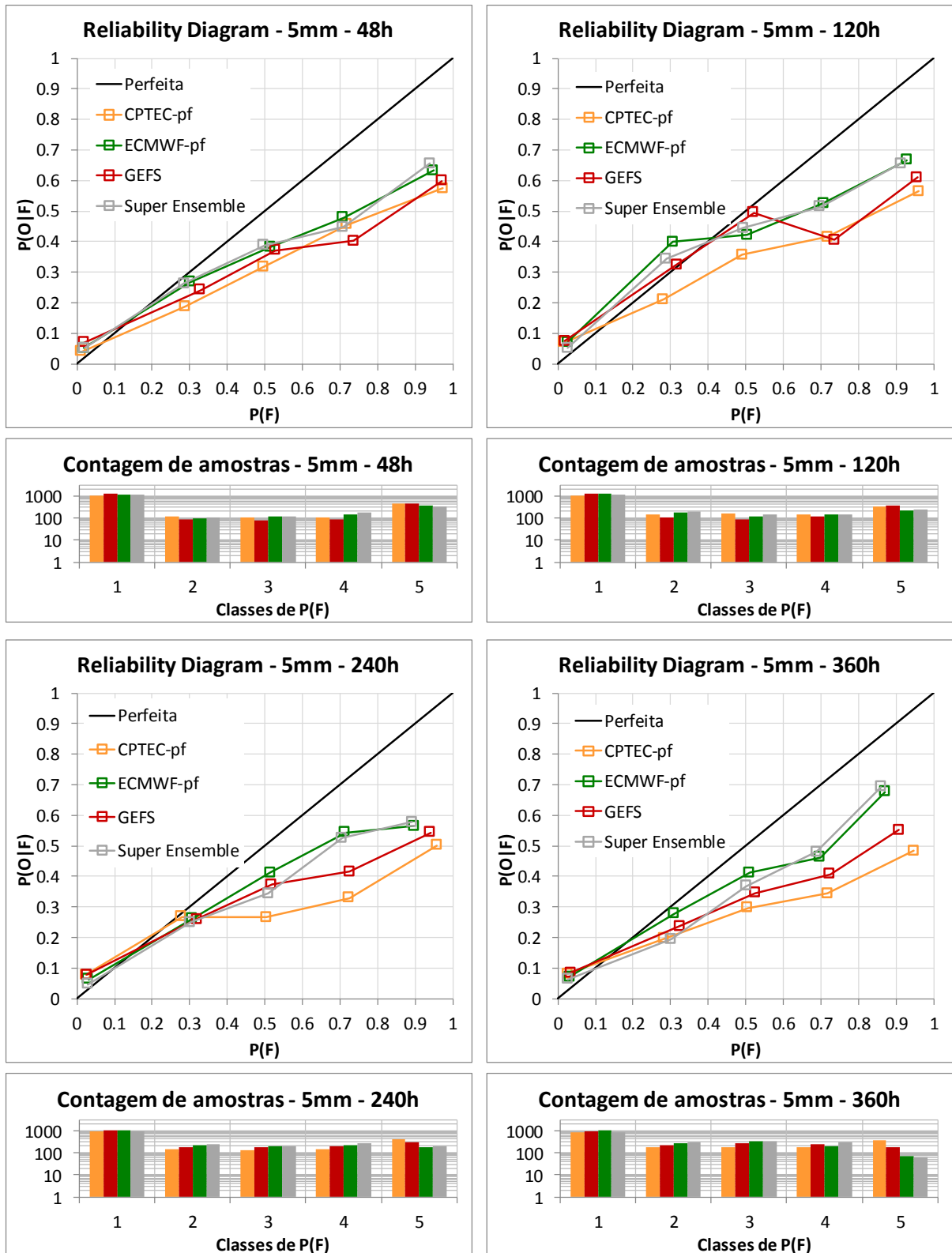


Figura 102. Reliability Diagram para o limiar de 5mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.

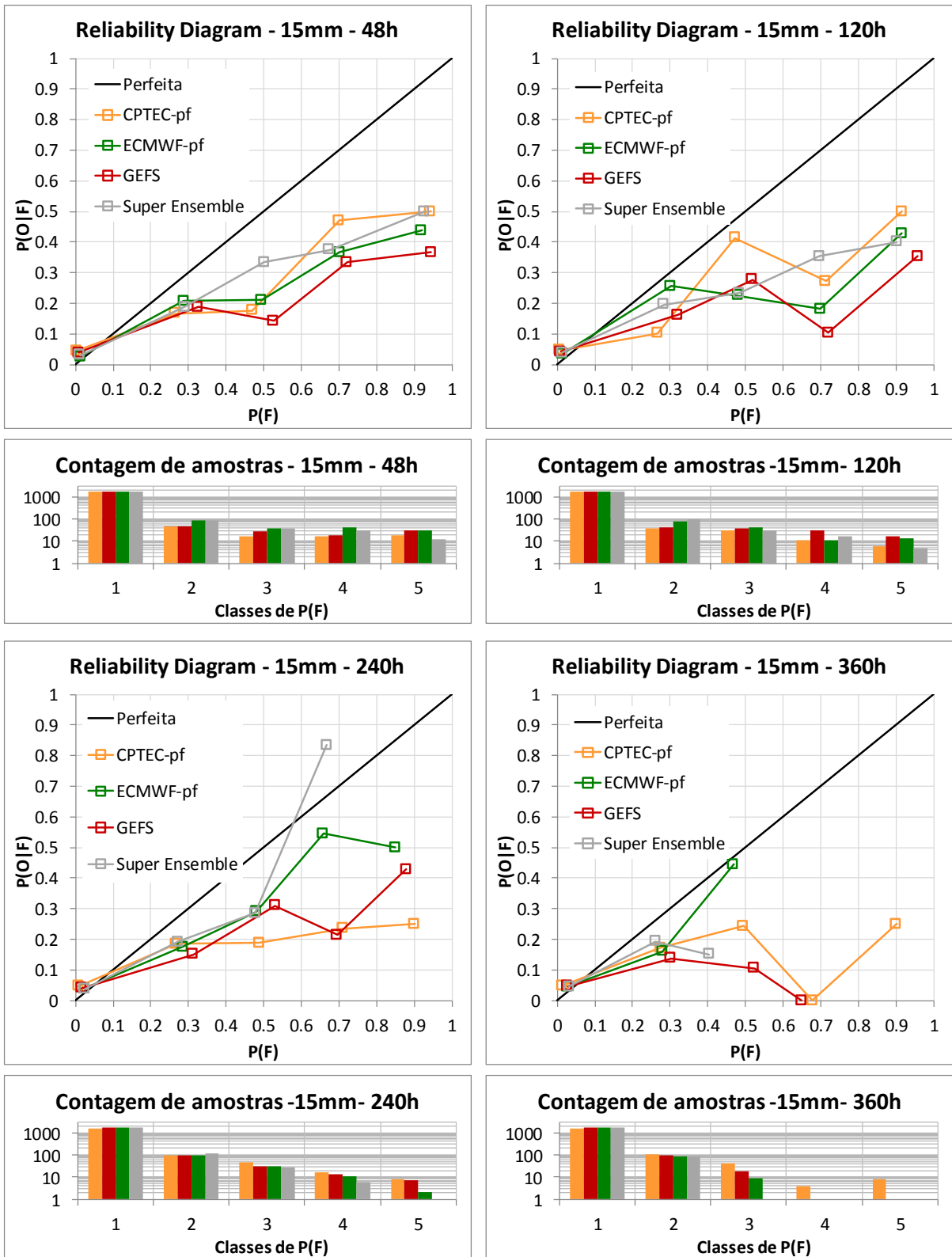


Figura 103. Reliability Diagram para o limiar de 15mm na análise de precipitação para a bacia do Rio Tocantins.

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões. Como exemplo, no horizonte de previsão de 360h para o limiar de 5mm as previsões indicaram probabilidades de ocorrências maiores que 0,9 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,55. Para o limiar de 15mm e antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,7 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,2.

Em relação a contagem de amostras do GEFS, assim como para o CPTEF-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi maior (sempre entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 500). Especialmente na antecedência de 360h e limiar de 15mm ocorreu um número nulo de amostras nas classes mais altas.

A função de calibração do ECMWF-pf pode ser considerada a melhor de todas entre os EPS para ambas a análise de 5mm, por estar mais próxima da linha de quarenta e cinco graus. Apesar de os resultados também indicarem um viés condicional tipo I positivo. Como exemplo, no horizonte de previsão de 360h para o limiar de 5mm as previsões indicaram probabilidades de ocorrências maiores que 0,88 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,69. Para o limiar de 15mm e antecedência de 240h as previsões indicaram ocorrências de probabilidades de 0,65 e os eventos foram observados com frequência relativa em torno de 0,55.

Em relação a contagem de amostras do ECMWF-pf, assim como nos demais EPS o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi maior (sempre entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 500). O ECMWF-pf também apresentou falta de amostras nas maiores classes dos maiores horizontes para a análise de 15mm. Com isso, as estatísticas não puderam ser calculadas de forma correta nestes locais. Estas faltas de amostras podem estar relacionadas com o viés negativo verificado em outras métricas.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram resultados em geral similares aos do ECMWF-pf na análise de 5mm, e intermediárias entre os modelos na análise de 15mm.

### 6.3.10. Resumo e discussão dos resultados de chuva para a bacia do Rio Tocantins

Os principais resultados encontrados para as análises de chuva para o a bacia do Rio Tocantins podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros médios absolutos do ECMWF-pf foram em geral os menores para as análises com todos os dados. Nas demais análises os resultados foram parecidos entre os EPS. Com uma exceção para o comportamento do CPTEC-pf na análise de 15mm, que apresentou erros maiores nas menores antecedências e menores nas maiores. O Super Ensemble não se destacou em relação aos demais EPS. E a previsão determinística também não apresentou diferenças notáveis.
- Para o EMR, na análise com todos os dados o viés foi positivo, provavelmente causado por previsões de chuva quando a ocorrência é próxima de zero. Já os resultados de análises com limiares mostraram um viés negativo, próximo de -0,5, em todos os dados testados e em todas as antecedências de previsão.
- O coeficiente de correlação mostrou desempenho similar entre todos os modelos. E especialmente para a análise com limiar de 15mm os resultados apresentaram correlações baixas em todas as antecedências. Isto indica que para chuvas maiores todos os modelos podem apresentar limitações na representação.
- Os resultados de CRPS médio foram muito similares aos resultados de EMA. Porém neste caso o Super Ensemble se destacou com resultados melhores que os EPS individualmente, sugerindo benefício na comparação com os EPS individualmente.
- O Rank Histogram indicou um formato predominante de existência de um viés negativo nas precipitações. Sendo este viés mais expressivo na análise com limiar de 15mm. Corroborando os resultados obtidos de correlação e erros médios.
- A análise de BS indicou a seguinte ordem de desempenho entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que a da previsão determinística apresentou um desempenho geralmente inferior ao das probabilísticas do ECMWF-pf e do GEFS em todo o horizonte de previsão, e similar ou superior ao do CPTEC-pf. Já na comparação com o Super Ensemble os resultados foram muito similares ao ECMWF-pf, que é o EPS com mais membros.

- A análise das curvas ROC indicou um desempenho muito similar, com uma pequena vantagem do ECMWF-pf e do Super Ensemble, na detecção do limiar de 5mm. Na detecção do limiar de 15mm verificou-se um desempenho superior dos percentis superiores do ECMWF-pf. E na comparação com a previsão determinística os limiares superiores das previsões por conjunto sempre se sobressaíram.
- Na análise dos Reliability Diagrams os resultados apontaram para uma tendência geral dos modelos de mostrar um viés condicional do tipo I positivos. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais correspondentes observadas. E o resultado entre todos os modelos foi similar, inclusive na falta de amostras para a análise considerando o maior limiar nos maiores horizonts de previsão, o que compactua com o seu viés negativo observado em outras métricas.
- Sobre os resultados é importante considerar que todos eles foram calculados com um número limitado de amostras, especialmente os resultados com maior limiar. Assim, é importante considerar que algumas das pequenas diferenças registradas podem ser apenas devidas a questões amostrais. Por este motivo, quando as linhas das métricas estavam muito próximas evitou-se uma comparação mais rígida entre os modelos.

Traçando um panorama das previsões de chuva na bacia do rio Tocantins a partir das métricas de qualidade, pode-se dizer que as previsões dos EPS possuem em geral um viés negativo. E este viés tende a aumentar um pouco com o horizonte de previsão. Mas o maior aumento se dá efetivamente quando são consideradas as maiores chuvas. Ou seja, quanto maior a chuva observada, maior foi o viés.

Considerando o desempenho dos EPS, é possível dizer que o ECMWF-pf se destacou de forma positiva em comparação com os outros EPS. E que o CPTEC-pf teve o desempenho um pouco pior. Ainda sobre o ECMWF-pf, apesar do seu viés negativo, o resultado dado por métricas como os diagramas ROC e o BS sugerem que os seus membros superiores conseguem captar com alguma destreza a ocorrência de eventos.

Em relação à calibração dos ensembles, as probabilidades das previsões não se mostraram propriamente calibradas, contendo um viés condicional de superestimativa das probabilidades de ocorrência em relação as frequências relativas observadas. Isto sugere que o uso do espalhamento do conjunto como uma inferência sobre a incerteza do futuro é prejudicada.

No quesito de comparação determinística versus probabilística muitas, em alguns casos foi verificado desempenho da previsão determinística similar ao das previsões probabilísticas, principalmente nas análises que consideram apenas a média do conjunto. Mas, para as métricas de qualidade que consideram todo o conjunto (CRPS, BS Curvas ROC), a previsão determinística foi sempre pior que os ensembles (com exceção do CPTEC-pf em alguns casos). Isto é um indício de que o uso somente da média do conjunto pode não ser um grande benefício, mas o uso da informação completa do conjunto pode.

Sobre as questões de resolução espacial e do número de membros no conjunto, assim como nas duas bacias avaliadas anteriormente, o ECMWF-pf possui maior resolução e maior número de membros, e é possível que estes fatores sejam benéficos para o desempenho. Também, o ECMWF-fc possui maior resolução espacial do que todos os demais modelos, mas nem sempre ele é o melhor modelo, pois não é uma previsão por conjunto. Especialmente na comparação com o ECMWF-fc. Isto sugere que existe um benefício do sacrifício de resolução espacial em contrapartida de que o modelo seja rodado várias vezes para formar o conjunto.

Na análise de composição do Super Ensemble verificou-se na maioria das métricas resultados similares com o ECMWF-pf, que é o ensemble com mais membros. Assim, não é possível dizer que existiu um benefício claro na composição do Super Ensemble.

## 7. Resultados das Análises de Vazão

As análises de vazão para as bacias hidrográficas de interesse foram feitas para um ponto específico, coincidente com um local onde existem dados de vazão observados. No caso deste trabalho, foram selecionadas as vazões afluentes das usinas hidrelétricas posicionadas nas bacias de estudo de caso, onde a previsão de vazão tem como finalidade auxiliar na tomada de decisão para a operação dos reservatórios.

Para a realização das análises de ultrapassagem de limiar foram selecionados limiares de vazão, relacionados com limiares de cheia de interesse para a operação dos reservatórios.

Além das previsões dadas pelos EPS e pela previsão determinística de referência, também foram avaliados os resultados para previsões feitas com chuva observada (chamadas de “previsões perfeitas”), usada na comparação dos resultados. Ou seja, foram usadas duas previsões como referência: a previsão determinística do ECMWF-fc e a previsão com chuva observada.

Para as métricas *Rank Histogram*, *ROC Curves*, e *Reliability Diagrams*, que resultam em um gráfico para cada um dos horizontes de previsão, foram escolhidas quatro antecedências para a apresentação dos resultados: 48h (2 dias), 120h (5 dias), 240h (10 dias), e 360h (15 dias).

Os resultados das análises de previsão de vazão, para cada uma das bacias hidrográficas estudadas, são apresentados a seguir.

### 7.1. Bacia do Alto São Francisco

Para a bacia do Alto São Francisco foram usados dois limiares de vazão para o cálculo das métricas de desempenho, principalmente as métricas relacionadas com a ultrapassagem de limiares. Os valores escolhidos foram  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ .

O valor de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  foi escolhido por que representa aproximadamente a vazão  $Q_{10}$  da curva de permanência da vazão afluente a UHE. Este é um valor relativamente alto de vazão que indica o início de uma situação de cheia na bacia e, portanto, usado na operação do reservatório como uma medida de necessidade de atenção na operação.

Este valor foi usado nas análises tanto para as métricas de ultrapassagem de detecção de eventos discretos, quando para as demais métricas de qualidade da previsão. Nestes últimos casos o limite foi usado visando considerar nos cálculos apenas o desempenho para altas vazões observadas, excluindo da medida de desempenho os longos períodos de recessão

do hidrograma onde geralmente as previsões de chuva são iguais a zero e os resultados são puramente dependentes de observações e do modelo hidrológico.

Já o valor de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  corresponde a um valor adotado pela CEMIG como um limiar de interesse no controle da operação da UHE, pois a vazão defluente de  $2000\text{m}^3/\text{s}$  já pode causar transtornos a jusante, e cheias afluentes iguais ou maiores que  $2500\text{m}^3/\text{s}$  podem significar a necessidade da ultrapassagem deste limiar. Este limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  foi usado no cálculo de métricas relacionadas com eventos discretos.

Os resultados das análises de previsão de vazão para a Bacia do Alto São Francisco, para cada uma das métricas avaliadas, são apresentados a seguir.

### 7.1.1. Análises Visuais

Para a análise visual das previsões de vazões na bacia do Rio São Francisco foram escolhidos três entre as maiores cheias que ocorreram no período analisado e os seus hidrogramas previstos com alguns dias de antecedência foram graficados e analisados.

As seguintes previsões foram graficadas:

- 13/12/2008 00h
- 22/12/2010 00h
- 29/12/2011 12h

Foram analisadas as previsões para as seis fontes de dados de precipitação prevista consideradas neste trabalho: CPTEC-pf, GEFS, ECMWF-pf, Super Ensemble (combinação dos três EPS), ECMWF-fc (previsão determinística de referência), e chuva observada.

Na descrição das análises visuais foram levados em conta os seguintes aspectos nos hidrogramas:

- Capacidade de prever o pico da cheia;
- Erro da média e dos limites inferiores e superiores dos conjuntos;
- Capacidade de abranger as observações entre os membros dos conjuntos;
- Se a concentração de membros indicou as maiores probabilidades de ocorrência;
- Capacidade das previsões em discriminar a ultrapassagem de limiares ( $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ ).



A Figura 104 e a Figura 105 apresentam as previsões feitas no dia 13/12/2008 às 00h para o início da cheia afluyente a UHE Três Marias no período chuvoso de 2008/2009. Este foi um evento de cheia com rápida subida do hidrograma entre os dias 18 e 20 de Dezembro, onde a variação da vazão foi de cerca de 800m<sup>3</sup>/s a até 3500m<sup>3</sup>/s, se mantendo acima de 2000m<sup>3</sup>/s nos dias subsequentes devido às chuvas posteriores, com picos de até 4000m<sup>3</sup>/s.

Na previsão do CPTEC-pf o hidrograma mostra uma subida nas vazões, mas apenas com dois dos membros do conjunto apontando para a ocorrência de picos maiores que 3000m<sup>3</sup>/s. A subida da primeira grande cheia não é devidamente acompanhada pelas previsões ou pela média e a ultrapassagem do limiar de 1400m<sup>3</sup>/s é feita com antecedência pelo EPS. Mas a ultrapassagem do limiar de 2500m<sup>3</sup>/s é bem informada por alguns membros do conjunto. O espalhamento dos membros do conjunto compreende relativamente bem as observações até o início da cheia. Mas após o dia 20 de Dezembro a grande maioria dos membros e a média do CPTEC-pf indicam vazões baixas, sem continuidade do período de altas vazões.

Na previsão do GEFS o pico da cheia também é previsto com antecedência, incluindo a ultrapassagem dos dois limiares. A média do conjunto também indicou essa tendência, muito embora ela tenha subestimado as vazões. A incerteza da previsão foi grande, pois o espalhamento foi elevado, mas muitos membros do conjunto indicaram a ocorrência da cheia e o seu período húmido subsequente, compreendendo as observações dentro deste período.

O hidrograma do ECMWF-pf mostra alguns membros prevendo a cheia com antecedência. Todavia, a maior concentração de membros indicou a cheia muito próxima à data de sua ocorrência. Assim, muitos dos membros do ECMWF-pf mostraram a ultrapassagem dos limiares em dias mais próximos de sua real ocorrência, não sendo tão defasada quanto os modelos anteriores. A média do conjunto em geral subestimou o evento. Já os membros superiores da distribuição representaram a ocorrência da cheia e a continuidade do período chuvoso. Em termos de distribuição, os membros abrangeram bem as observações, mas o maior número de membros se concentrou abaixo das observações nos maiores horizontes, não indicando propriamente o que seriam as maiores probabilidades de ocorrência.

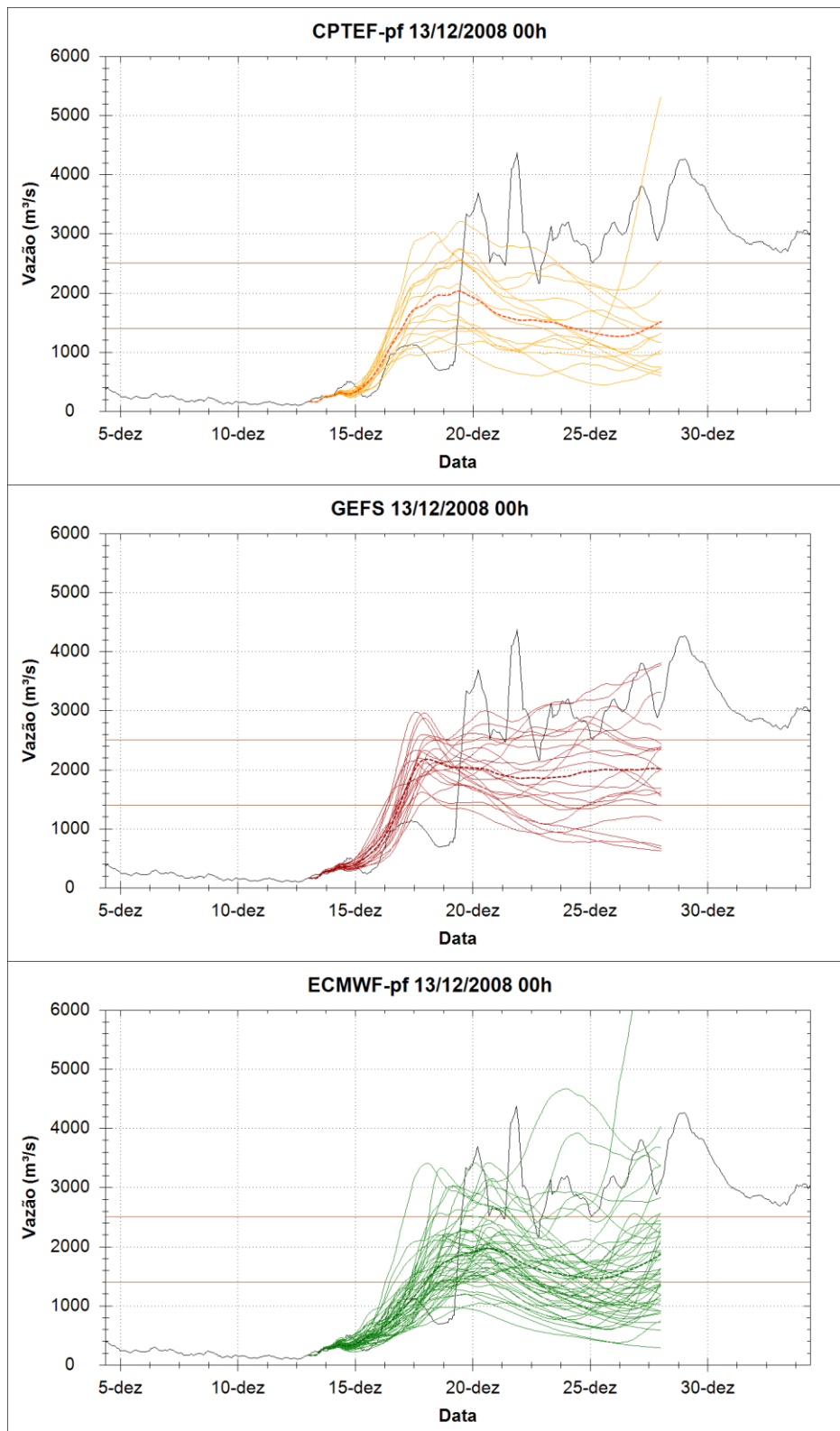
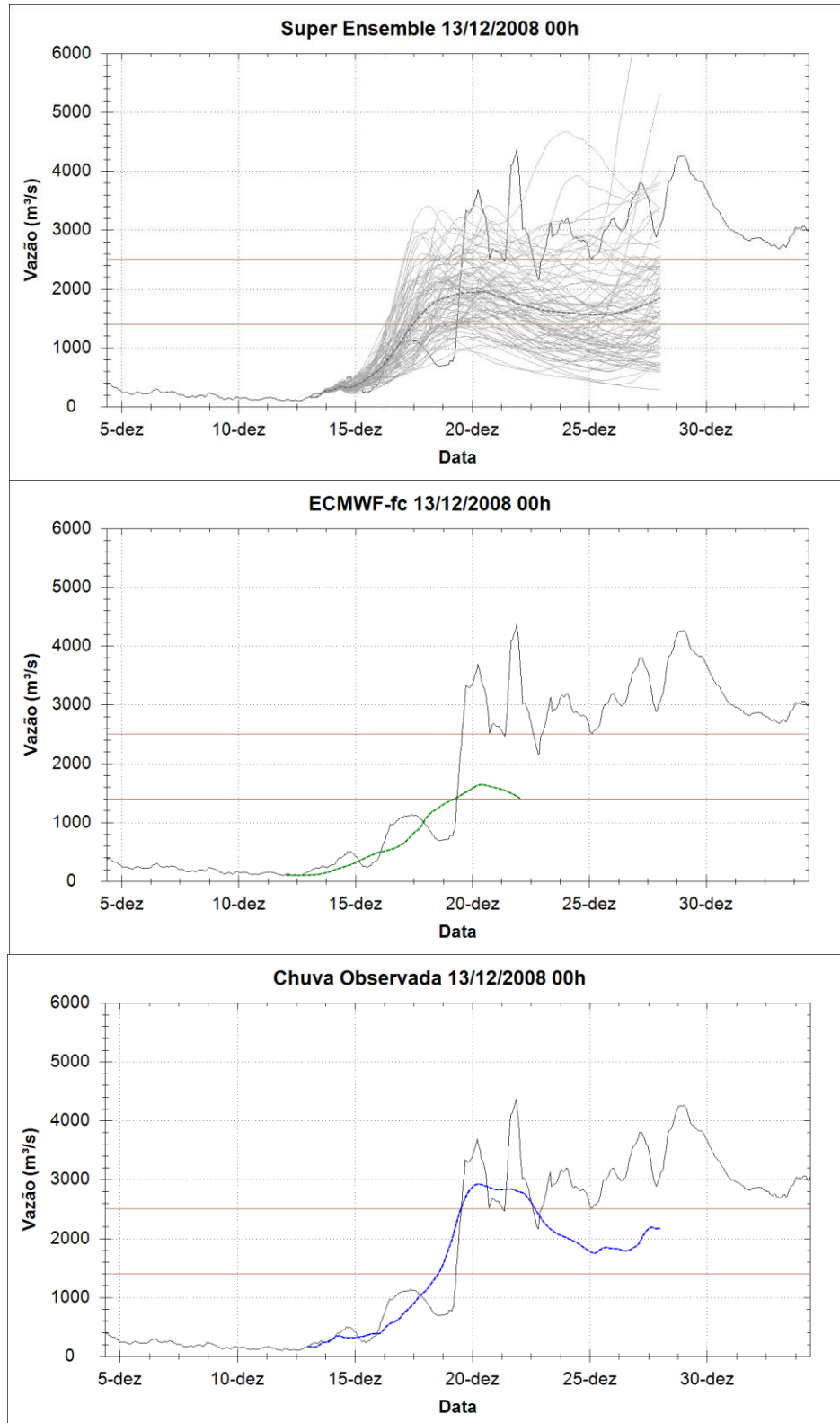


Figura 104. Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 13/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 105. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 13/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400m^3/s$  e  $2500m^3/s$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

O hidrograma do Super Ensemble mostra um conjunto onde o maior número de membros efetivamente se concentra em prognósticos de vazões mais baixas, assim como a média. Contudo, encontram-se dentro deste conjunto também alguns membros que indicaram a ocorrência do futuro de altas vazões e da cheia observada. A abrangência dos membros em relação às observações é boa, apesar da concentração abaixo das observações.

A previsão determinística de referência mostra uma ultrapassagem no momento certo do limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , mas as vazões subsequentes são baixas em comparação com as observações, não passando de  $2000\text{m}^3/\text{s}$  e assim subestimando a cheia prevista. Nesta comparação é possível afirmar que os ensembles, apesar de também subestimarem a cheia em relação a sua média (assim como a previsão determinística) e em termos de concentração de membros, deram indicativos de sua possível ocorrência. E isto não ocorreu com a previsão determinística.

Em relação a previsão com chuva perfeita, foi possível captar um pico de vazão que ultrapassa o limiar na data certa e com um pico próximo de  $3000\text{m}^3/\text{s}$  na data de ocorrência da primeira cheia da sequência. Contudo, nota-se também que o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  foi ultrapassado com certa antecedência em relação a sua ocorrência, e que o período úmido posterior a cheia é um pouco subestimado. Isto pode ocorrer em função da falta de chuvas observadas, ou indicar que parte do desempenho de subestimativa obtido com os EPS para os maiores horizontes está relacionada com incertezas na modelagem hidrológica.

A Figura 106e a Figura 107 apresentam as previsões feitas no dia 22/12/2010 às 00h para o início da cheia afluyente a UHE Três Marias no período chuvoso de 2010/2011. Este foi um evento de cheia que ocorreu entre os dias 2 e 4 de Janeiro de 2011, em que as vazões máximas chegaram perto de  $3000\text{m}^3/\text{s}$ .

O CPTEC-pf apresentou nesta previsão uma estimativa adiantada do pico da cheia, com alguns membros chegando a vazões de aproximadamente  $4500\text{m}^3/\text{s}$ , e a média chegando em  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . Com isto, a ultrapassagem do limiar superior foi também adiantada em relação à observação. Em termos de espalhamento do conjunto, os membros envolveram as observações dentro de suas incertezas e não existiu uma concentração de membros evidente.

O GEFS apresentou um desempenho da média e dos membros centrais do conjunto muito próximo aos valores observados, com uma vazão de pico entre  $3000\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , e a ultrapassagem dos limiares de cheia em datas próximas as observações. Todavia, vários membros do conjunto apresentaram vazões altas, chegando os limites superiores a  $5000\text{m}^3/\text{s}$ .

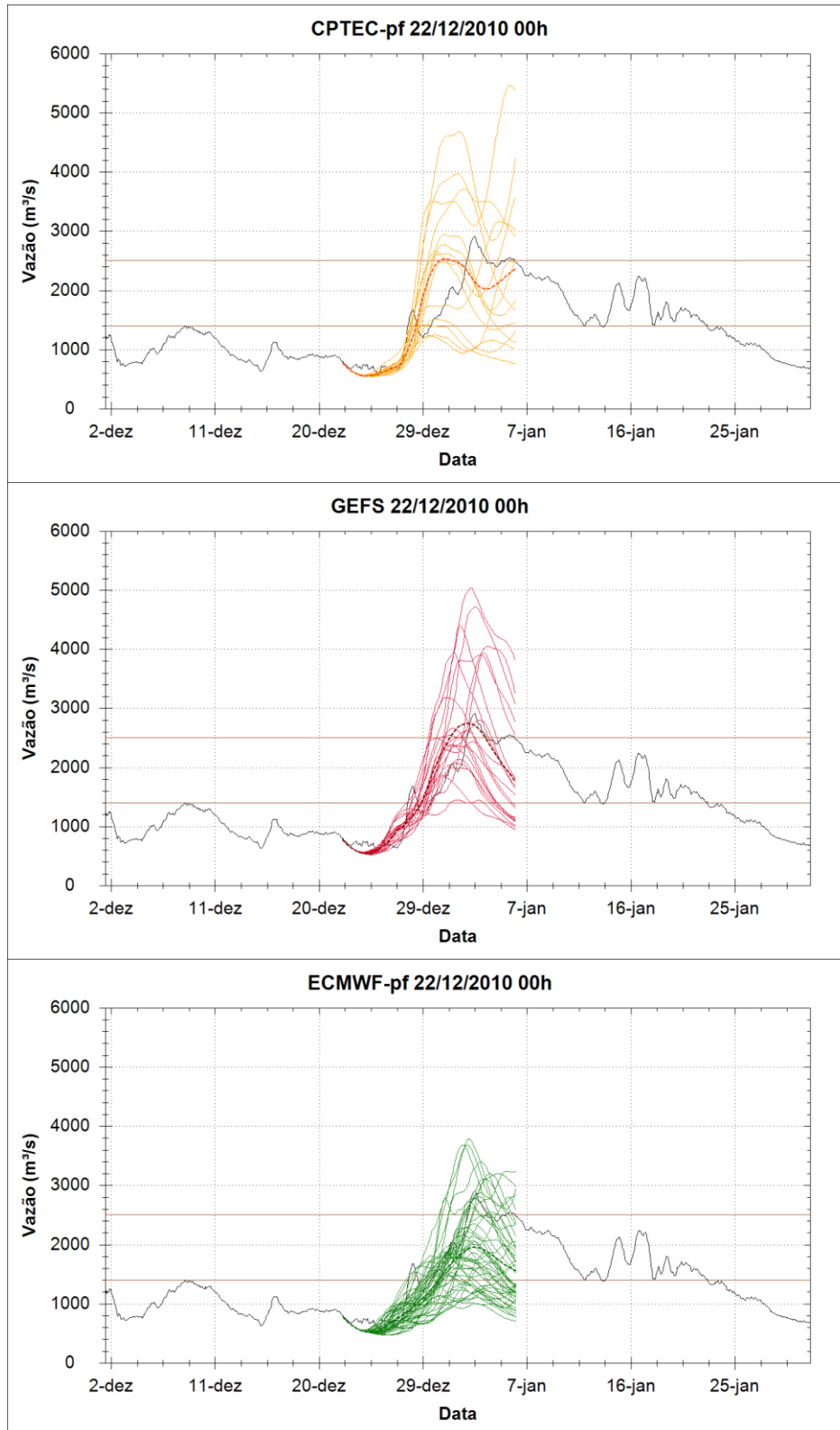
Em relação ao espalhamento, ele abrangeu bem as observações e a concentração de membros foi maior próxima do momento das ultrapassagens dos limiares.

O ECMWF-pf mostrou um desempenho que também pode ser considerado adequado para esta previsão, cobrindo bem as observações e com um espalhamento mais estreito que os demais EPS, onde as vazões máximas foram menores que 4000m<sup>3</sup>/s. Um bom número de membros indicou a ocorrência aproximada do pico da cheia. Todos os membros apresentaram um espalhamento próximo com grande pouca incerteza nos momentos de ultrapassagem dos limiares. Mas a média do conjunto ficou posicionada menor que a observação.

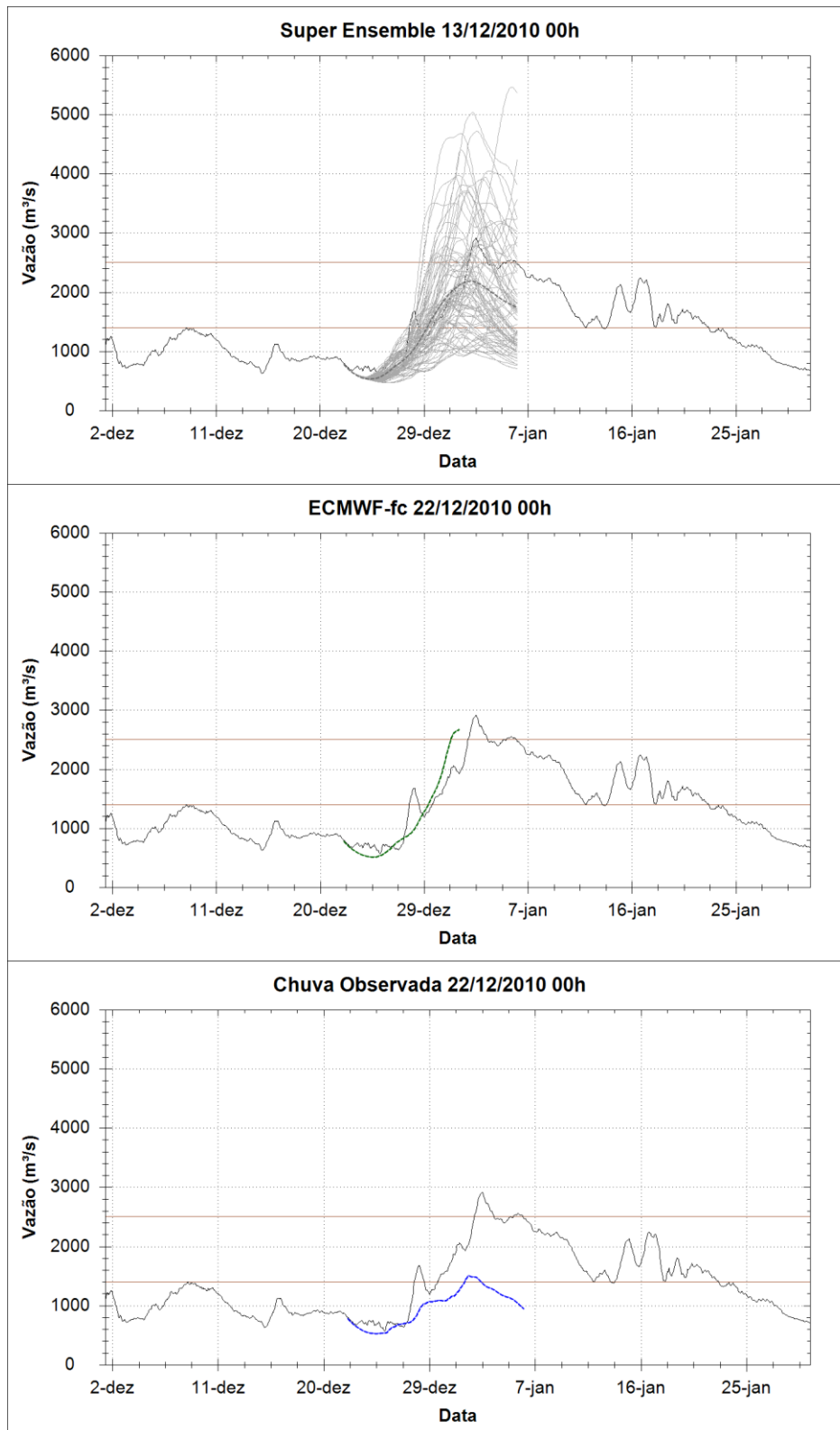
O Super Ensemble mostra em suas feições as contribuições dos três EPS, com alguns membros prevendo altos picos e um pouco adiantados, uma alta concentração de membros próximos da observação, e também uma boa concentração de membros abaixo do pico de vazão. Esta distribuição cobre completamente as observações e de uma forma geral pode ser considerado um bom resultado, na medida em que a indicação das ultrapassagens de limiares foi sempre sugerida por um bom número de previsões.

A previsão determinística de referências, o ECMWF-fc, apresentou resultados muito bons nesta previsão. As vazões previstas nos dez dias de horizonte de previsão foram muito similares às observações, bem como a ocorrência da ultrapassagem dos limiares e o pico da cheia. Neste caso, não se pode afirmar que visualmente a previsão determinística tenha sido inferior às previsões por conjunto. Inclusive, pode-se discutir que ela foi melhor que a previsão do CPTEC-pf.

Já a previsão com chuva observada apresentou um resultado inferior às demais previsões feitas com os modelos meteorológicos. Nela, as vazões foram subestimadas no horizonte de previsão, incluindo o pico e a ultrapassagem dos limiares adotados. Neste sentido, pode-se argumentar que incertezas na modelagem hidrológica realizada podem incluir um viés negativo nos resultados. Mas, como todas as demais previsões indicaram subida nos hidrogramas, provavelmente este resultado com chuva observada ocorra em função de incertezas nos dados de chuva observada disponíveis.



**Figura 106.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 22/12/2010 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 107. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 22/12/2010 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

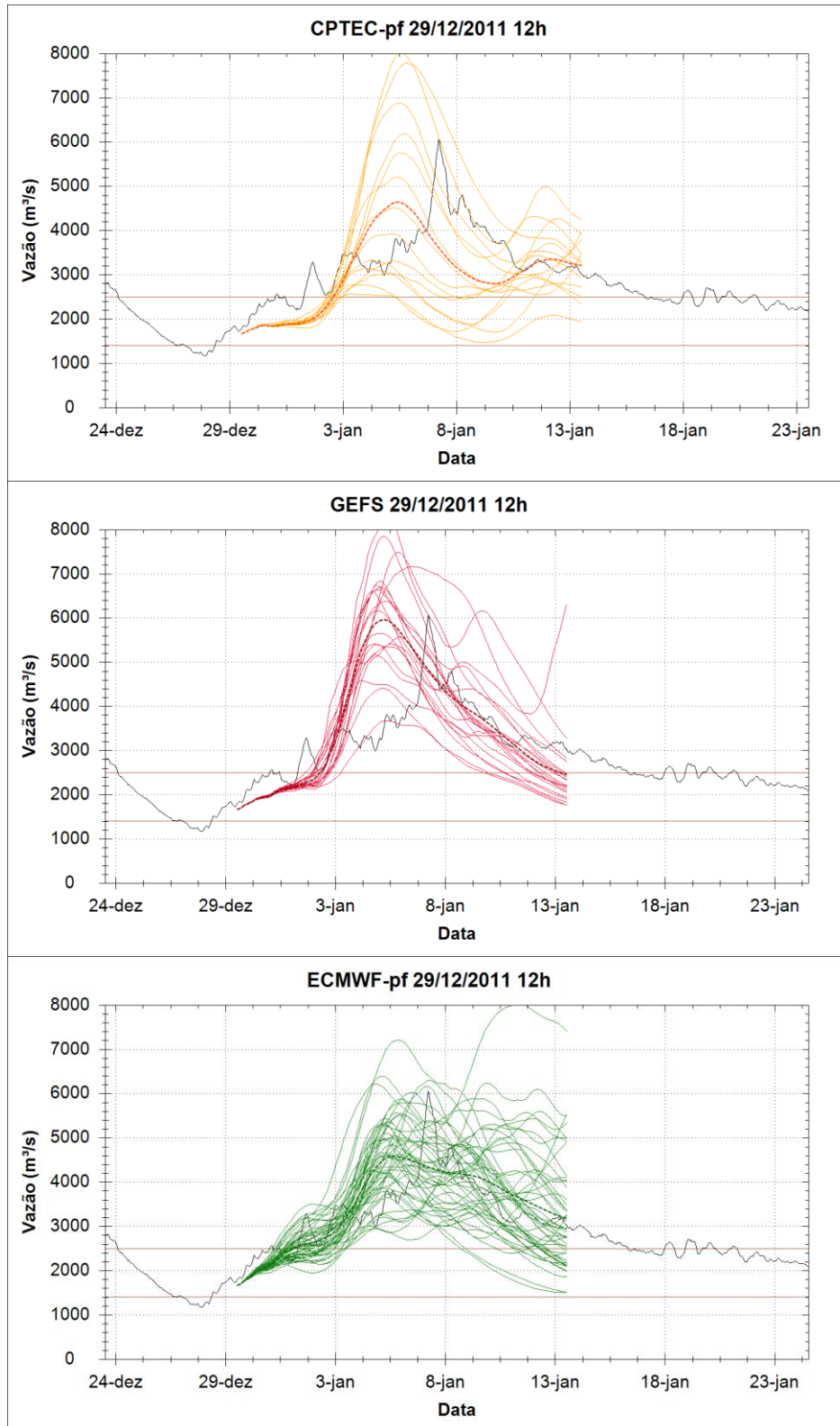
A Figura 108 e a Figura 109 apresentam as previsões feitas no dia 29/12/2011 às 12h para a principal cheia afluyente a UHE Três Marias no período chuvoso de 2011/2012. Este foi um evento de cheia que ocorreu entre os dias 6 e 8 de Janeiro de 2012, e as vazões máximas chegaram a mais de  $6000\text{m}^3/\text{s}$ . Este foi o maior evento observado dentro do período de dados analisados nesta pesquisa. As previsões emitidas já começaram em valores acima do limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , e o principal objetivo desta análise foi verificar a capacidade dos modelos em prever a ocorrência do grande pico da cheia.

As previsões feitas com o CPTEC-pf apresentaram adiantamento de cerca de três dias do pico de vazão, e com valores máximos chegando até aproximadamente  $8000\text{m}^3/\text{s}$ . A média do conjunto, contudo ficou na ordem de  $4500\text{m}^3/\text{s}$ . O espalhamento dos membros foi grande, indicando muita incerteza, e a abrangência do conjunto foi relativamente boa em relação às observações, com exceção dos dias iniciais da previsão, onde todos os membros se concentraram abaixo das observações.

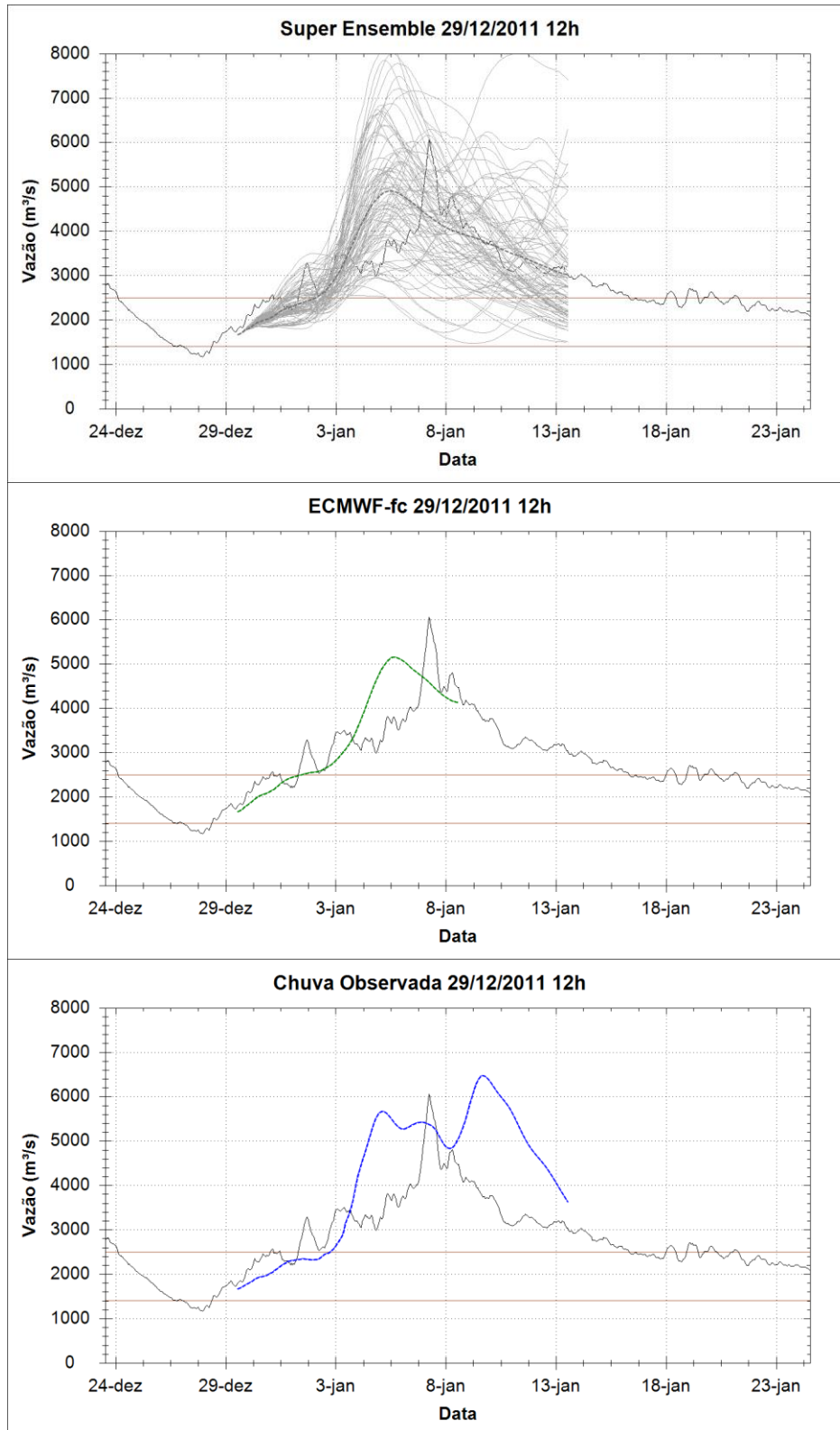
Nas previsões feitas com o GEFS o pico da vazão também foi previsto com adiantamento de cerca de três dias, e com vazões de pico chegando a mais de  $8000\text{m}^3/\text{s}$ . A média do conjunto apresentou valores próximos das observações em magnitude, em torno de  $6000\text{m}^3/\text{s}$ , porém também adiantada em relação a observação. O espalhamento do conjunto do GEFS foi relativamente pequeno durante a subida do hidrograma, indicando pouca incerteza, porém para um evento que não foi observado, o que não é um resultado adequado. Em relação a abrangência do espalhamento, em geral as observações foram abrangidas, apesar das defasagens.

O ECMWF-pf apresentou resultados com menor adiantamento do que os demais EPS. Em geral o seu conjunto se concentrou nas proximidades das vazões observadas, incluindo o pico das vazões. Apesar de três membros terem apontado para a possível ocorrência da cheia com antecedência e em valores altos, em geral o espalhamento mostrou pouca incerteza e uma boa abrangência das observações. Os erros na média foram para baixo das observações, sugerindo que a melhor opção para acompanhamento desta cheia usando o ECMWF-pf é o uso de limites superiores do conjunto.





**Figura 108.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 29/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 109.** Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 29/12/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1400m^3/s$  e  $2500m^3/s$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.

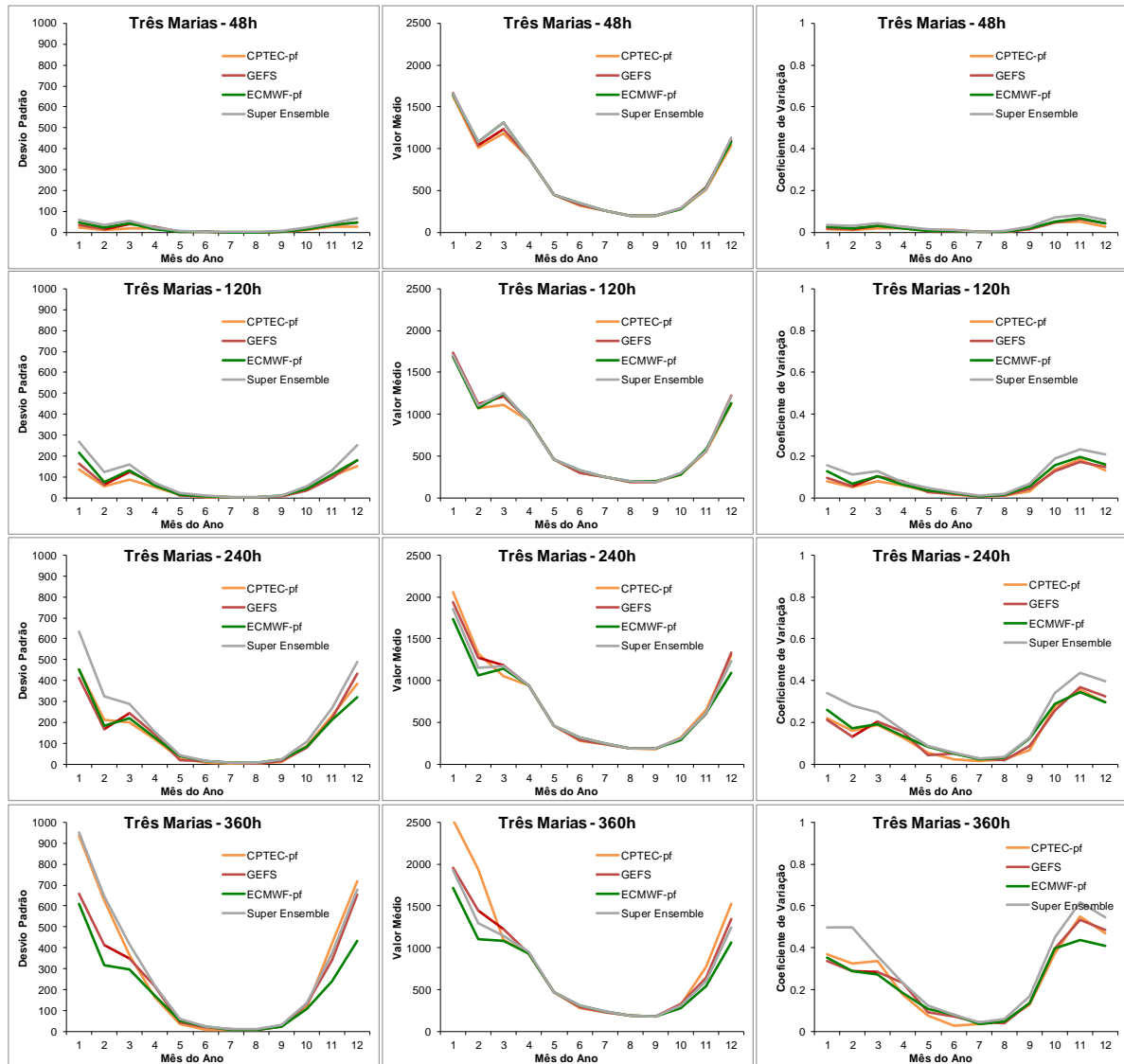
Já a previsão dada pelo Super Ensemble sugere fortemente um pico de vazão adiantado e com altos valores dirigidos principalmente pelo CPTEC-pf e o GEFS, com mais alguns membros do ECMWF-pf. Este hidrograma não pode ser considerado tão bom quanto o do ECMWF-pf, já que inclui esta forte sugestão de adiantamento do pico com altos valores de vazão. Todavia, o espalhamento do Super Ensemble compreende todas as observações, o que mostra que todas as principais incertezas estão sendo amostradas neste exemplo.

A previsão determinística de referência (ECMWF-fc) também apresentou um pico de vazão adiantado. Apesar de acompanhar as observações bem nos primeiros de previsão. O pico de vazão sugerido por ela acontece cerca de três dias antes da observação e com vazão de  $5000\text{m}^3/\text{s}$ . De uma forma geral, ela não pode ser considerada pior que o CPTEC-pf e que o GEFS, que também mostraram adiantamentos no pico. Contudo, em comparação com o ECMWF-pf ela apresentou um desempenho relativamente pior, já que os seus indícios da ocorrência correta da cheia são mais deslocados.

Já a previsão com chuva observada mostrou um desempenho inadequado para este evento. Com as chuvas observadas foram previstos dois picos de vazão em momentos diferentes da ocorrência do verdadeiro pico, com valores de  $5800\text{m}^3/\text{s}$  e de  $6500\text{m}^3/\text{s}$ . Considerando o desempenho do modelo com as outras fontes de dados de chuva, pode-se considerar que neste caso mais uma vez as chuvas observadas na bacia não foram adequadas, causando estas diferenças observadas.

### **7.1.2. Análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles de vazão**

Na Figura 110 é apresentada uma análise do desvio padrão, médias, e coeficientes de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a previsão foi emitida (climatologia dos valores). Os valores apresentados para cada mês correspondem ao valor médio computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.



**Figura 110.** Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Alto Rio São Francisco, no ponto da UHE Três Marias.

Conforme também foi verificado nas análises para as chuvas, nestes resultados o formato de “U” das curvas mostra que durante os meses secos (Maio a Setembro) o desvio padrão e a média das previsões são pequenos, muitos próximos de zero no caso dos desvios padrão, possivelmente por que todos os membros do conjunto preveem chuvas próximas de zero nesta época do ano. Já durante os meses úmidos (Outubro a Abril) os valores de desvio são maiores, que é o período chuvoso nas bacias.

Com o aumento dos horizontes de previsão nota-se um aumento no desvio padrão das previsões para o período chuvoso. Os valores são menores do que 250m³/s para todos os EPS no horizonte de 120h, e variam para valores em torno de 500m³/s (ECMWF-pf e GEFS) e em

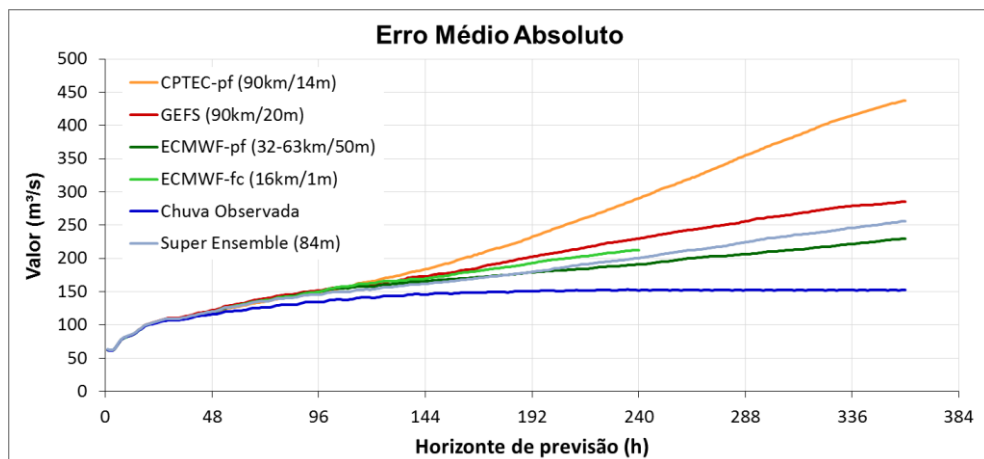
torno de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  (CPTEC-pf) no horizonte de 360h. Sendo que os maiores valores de desvio padrão geralmente se dão nos meses de Dezembro e Janeiro.

Em relação às médias dos ensembles, em geral todos os modelos mostraram valores similares. Somente nos meses de Janeiro a Março considerando um horizonte de 360h os valores do CPTEC-pf foram um pouco maiores.

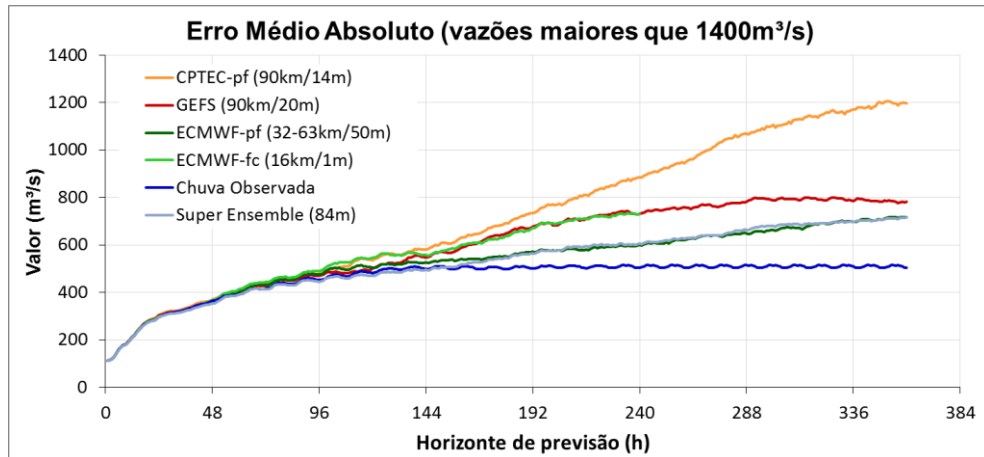
Em relação ao comportamento do Super Ensemble, em geral ele sugeriu um desvio maior que os EPS que o compõem nas três primeiras antecedências, e na última antecedência o desvio do CPTEC-pf foi o maior. Acredita-se que isto ocorre nos três primeiros horizontes devido ao fato de ele ser formado por três conjuntos que quando combinados indicam um leque de trajetórias mais amplo que qualquer um dos EPS individualmente. E no horizonte de 360h isto não ocorre por que os resultados do CPTEC-pf são muito mais espalhados que os demais EPS.

### 7.1.3. Erro Médio Absoluto

Os resultados obtidos para o Erro Médio Absoluto (EMA) de cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 111 e na Figura 112.



**Figura 111. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.**



**Figura 112. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s.**

Nos resultados, conforme esperado, o aumento do horizonte de previsão sugere um aumento nos erros. Além disto, os horizontes iniciais da previsão de vazão estão sujeitos a maior influência da assimilação de dados e da correção de saídas, por isso seus erros são mais próximos de zero.

Em relação aos primeiros intervalos de tempo da previsão, nota-se nos resultados de EMA que os valores são praticamente iguais para as primeiras 24h de todos os modelos e possuem poucas diferenças até pouco antes de 48h de horizonte. Isto acontece por que o tempo de concentração da bacia hidrográfica está situado entre 24h e 48h, fazendo com que todos os resultados iniciais dentro deste intervalo sejam mais dependentes dos valores observados na rede telemétrica do que das previsões de chuva propriamente ditas.

A partir destes horizontes de previsão os resultados com as diferentes fontes de chuva usadas na previsão passam a diferir.

Na previsão com chuva observada nota-se que o modelo tem um desempenho com erros que variam dentro do horizonte de previsão entre 50m<sup>3</sup>/s até 150m<sup>3</sup>/s (todos os dados), e erros que variam entre 120m<sup>3</sup>/s e 450m<sup>3</sup>/s (apenas as altas vazões). A tendência das previsões é manter-se em um patamar de erro após cerca de 144h (7 dias) de horizonte de previsão. Provavelmente este intervalo é quando o efeito da assimilação de dados deixa de ter maior influência sobre os resultados, e o desempenho da previsão feita com chuva observada é muito similar ao desempenho do modelo hidrológico rodando em modo de simulação puramente.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os maiores erros no horizonte de previsão, principalmente a partir de aproximadamente 120h de antecedência. Na análise

considerando todos os dados os erros variaram entre  $200\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $430\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre  $600\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $1200\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h.

Os erros do GEFS foram menores que os do CPTEC-pf. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre  $180\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $290\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre pouco menos de  $600\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $800\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 300h, onde se mantiveram no mesmo patamar até a antecedência de 360h.

O ECMWF-pf foi o EPS com menores erros dentre os analisados. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre  $160\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $230\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre  $500\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 150h até cerca de  $700\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 300h, onde se mantiveram no mesmo patamar até a antecedência de 360h.

O Super Ensemble, composto pelos três EPS, não apresentou um desempenho de erro médio absoluto superior aos ECMWF-pf, com exceção para os erros um pouco menores no intervalo de previsão entre 50h e 150h na análise considerando apenas as maiores vazões. Em compensação os erros foram inclusive maiores que o ECMWF-pf nas maiores antecedências dos cálculos considerando todos os dados.

A previsão determinística ECMWF-fc apresentou um desempenho que pode ser considerado melhor ou equivalente a o CPTEC-pf e ao GEFS ao longo dos seus horizontes de previsão. Mas os resultados foram inferiores aos do ECMWF-pf. Os valores de erro máximo encontrados para a previsão determinística no seu maior horizonte (240h) foram de  $220\text{m}^3/\text{s}$  e  $760\text{m}^3/\text{s}$  para a análise com limiar e para a análise sem limiar, respectivamente.

Na comparação das previsões com chuva perfeita com as previsões feitas utilizando os modelos meteorológicos é possível notar que no último horizonte de previsão os erros do CPTEC-pf chegam a serem quase três vezes os erros da previsão perfeita, os erros do GEFS chegam a quase duas vezes a previsão perfeita, e os erros dados pelo ECMWF-pf são cerca de 50% maiores que os erros da previsão perfeita.

Esta análise dá margem para interpretação de que parte dos erros finais da previsão feita com o ECMWF-pf podem ter grande influência dos erros inerentes à modelagem hidrológica e aos dados observados, já que a distância entre as duas curvas de medida é menor que o erro da previsão perfeita.

Ainda, é possível verificar na evolução da curva de EMA ao longo dos horizontes de previsão que nas antecedências de 240h (10 dias) já existe uma boa distinção entre as curvas, porém nas antecedências de 120h (5 dias) a diferença é relativamente pequena (menos de  $100\text{m}^3/\text{s}$ ), então para estes horizontes o erro cometido com o uso de um ou outro modelo é menos expressivo.

#### 7.1.4. Erro Médio Relativo

Os resultados obtidos para o Erro Médio Relativo (EMR) com cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 113 e na Figura 114.

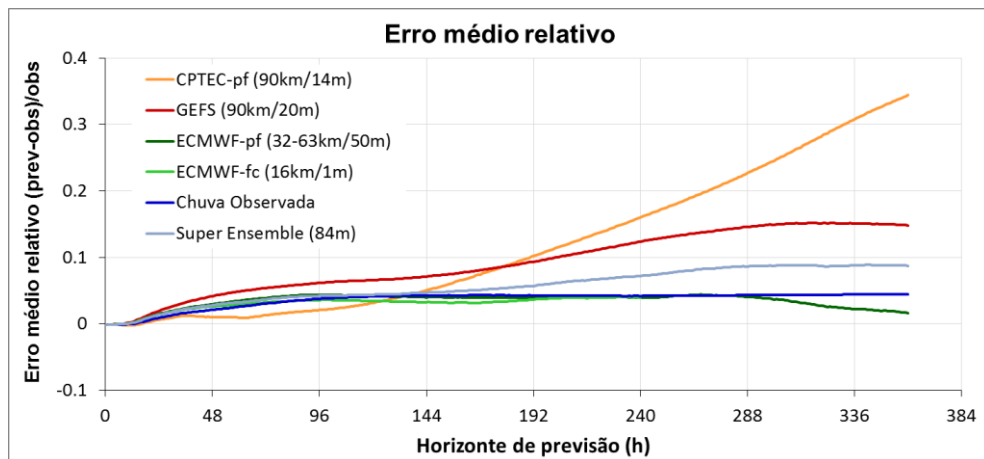


Figura 113. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.

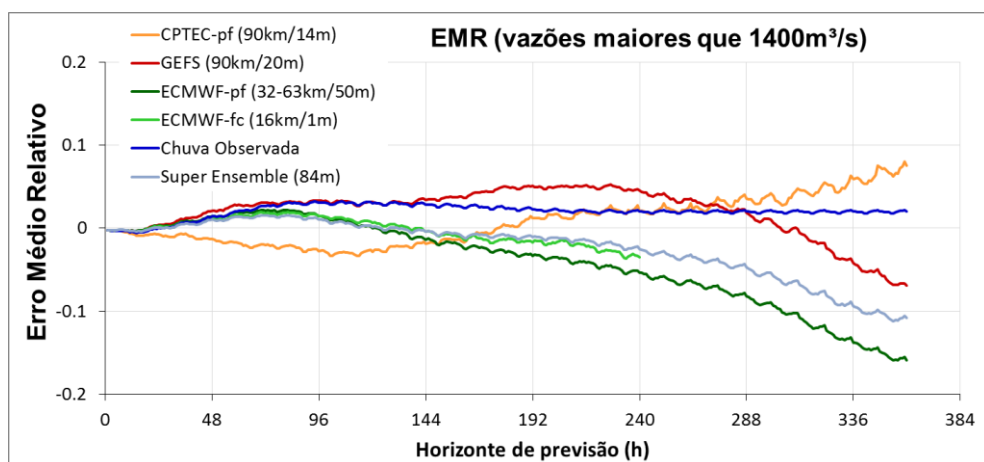


Figura 114. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando vazões maiores que  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .



Nos resultados de EMR também se notam os aumentos dos erros com o aumento do horizonte de previsão, com uma maior diferenciação dos resultados dos modelos após o primeiro dia (24h) de horizonte de previsão.

Na previsão com chuva observada notam-se erros que variam dentro do horizonte de previsão entre 0 até 0,04 quando são considerados todos os dados, e erros que variam entre 0 e 0,03 quando são consideradas apenas as vazões altas. A tendência das previsões com vazão observada foi manter-se em um mesmo patamar de erro após cerca de 144h (7 dias) de horizonte de previsão, quando o efeito da assimilação de dados deixa de ter maior influência sobre os resultados. Nesse caso, pode-se dizer que a modelagem hidrológica acrescenta um pequeno viés positivo aos resultados.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os maiores erros no maior horizonte de previsão, chegando a cerca de 0,4 para as análises com todos os dados e a 0,09 para as análises considerando apenas as maiores vazões. Porém, para horizontes de previsão menores até cerca de 144h na análise com todos os dados o viés das previsões do CPTEC foi o menor verificado, inclusive menor que a previsão com chuva observada. E na previsão apenas com os maiores dados o erro médio relativo foi negativo, de cerca de -0,3.

Os erros do GEFS estiveram entre os maiores verificados para os primeiros dias do horizonte de previsão. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre 0 até cerca de 0,08 nas antecedências de até 172h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros chegaram até cerca de 0,06 na antecedência de 240h, e a partir deste horizonte o EMR caiu chegando a ser negativo em torno de -0,08 na antecedência de 360h.

O ECMWF-pf apresentou EMRs na análise com todos os dados muito similares ao desempenho das previsões com chuva observada, inclusive com erro um pouco menor nos últimos horizontes de previsão. Já na análise apenas com os maiores valores o ECMWF-pf apresentou um viés negativo bem expressivo, chegando a -0,18 no horizonte de previsão de 360h, indicando uma possível tendência do EPS em subestimar as vazões nas maiores antecedências.

O Super Ensemble, composto pelos três EPS, apresentou um desempenho intermediário entre os erros dos modelos meteorológicos. Desta forma, os erros considerando todos os dados foram maiores que os erros do ECMWF-pf e menores que os erros do GEFS e do CPTEC nos maiores horizontes de previsão. Já quando são consideradas apenas as maiores

vazões os erros não chegam a ser tão negativos quando o ECMWF-pf, mas sofrem grande influência deste chegando a -0,1 nos maiores horizontes de previsão.

O ECMWF-fc (previsão determinística) apresentou um comportamento muito similar a média do ECMWF-pf em seu desempenho. O EMR considerando todos os dados foi similar ao erro considerando chuva perfeita. Já o EMR considerando apenas as maiores vazões foi positivo nas primeiras 120h (em torno de 0,02) e negativo nas últimas horas do horizonte de previsão (em torno de -0,2).

Sobre a comparação geral dos resultados, o viés mostrou um comportamento sempre positivo na análise com todos os dados onde o desempenho dos modelos pode ser facilmente comparado. Já para a análise com o limiar de vazão os modelos mostraram diferenças entre viés positivo e negativo ao longo do horizonte de previsão, com melhor desempenho entre um modelo e outro dependente do horizonte de previsão.

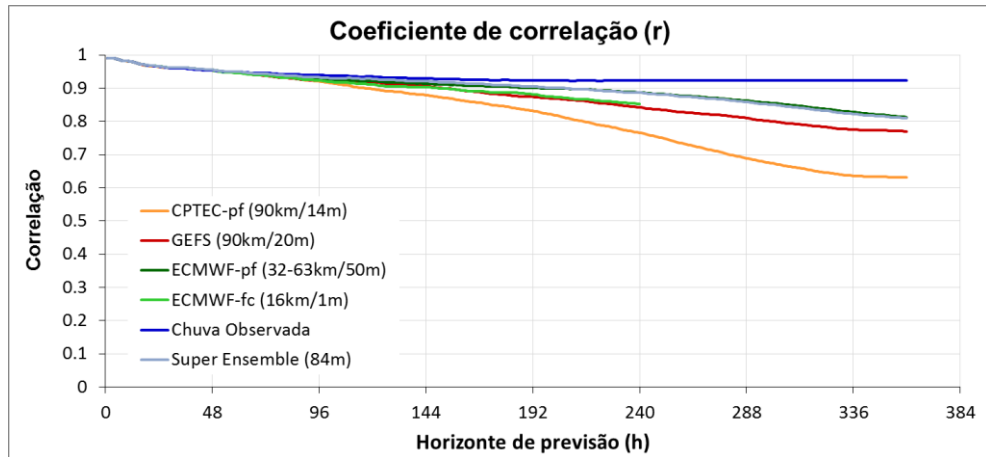
É importante ponderar que o erro médio relativo considera a compensação de erros na previsão, sendo sensível a amostras com comportamento diferenciado, e em alguns casos erros extraordinários, isto pode ter exercido influência sobre os resultados.

Finalmente, é possível verificar na evolução da curva de EMR que os valores se concentram sempre entre 0,2 e -0,2 (com exceção do CPTEC-pf), que correspondem a erros de cerca de 20% nas medidas, o que é um desempenho que pode ser considerado aceitável uma vez que um considere todas as outras incertezas existentes no processo.

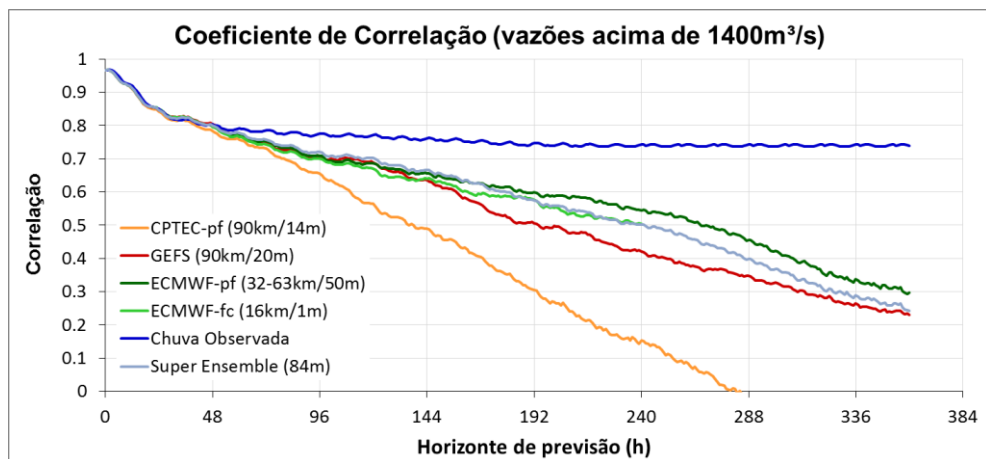
### **7.1.5. Correlação**

Os resultados de coeficiente de correlação ( $r$ ) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 115 e na Figura 116.

Nos resultados, o aumento do horizonte de previsão apresenta o decaimento da correlação com o horizonte de previsão. E nos horizontes iniciais da previsão os resultados utilizando todas as diferentes fontes de dados de chuva são muito próximos, por estarem sujeitos a maiores influências dos dados observados e da assimilação de dados.



**Figura 115.** Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.



**Figura 116.** Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando apenas com vazões maiores que  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .

Em relação aos primeiros intervalos de tempo da previsão, o coeficiente de correlação até pouco menos de 48h de antecedência para os resultados ficou situado entre 1,0 e 0,9 na análise com todos os dados, e entre 1,0 e 0,8 na análise com as maiores vazões. A partir destes horizontes de previsão os resultados das previsões de vazão com as diferentes fontes de dados de chuva passaram a diferir.

Na previsão com chuva observada notam-se coeficientes de correlação variando dentro do horizonte de previsão entre 1,0 até 0,92 quando são considerados todos os dados, e variando entre 0,98 e 0,87 quando são consideradas apenas as altas vazões. A tendência das previsões é manter-se em um patamar de erro após cerca de 144h (7 dias) de horizonte de previsão, provavelmente quando o efeito da assimilação de dados deixa de ter maior influência sobre os resultados.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os menores coeficientes de correlação entre os testados. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,65 nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre 0,65 na antecedência de 100h e atingiram coeficientes de correlação negativos a partir do horizonte de previsão 272h.

Os coeficientes de correlação do GEFS foram maiores que o do CPTEC-pf. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,78 nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre 0,7 na antecedência de 100h até aproximadamente 0,24 na antecedência de 360h.

O ECMWF-pf foi o EPS com melhor desempenho (maior coeficiente de correlação) entre os analisados. Na análise considerando todos os dados as correlações variaram entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,81 nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões as correlações variaram entre 0,7 na antecedência de 100h até cerca de 0,3 na antecedência de 360h.

O Super Ensemble apresentou um coeficiente de correlação praticamente igual ao ECMWF-pf para as análises considerando todos os dados. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o coeficiente de correlação se posicionou entre o ECMWF-pf e o GEFS, não mostrando um benefício na composição do conjunto em comparação com o ECMWF-pf.

A previsão determinística ECMWF-fc apresentou na análise considerando todos os dados correlações entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,85 nas antecedências 240h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões as correlações variaram entre 0,7 na antecedência de 100h até cerca de 0,55 na antecedência de 240h. Este desempenho é melhor que o CPTEC-pf e equivalente ao GEFS. E estes resultados são inferiores aos do ECMWF-pf.

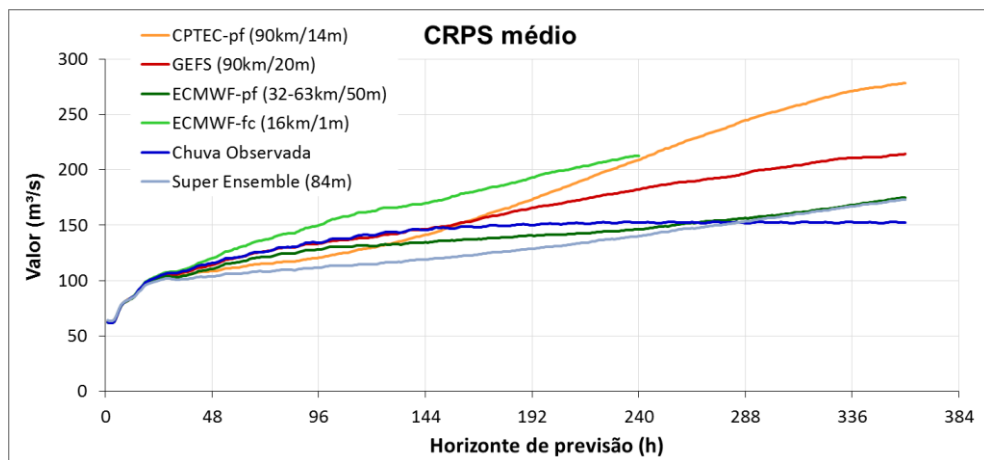
Na comparação das previsões com chuva perfeita com as previsões feitas utilizando os modelos meteorológicos é possível notar que no último horizonte de previsão os resultados obtidos com o uso de modelos meteorológicos têm qualidade relativamente bem inferior em comparação com as previsões perfeitas. Isto mostra a maior dificuldade dos modelos meteorológicos em reproduzir a variabilidade da ocorrência exata da chuva nos maiores horizontes.

Ainda, é possível verificar na evolução das curvas de correlação ao longo dos horizontes de previsão que nas antecedências de 240h (10 dias) já existe uma boa distinção

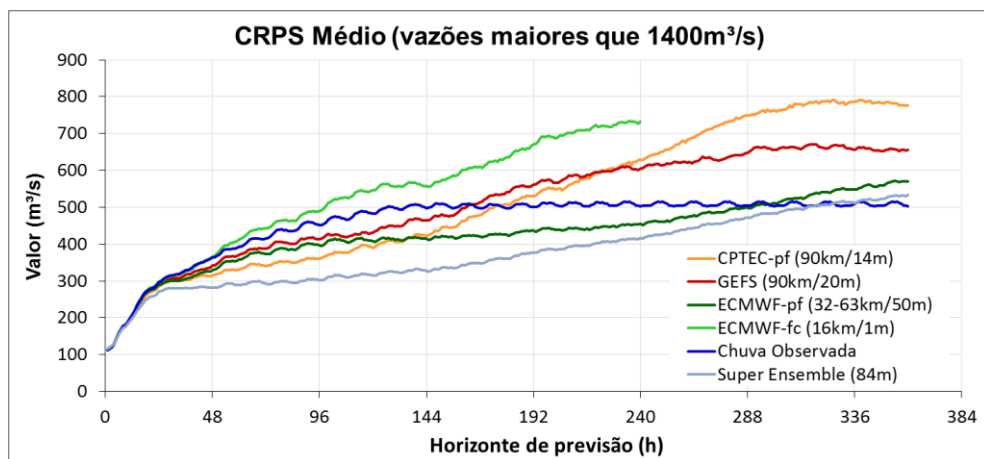
entre as curvas, porém nas antecedências de 120h (5dias) a diferença é menor, sugerindo que nestes horizontes o erro cometido com o uso de um ou outro modelo é menos expressivo.

### 7.1.6. CRPS Médio

Os resultados obtidos para o CRPS médio de cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 117 e na Figura 118.



**Figura 117. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.**



**Figura 118. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco apenas vazões maiores que 1400m³/s.**

Assim como para as demais métricas de erros, nas análises de CRPS médio o aumento do horizonte de previsão também sugere um aumento nas incertezas.

Em relação aos primeiros intervalos de tempo da previsão, também nota-se que os resultados de CRPS médio são praticamente iguais para as primeiras 24h e possuem poucas diferenças até pouco antes de 48h de horizonte. Isto acontece por que o tempo de concentração da bacia hidrográfica está situado entre 24h e 48h. A partir destes horizontes de previsão os resultados entre os dados de chuva usados na previsão passam a diferir de forma mais sensível.

O CRPS médio para as previsões com chuva observada é equivalente ao EMA, pois esta é uma previsão determinística. Assim verificou-se desempenho variando no horizonte de previsão entre pouco mais de  $50\text{m}^3/\text{s}$  até  $150\text{m}^3/\text{s}$  quando são considerados todos os dados, e erros entre  $120\text{m}^3/\text{s}$  e  $450\text{m}^3/\text{s}$  quando são consideradas apenas as vazões mais altas. A tendência das previsões é manter-se em um patamar de erro após cerca de 144h (7 dias) de horizonte de previsão, que é quando o efeito da assimilação de dados deixa de ter maior influência sobre os resultados, e o desempenho da previsão feita com chuva observada é muito similar ao de uma simulação.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os melhores valores de desempenho entre 48h e 150h de horizonte de previsão, os erros variaram entre  $100\text{--}150\text{m}^3/\text{s}$  (considerando todos os dados), e  $200\text{--}400\text{m}^3/\text{s}$  (considerando somente as vazões altas). Como contraponto, para as maiores antecedências, os erros do CPTEC-pf foram os maiores registrados. Na análise considerando todos os dados os valores chegaram até cerca de  $280\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os valores foram de cerca de  $800\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h.

O CRPS médio para o GEFS na análise considerando todos os dados variou entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $210\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre pouco menos de  $350\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $650\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. Este desempenho é um pouco pior que o CPTEC-pf e o ECMWF-pf nos horizontes entre 48h e 150h de previsão, e melhor que o CPTEC-pf nos horizontes maiores.

A análise de CRPS médio para o ECMWF-pf considerando todos os dados apontou para valores variando entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $170\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre cerca de  $350\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $580\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. O desempenho do ECMWF-pf foi o melhor desempenho entre os EPS para os horizontes de previsão maiores que 150h.

Na análise do Super Ensemble, os valores apresentaram um desempenho de CRPS médio superior aos demais EPS para praticamente todos os horizontes de previsão, em ambas as análises. Ao contrário das demais métricas avaliadas até o momento, que consideram apenas a média do conjunto, o CRPS considera toda a distribuição, e este desempenho melhor para o Super Ensemble em termos de CRPS pode estar relacionado com esta característica de maior número de membros e espalhamento.

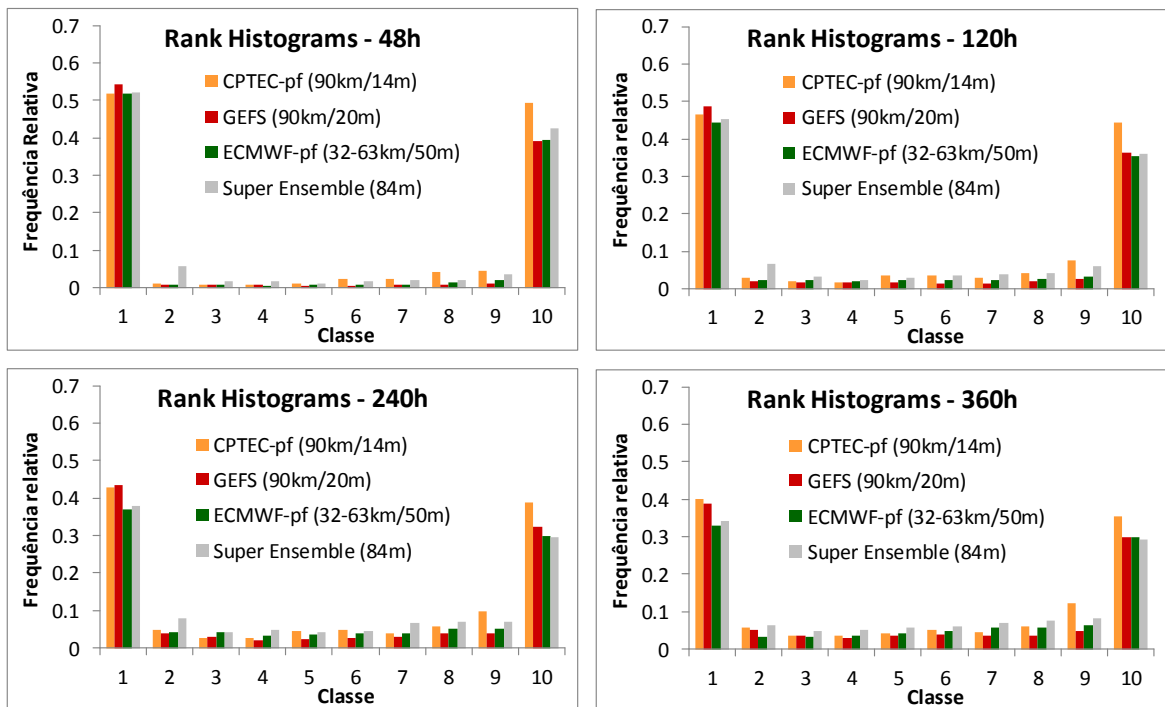
A análise do desempenho dos EPS em comparação com o desempenho obtido para as previsões com chuva observada indica ainda que melhores valores de CRPS médio foram obtidos usando alguns dos EPS do que os próprios valores de chuva observada para diversos horizontes de previsão, principalmente para antecedências menores que 150h. Provavelmente grande parte deste desempenho pode ser atribuída ao fato da medição da chuva observada na bacia não ter qualidade plenamente satisfatória.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de CRPS são equivalentes ao EMA. Na análise considerando todos os dados o erro variou entre 120m<sup>3</sup>/s na antecedência de 48h até cerca de 220m<sup>3</sup>/s nas antecedências de 240h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre 400m<sup>3</sup>/s na antecedência de 48h até pouco menos de 760m<sup>3</sup>/s na antecedência de 240h.

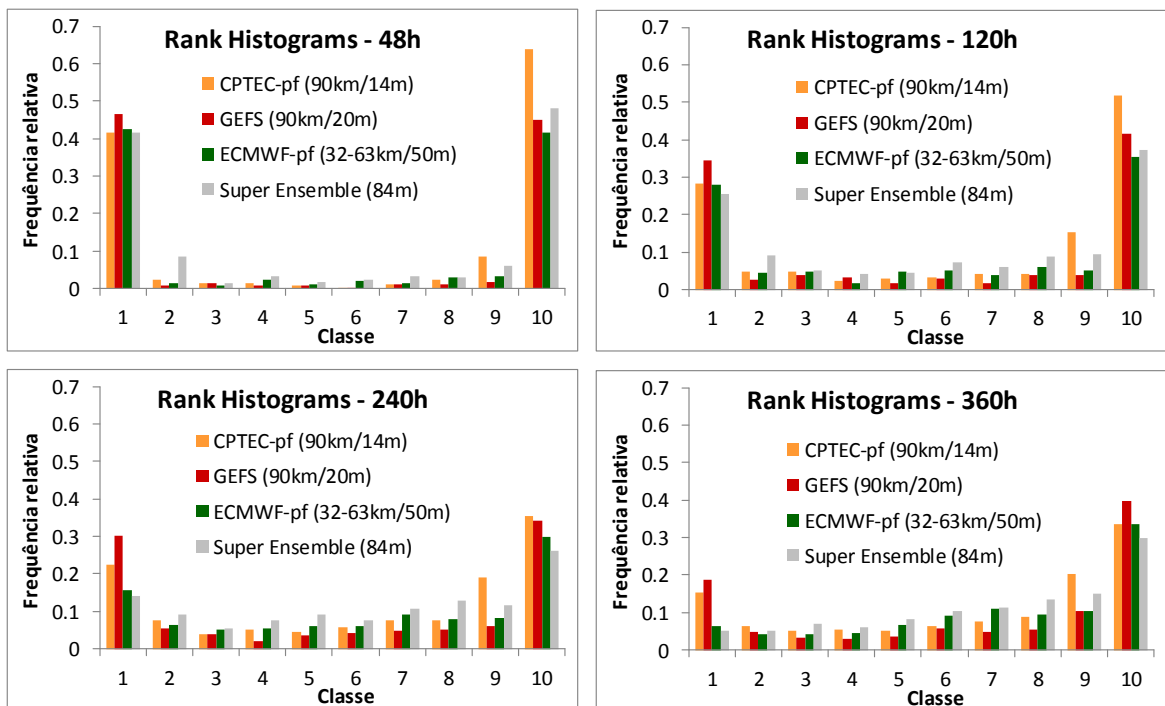
Na comparação do desempenho entre a previsão determinística e os EPS pode-se dizer que a previsão determinística apresentou um desempenho inferior a todos os EPS em termos de CRPS médio. Ou seja, que existe uma vantagem na utilização de qualquer uma das previsões por ensemble segundo esta métrica.

### **7.1.7. Rank Histogram**

Os Rank Histograms obtidos com cada um dos EPS mais o Super Ensemble para cada um dos limiares de análise são apresentados na Figura 119 e na Figura 120.



**Figura 119. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando todos os dados.**



**Figura 120. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando apenas com vazões maiores que 1400m<sup>3</sup>/s.**

Nos Rank Histograms correspondentes a análise com todo o período de dados disponíveis observa-se uma tendência geral para o formato de “U”. Este formato é um



indicativo de falta de espalhamento do conjunto, pois as observações se concentram muito sempre acima ou abaixo dos resultados do conjunto.

É possível observar também que com o aumento do horizonte de previsão, a tendência é de que o espalhamento do conjunto aumente, pois é menor a concentração de membros nas classes 1 e 10 do histograma de 360h do que no histograma de 120h, por exemplo. Contudo, ainda assim o formato de “U” persiste nos maiores horizontes.

Em relação a diferença entre os modelos, em geral os histogramas apresentaram frequências muito similares entre as classes, e sempre o mesmo formato de “U”. A mesma consideração é válida para o Super Ensemble.

É importante considerar que nestes histogramas para todos os dados existe uma influência também do período de recessão dos hidrogramas sobre os resultados, onde geralmente a chuva prevista pelos modelos meteorológicos é nula, e os resultados são mais dependentes das observações e do modelo hidrológico.

Na segunda sequência de histogramas, que considera apenas as vazões acima do limiar de  $1400\text{mm}^3/\text{s}$ , este efeito das recessões sobre o período de estiagem é excluído (as menores vazões não entram na análise).

Nestes histogramas considerando o limiar também é notado o formato de “U”, predominante nos histogramas para as antecedências de 48h, 120h, e 240h. Contudo, em geral também é notado nos histogramas que para a maior classe (10) normalmente existe uma maior frequência de observações, especialmente para os histogramas de horizonte 240h e 360h.

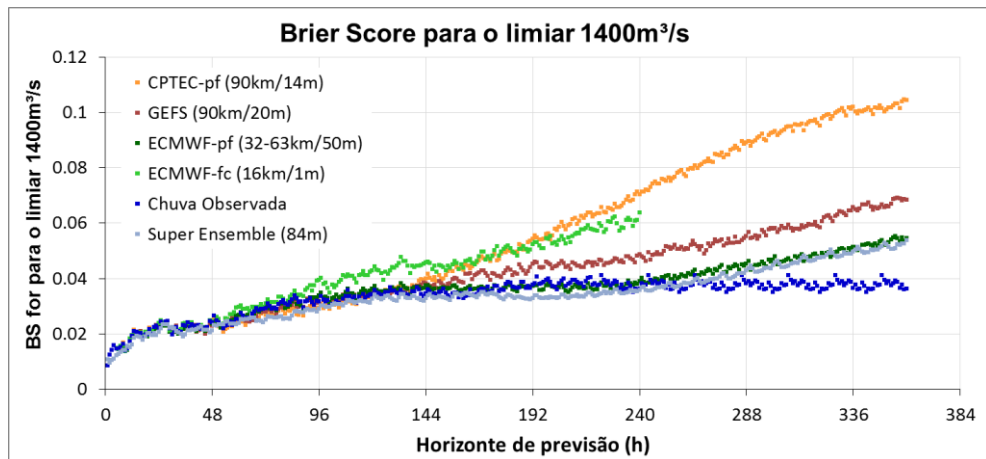
Esta maior concentração de resultados na maior classe é um indicativo de um viés nas previsões. Apesar dos resultados não serem necessariamente uma “rampa” ou um “L invertido”, eles demonstram que efetivamente em muitos casos as observações ficaram completamente acima de todos os membros das previsões.

Na comparação entre os EPS, em geral o efeito associado ao viés nos maiores horizontes de previsão é mais pronunciado no ECMWF-pf. Já no GEFS ele é menos pronunciado. O CPTEC-pf, por outro lado, sempre apresenta frequências um pouco mais elevadas na maior classe do histograma do que na menor.

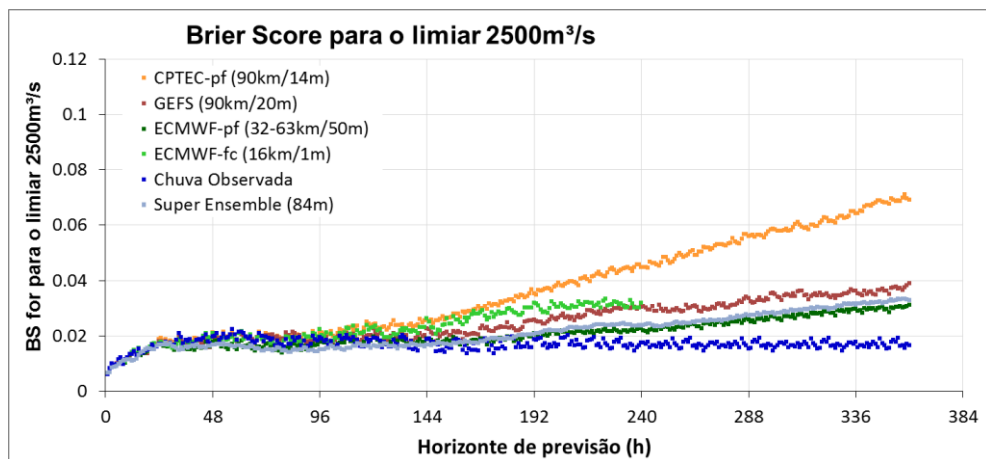
Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que a agregação de todos os membros pode resultar em um histograma mais plano em relação ao dos demais EPS. Porém o ECMWF-pf exerce grande influência (pois possui mais membros) e sua tendência é geralmente seguida no histograma do Super Ensemble.

### 7.1.8. Brier Score

Os resultados obtidos para o Brier Score (BS) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 121 e na Figura 122.



**Figura 121. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .**



**Figura 122. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ .**

Assim como para as outras métricas de erro, na análise de BS os erros aumentam com o aumento do horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. Nos primeiros intervalos de tempo, na faixa de 24-48h os valores são também novamente muito próximos (menores ou iguais a 0,02), devido ao fato do começo da previsão ser mais dependente das condições observadas e tempo de concentração da bacia.

O BS obtido para as previsões com chuva observada considerando o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  variou entre 0,02 no horizonte de 48h até 0,04 no horizonte de 360h. Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  o BS se manteve em aproximadamente 0,02 desde 48h até o final do horizonte de previsão.

Na análise de BS, nas antecedências entre 48h e 150h os resultados de todas as fontes de dados também foram muito similares, ficando em torno de 0,03 (limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ ), e 0,02 (limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ ).

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os valores de BS mais altos (pior desempenho) para as antecedências maiores ou iguais a 150h. Na análise considerando o menor patamar o BS variou entre 0,04 na antecedência de 150h até quase 0,1 nas antecedências de 360h. Na análise considerando o maior patamar o BS variou entre 0,02 na antecedência de 150h até quase 0,07 nas antecedências de 360h.

Os resultados de BS para o GEFS com menor patamar apresentaram desempenho entre 0,04 na antecedência de 150h até 0,07 nas antecedências de 360h. Na análise considerando o maior patamar o BS variou entre 0,02 na antecedência de 150h até quase 0,04 nas antecedências de 360h. Este desempenho ficou situado entre o desempenho do CPTEC-pf e o desempenho do ECMWF-pf.

O ECMWF-pf foi o EPS com melhor desempenho (menor BS) entre os analisados para as antecedências maiores ou iguais a 150h. Na análise considerando o menor patamar o BS variou entre 0,04 na antecedência de 150h até quase 0,055 nas antecedências de 360h. Na análise considerando o maior patamar o BS variou entre 0,02 na antecedência de 150h até quase 0,03 nas antecedências de 360h.

Na análise de Super Ensemble, os valores apresentaram um BS muito próximo do ECMWF-pf, sendo ligeiramente menores na análise com o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , e ligeiramente maiores na análise com limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . Não é possível dizer que a agregação dos membros do conjunto é claramente boa ou ruim para os resultados da estatística em comparação com o melhor EPS, que é o ECMWF-pf.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de BS foram piores ou iguais aos ensembles no intervalo entre 100h até 150h de horizonte de previsão. Estes resultados giraram em torno de 0,04 (para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ ), e 0,021 (para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ ). Para o horizonte de previsão maior que 150h os resultados do ECMWF-fc foram melhores que os resultados do CPTEC-pf. Estes resultados giraram em torno de 0,05 (para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ ), e 0,03 (para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ ).

Na comparação entre previsões por ensemble e determinísticas, para a análise com o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  nota-se que o desempenho das previsões por ensemble é sempre melhor que a determinística até o horizonte de previsão de 150h, a partir de onde o desempenho do CPTEC-fc passa a ser pior que o da previsão determinística.

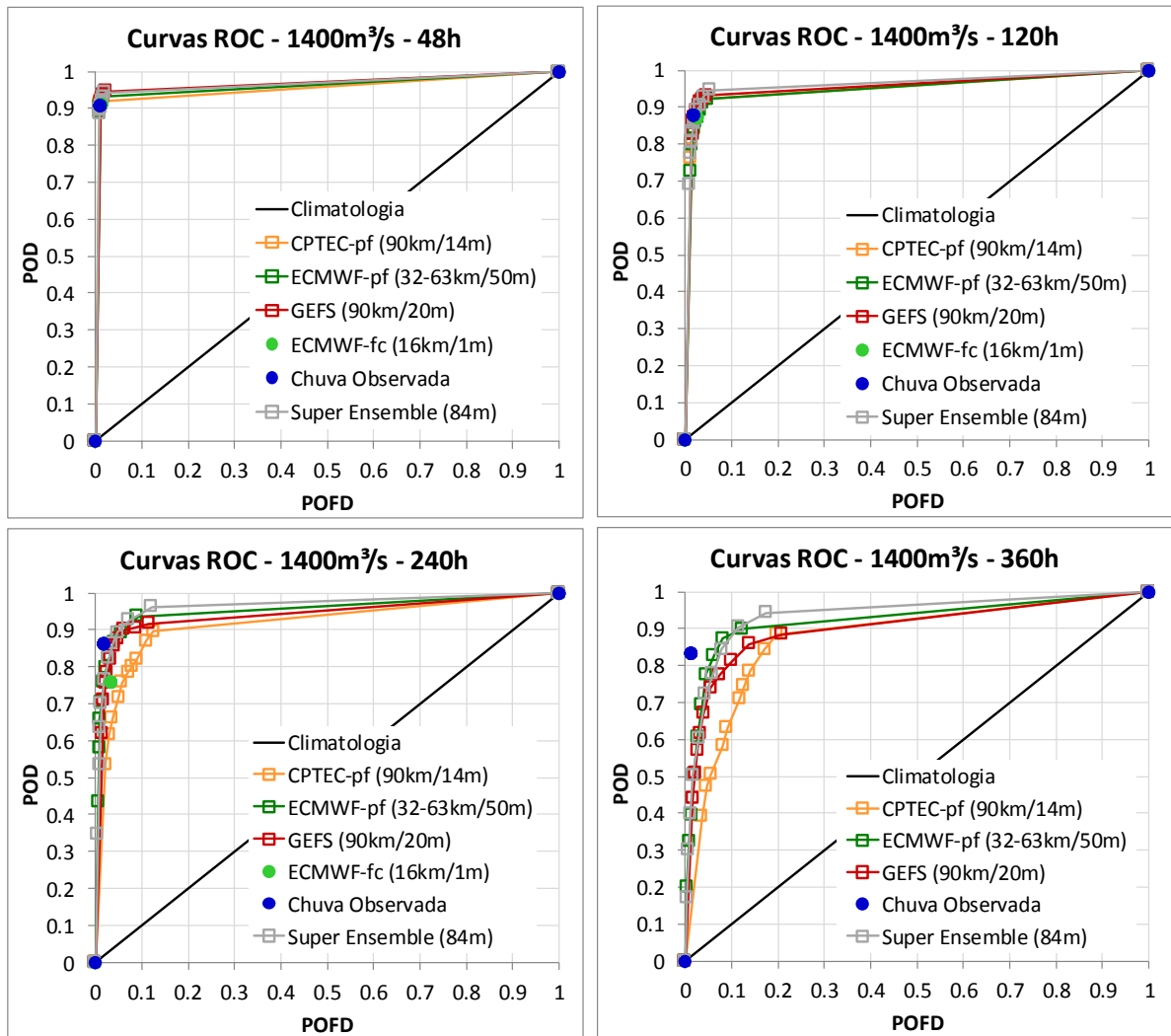
Já para a análise com o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  nota-se que o desempenho das previsões por ensemble dadas pelo GEFS e pelo ECMWF-pf é sempre melhor que a determinística. Já o desempenho do CPTEC-pf é geralmente igual ou inferior do que o desempenho da previsão determinística.

### 7.1.9. Diagramas ROC

O diagrama ROC é a segunda estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os diagramas ROC obtidos com cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 123 e na Figura 124.

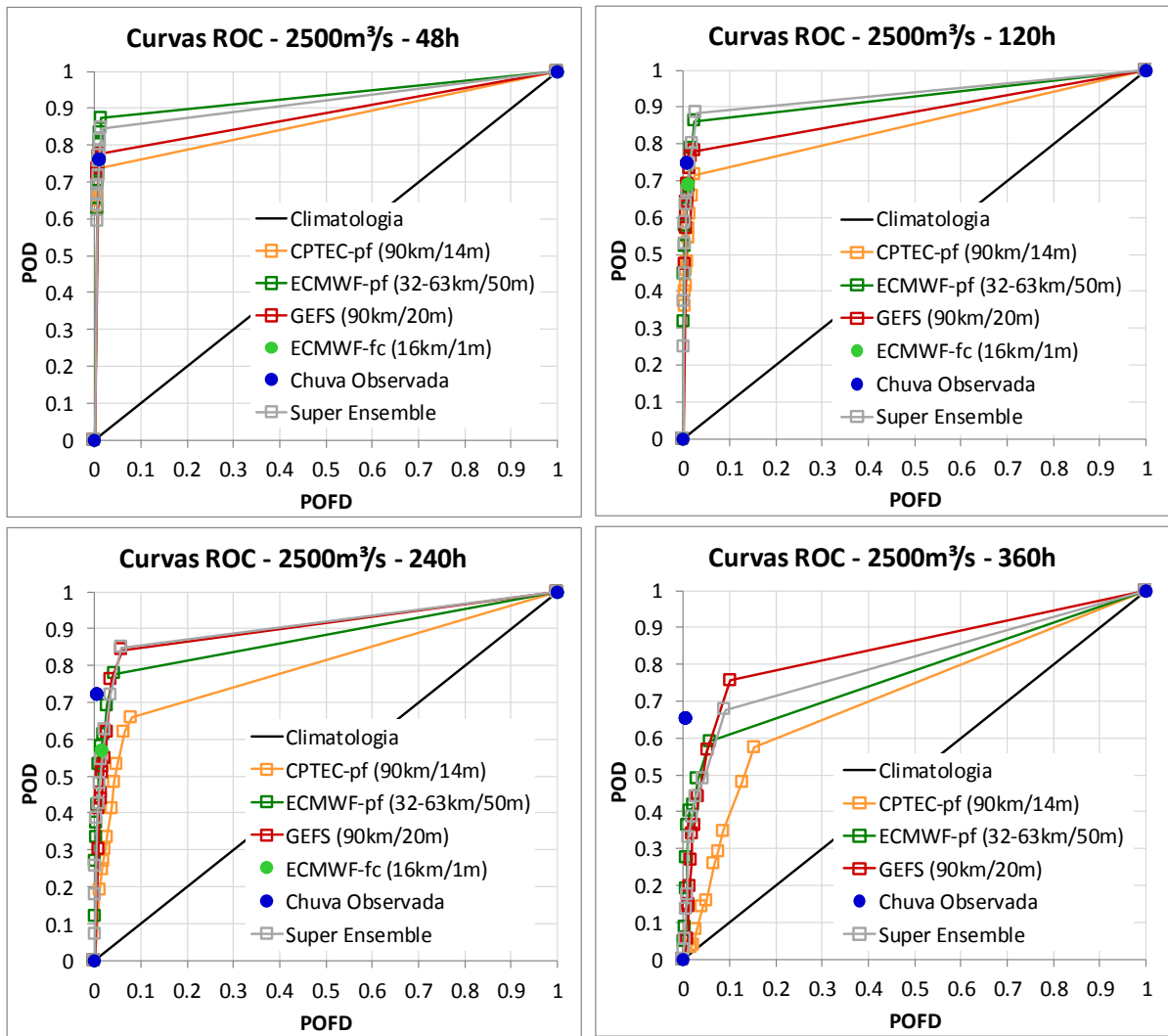
A análise das curvas ROC para as menores antecedências (48h e 120h) do limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  mostra um desempenho muito similar para todos os ensaios, com as curvas dos EPS sobrepostas. Ainda assim, para a antecedência de 120h é possível verificar que muitos pontos dos EPS possuem um POD maior que 0,9 enquanto que a previsão determinística e as previsões com chuva observada possuem um POD 0,88 para um mesmo POFD de aproximadamente 0,03. Isto indica uma pequena vantagem para as previsões por Ensemble.

O desempenho do CPTEC-pf para a antecedência de 240h e limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , considerando os percentis mais altos da previsão mostra uma POD de aproximadamente 0,9 e POFD de aproximadamente 0,12. Já para antecedência de 360h mostra uma POD de 0,8-0,9 e POFD de aproximadamente 0,2. Considerando estes resultados e os demais pontos da curva pode-se dizer que o desempenho geral do CPTEC-pf neste caso não foi ruim, mas foi pior que o dos demais EPS.



**Figura 123. Resultados das curvas ROC com limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.**

O desempenho do CPTEC-pf para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  e antecedências de 48h e 120h foi POD um pouco maior que 0,7 com POFD muito próxima de zero, considerando os percentis mais elevados da previsão. Para a antecedência de 240h e maiores percentis o POD ficou em torno de 0,65 para uma POFD em torno de 0,07. Na antecedência de 360h e maiores percentis o POD ficou em torno de 0,5-0,6 para uma POFD em torno de 0,1-0,2. Considerando este desempenho e os dos percentis menores pode-se dizer também que o resultado geral do CPTEC-pf foi menos adequado que os demais EPS.



**Figura 124. Resultados das curvas ROC com limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.**

O desempenho do GEFS para a antecedência de 240h e limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , considerando os percentis mais altos da previsão, foi uma POD de aproximadamente 0,91 e POFD de aproximadamente 0,1. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,85-0,9 e POFD de aproximadamente 0,1-0,2. Considerando estes resultados e os demais pontos da curva pode-se dizer que o desempenho geral do GEFS neste caso foi bom, um pouco inferior ao ECMWF-pf e superior ao CPTEC-pf.

Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  o desempenho do GEFS nas antecedências de 48h e 120h foi de POD em torno de 0,8 com POFD muito próxima de zero, considerando os percentis mais elevados da previsão. Para a antecedência de 240h e maiores percentis o POD ficou em torno de 0,85 para uma POFD em torno de 0,05. Na antecedência de 360h e maiores percentis o POD ficou em torno de 0,6-0,75 para uma POFD em torno de 0,05-0,1. Considerando este

desempenho e os dos percentis menores pode-se dizer também que o resultado do GEFS é pouco inferior ao ECMWF-pf e superior ao CPTEC-pf nas antecedências de 48h e 120h. Já nas antecedências de 240h e 360h o desempenho do GEFS foi o melhor dentre todos os EPS.

O desempenho do ECMWF-pf para a antecedência de 240h e limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , considerando os percentis mais altos da previsão, foi uma POD de aproximadamente 0,95 e POFD de ligeiramente menor que 0,1. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,9 e POFD de aproximadamente 0,11. Considerando estes resultados e os demais pontos da curva pode-se dizer que o desempenho geral do ECMWF-pf foi superior ao dos mais EPS, com uma curva mais próxima do canto superior esquerdo do diagrama.

Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  o desempenho do ECMWF-pf nas antecedências de 48h e 120h foi de POD em torno de 0,88 com POFD muito próxima de zero, considerando os percentis mais elevados da previsão. Para a antecedência de 240h e maiores percentis o POD foi em torno de 0,9 para uma POFD em torno de 0,03. Na antecedência de 360h e maiores percentis o POD foi em torno de 0,5-0,6 para uma POFD em torno de 0,05. Considerando este desempenho e os dos percentis menores pode-se dizer também que o resultado do ECMWF-pf foi o melhor dentre os EPS nas antecedências de 48h e 120h. Já nas antecedências de 240h e 360h o desempenho do ECMWF-pf foi superado pelo GEFS.

Esta queda de desempenho do ECMWF-pf nos últimos intervalos de tempo para o maior limiar pode estar relacionada com o viés negativo do modelo notado em outras métricas para as maiores antecedências e maiores limiares.

O Super Ensemble em todos os casos analisados apresentou um desempenho próximo ao do ECMWF-pf, em alguns casos como para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e antecedência de 240h os resultados foram ligeiramente melhores, e em outros como para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  e antecedência de 48h foram piores.

O desempenho da previsão determinística (ECMWF-fc) para a antecedência de 240h e limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  foi uma POD de aproximadamente 0,78 e POFD de aproximadamente 0,03. Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  o desempenho do ECMWF-fc nas antecedências de 48h e 120h foi de POD em torno de 0,7-0,75 com POFD muito próxima de zero. Para a antecedência de 240h o POD foi de 0,58 para uma POFD em torno de 0,02. Este desempenho das previsões determinísticas foi geralmente similar ao desempenho de percentis intermediários das previsões por ensemble, e inferior ao desempenho dos maiores percentis das previsões por ensemble. Ou seja, é possível dizer que existe um benefício no uso de

previsões por conjunto em comparação com as determinísticas quando são considerados os resultados de maiores percentis do conjunto.

O desempenho encontrado para as previsões com chuva observada foi sempre de POFD muito próxima de zero. Nas análises para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  a POD ficou em torno de 0,8-0,9 nos horizontes de previsão, e para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  a POD ficou em torno de 0,65-0,8 nos horizontes de previsão. Os ensembles apresentaram em muitos casos POD superior que este da previsão com chuva observada, com um pequeno acréscimo na POFD, especialmente para as antecedências de 48h, 120h, e 240h. Para a antecedência de 360h também foram detectadas PODs maiores que as das previsões com chuva observada, se forem considerados os maiores percentis do conjunto do GEFS, porém com um acréscimo de cerca de 0,1 na POFD.

De uma forma geral, esta última comparação sugere que é possível obter desempenhos superiores em termos de ROC usando previsões por conjunto em comparação com as previsões com chuva “perfeita”, principalmente até o horizonte de previsão de 240h.

#### **7.1.10. Reliability Diagrams**

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo I das previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades. Ele é a terceira estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os *Reliability Diagrams* para cada um dos EPS usados e o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 125 até a Figura 126. Estes diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf na antecedência de 48h para os dois limiares testados apresentaram curvas com pontos alternando entre acima e abaixo da linha de quarenta e cinco graus, indicando uma calibração não padronizada dos resultados para este horizonte de previsão. Para os demais horizontes, os resultados apresentaram em geral um comportamento relacionado com um viés condicional positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais observadas correspondentes. Por exemplo, para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  e antecedência de 240h quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,98 os



eventos foram observados com frequências de 0,71. Para o limiar de 2500m<sup>3</sup>/s os resultados de viés positivo foram mais expressivos, onde para o horizonte de previsão de 360h o CPTEC-pf indicou ocorrências probabilidades de 0,5 a 0,95 e os eventos foram observados com frequências relativas próximas de 0,2.

Em relação à contagem de amostras do CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi mais elevado que para as demais classes. O valor foi sempre maior que 1000, enquanto que nas demais classes o número de amostras sempre se manteve em torno de 100 a 10.

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões, para todos os horizontes de previsão. Como exemplo, para as previsões do menor limiar (1400m<sup>3</sup>/s) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,7 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,58 na antecedência 240h. Para as previsões do maior limiar (2500m<sup>3</sup>/s) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,7 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,35 na antecedência 240h.

Em relação a contagem de amostras do GEFS, assim como para o CPTEF-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi sempre maior (entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral menor que 100).

O desempenho do diagrama gerado pelo ECMWF-pf também tenha apresentado um viés condicional tipo I positivo, embora alguns de seus resultados possam ser considerados bem calibrados, especialmente se tratando das curvas para o limiar de 1400m<sup>3</sup>/s e antecedências de 240h e 360h, onde os resultados ficaram muito próximos da linha de quarenta e cinco graus. Para as previsões do maior limiar (2500m<sup>3</sup>/s), onde a tendência de viés condicional positivo é maior, foram indicadas, por exemplo, probabilidades de ocorrências de 0,7 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,52 na antecedência 240h.

O número de amostras do ECMWF-pf, assim como dos demais EPS se concentrou majoritariamente na primeira classe de probabilidades.

Na comparação dos EPS entre si, é possível afirmar que o ECMWF-pf é o que possui melhor calibração para os horizontes de 240h e 360h. Já para os horizontes menores os resultados entre os modelos foi alternado, não sendo possível afirmar vantagem de um ou outro modelo.

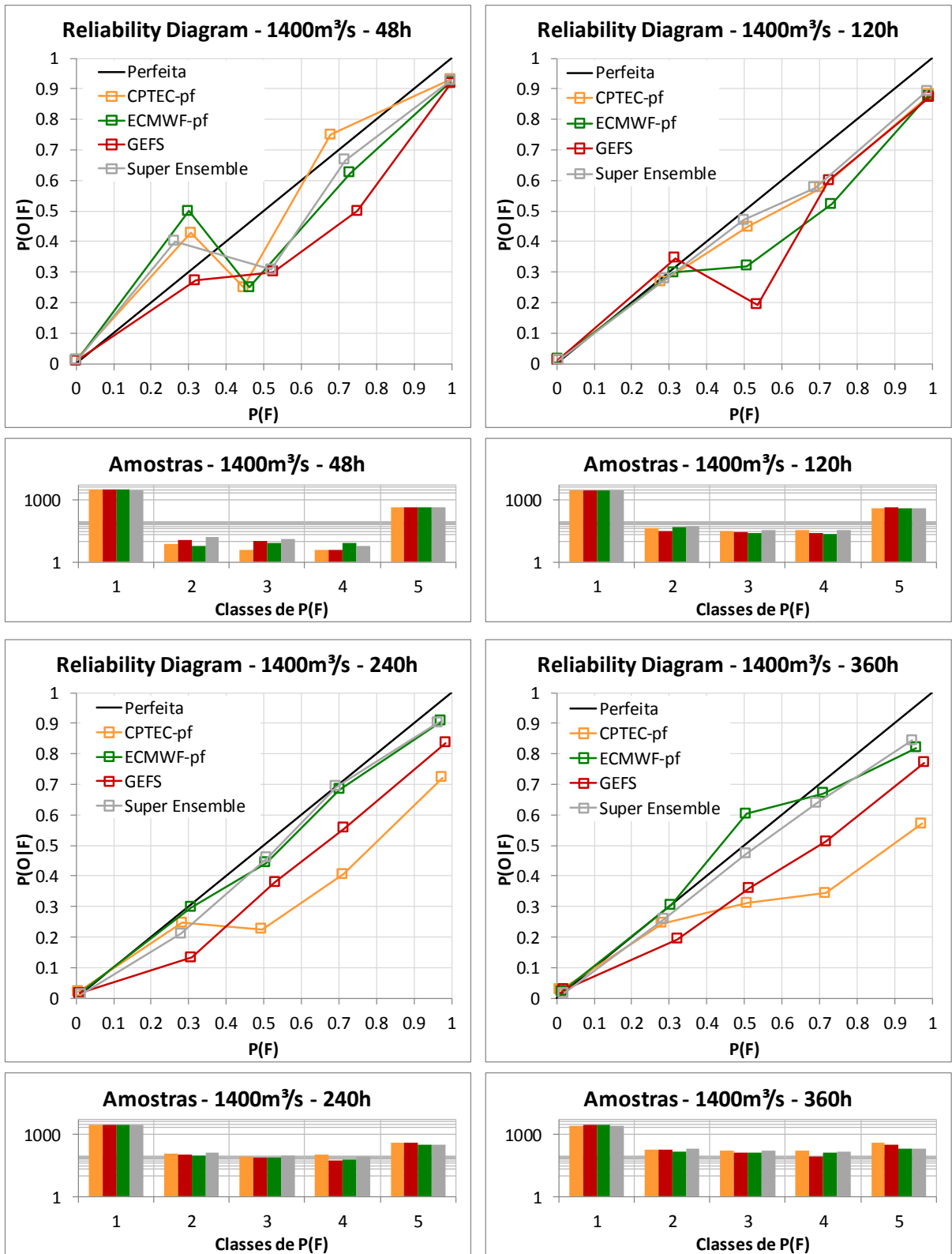


Figura 125. Reliability Diagram com limiar de 1400m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.

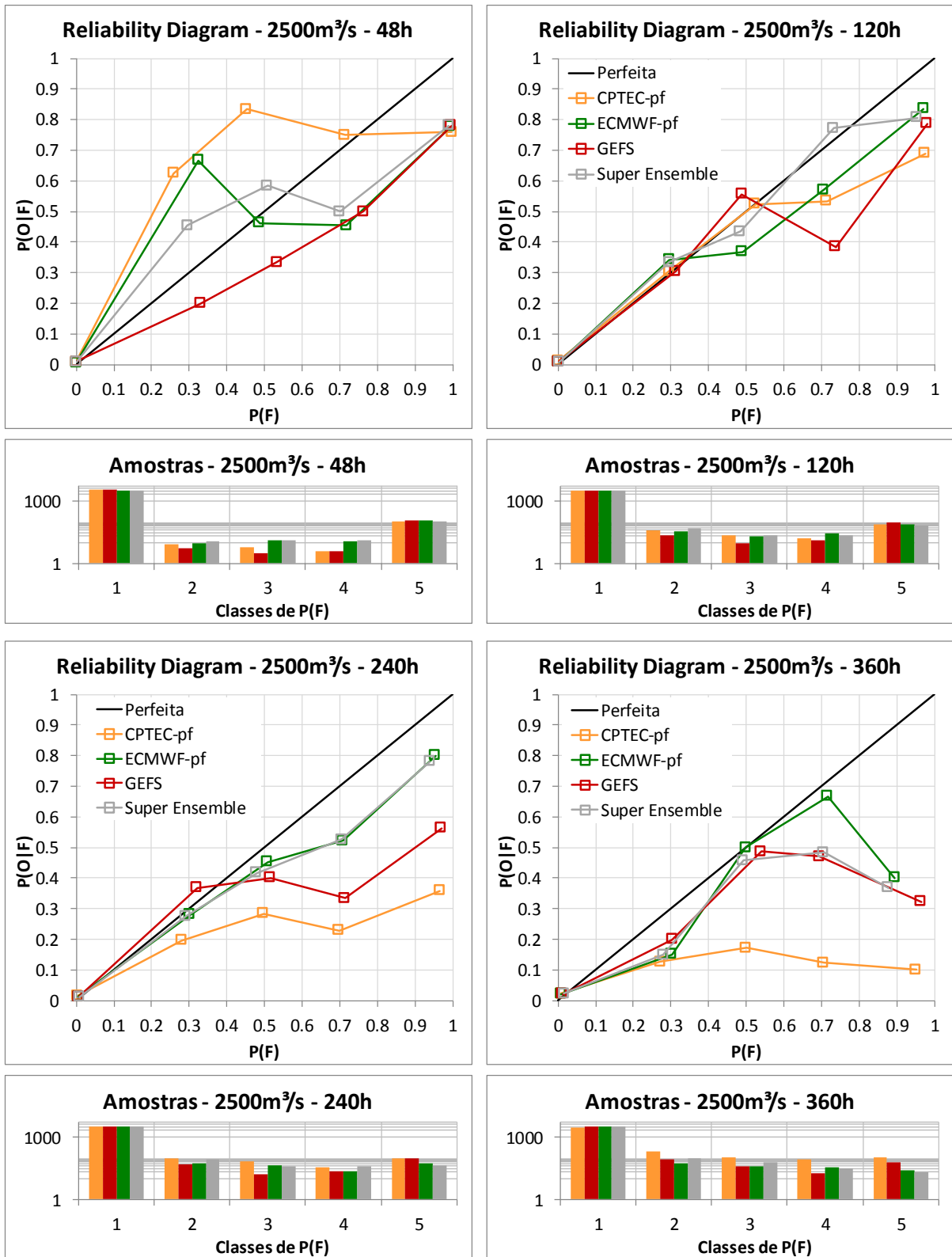
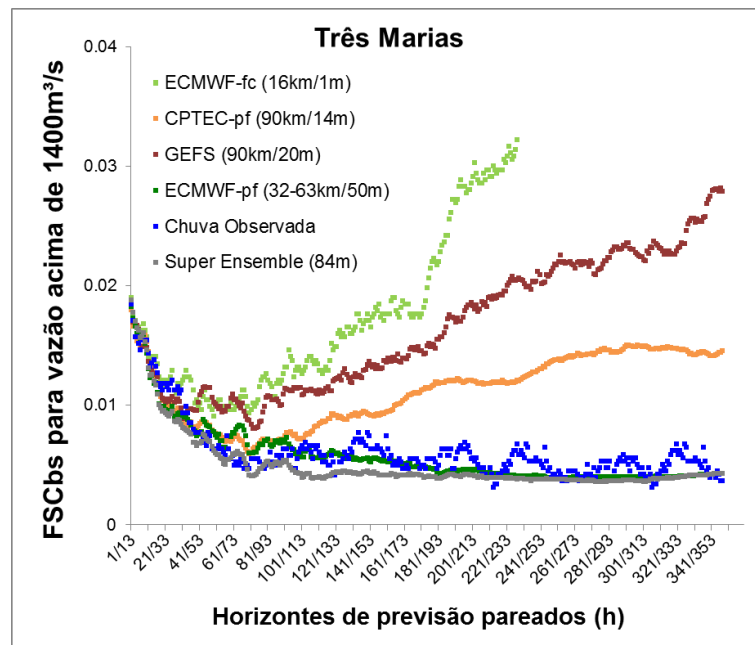


Figura 126. Reliability Diagram com limiar de 2500m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram resultados em geral muito similares aos do ECMWF-pf. Em alguns casos, como no diagrama de 120h para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  é possível dizer que o Super Ensemble é melhor que todos os demais EPS. Contudo, em outros casos como no diagrama de 360h para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  o Super Ensemble não supera o ECMWF-pf, pois se posiciona mais distante da linha de quarenta e cinco graus.

### 7.1.11. Forecast Convergence Score (FCS)

Os resultados obtidos para o Forecast Convergence Score (FCS) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ , são apresentados na Figura 121.



**Figura 127. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Alto São Francisco considerando o limiar de  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .**

Assim como para as análises das métricas de qualidade das previsões, os resultados obtidos com as análises de FCS sugerem resultados similares entre os diferentes modelos para as antecedências de aproximadamente 24h à 48h. E a partir destes horizontes os valores de FCS diferem entre as diferentes entradas de chuva.

As previsões que apresentaram em geral os valores mais elevados de FCS, e, portanto menor consistência entre si foram as feitas com o modelo determinístico de referência. Este resultado significa que as previsões determinísticas sempre apresentaram consistência menor

que as previsões por conjunto Para os horizontes de previsão de cerca de 60h os valores de FCS foram aproximadamente 0,01 e no horizonte de 240h eles chegaram a aproximadamente 0,03.

Entre os EPS, o GEFS foi o que apresentou maior FCS (menor consistência entre previsões consecutivas), variando entre 0,01 (60h) até quase 0,03 (360h). E o ECMWF-pf foi o que apresentou menores valores de FCS em geral (maior consistência entre previsões consecutivas) mantendo-se sempre abaixo de 0,01 após os horizontes iniciais.

O CPTEC-pf apresentou valores de FCS intermediários entre o GEFS e o ECMWF-pf, e o Super Ensemble acompanhou com valores muito similares os resultados obtidos com o ECMWF-pf, indicando consistências inclusive ligeiramente maiores entre as decisões consecutivas.

Na comparação dos resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble com as previsões feitas utilizando chuva observada também nota-se que os resultados são similares. Ou seja, que os resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble apresentaram consistência similar a da previsão com “chuva perfeita”.

### **7.1.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do alto São Francisco**

Os principais resultados encontrados para as análises de vazão para o alto São Francisco podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros tendem a aumentar com o horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. Nos horizontes iniciais, até cerca de 48h, os resultados com as diferentes chuvas previstas são muito próximos, pois dependem mais dos dados observados, assimilação de dados, e correção de saídas do que dos dados previstos propriamente. E até cerca de cinco dias de antecedência as diferenças entre os modelos não são tão expressivas quanto para maiores antecedências.
- As análises visuais das previsões indicaram que as previsões por conjunto geralmente compreenderam bem as ocorrências das cheias entre seus membros, e as previsões de ultrapassagem de limiares foram geralmente concordantes e com pouco espalhamento. Contudo a previsão do GEFS e a do CPTEC-pf apresentam picos um pouco adiantados e espalhamento bem elevado em dois dos três eventos verificados. Já a previsão do ECMWF-pf

apresentou uma subestimativa em sua média, mas um espalhamento mais estreito e com melhor acerto no tempo de ocorrência dos eventos.

- Na análise visual do Super Ensemble, ele nem sempre foi melhor que o ECMWF-pf individualmente, mas ele sempre compreendeu as observações dentro das trajetórias de seus membros, sendo mais robusto do que os EPS individualmente neste sentido.

- Na comparação visual entre as previsões por conjunto e a previsão determinística, a grande vantagem observada nas previsões por conjunto foi que em momentos em que a previsão determinística não detectou a ocorrência dos maiores eventos, pelo menos alguns membros do ensemble sugeriram esta possibilidade.

- Já a previsão com chuva observada mostrou alguns problemas nas análises visuais, com subestimativa de um dos eventos observados, e subestimativa de outro. Acredita-se que isso ocorra devido a falta de melhores observações de chuva na bacia.

- Os erros médios absolutos do ECMWF-pf foram os menores ao longo de todo o horizonte de previsão, seguidos pelo GEFS e depois CPTEC-pf. A previsão determinística apresentou desempenho em geral superior ou igual ao CPTEC-pf e o GEFS, mas inferior ao ECMWF-pf. O Super Ensemble não apresentou desempenho melhor que o ECMWF-pf. As diferenças entre os erros com chuva observada e com o ECMWF-pf são menores que o próprio valor de erro com chuva observada, indicando que os erros do modelo e dos dados observados fazem um papel importante no desempenho das previsões.

- Os resultados de EMR em geral apontaram para uma tendência de um maior viés positivo nos resultados do modelo hidrológico, assim como um viés positivo para todos os modelos. O CPTEC-pf apresentou o menor viés nos menores horizontes, e o maior viés nos maiores horizontes de previsão. Já o ECMWF-pf apresentou desempenho muito parecido com a chuva observada considerando todos os dados, e um viés negativo nos maiores horizontes de previsão considerando apenas as altas vazões.

- O coeficiente de correlação mostrou a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que a previsão determinística apresentou um desempenho superior que dos ensembles do GEFS e do CPTEC-pf. O Super Ensemble não apresentou benefícios em relação ao ECMWF-pf.

- O CRPS médio indicou o CPTEC-pf como o melhor desempenho entre as antecedências de 50h e 150h. Contudo, nas maiores antecedências o CPTEC-pf obteve o pior desempenho. Para esta estatística, de uma forma geral o ECMWF-pf obteve valores baixos,

inclusive menores que a previsão com chuva observada, até o horizonte de previsão de 300h. O super ensemble apresentou desempenho melhor que todos os demais modelos, e o ECMWF-fc (previsão determinística de referência) apresentou desempenho pior.

- Os Rank Histograms computados indicaram uma tendência geral de pouco espalhamento dos ensembles, inclusive para os maiores intervalos de tempo. Nos resultados considerando somente as altas vazões verifica-se também esta falta de espalhamento, apesar de não serem consideradas as longas recessões nas análises. Adicionalmente, para as maiores vazões e com o aumento do horizonte de previsão também foi verificada uma tendência de viés negativo nas vazões, com um formato de rampa mais expressivo nos últimos horizontes.

- As análises de BS indicaram também a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se que a previsão determinística apresentou um desempenho geralmente inferior ao do GEFS e do ECMWF-pf no horizonte de previsão. Já o CPTEC-pf apresentou resultados piores que a previsão determinística a partir do horizonte 144h na análise de 1400m<sup>3</sup>/s e resultados piores que a determinística em praticamente todos os horizontes na análise de 2500m<sup>3</sup>/s. Já na comparação com o Super Ensemble, não foi detectado nenhum benefício padrão no uso da combinação de dados.

- A análise das curvas ROC indicou um desempenho superior dos percentis superiores do ECMWF-pf na detecção dos limiares de cheia, seguido pelo GEFS e depois o CPTEC-pf. Contudo, para os limiares mais altos e horizontes de previsão mais altos o GEFS se destacou mais. Na comparação com a previsão determinística em geral os EPS sempre tiveram um desempenho melhor. Inclusive na comparação com a previsão usando chuva perfeita os resultados dos EPS foram superiores, especialmente até as antecedências 240h. Na comparação com o Super Ensemble os resultados foram similares ao ECMWF-pf.

- Na análise dos Reliability Diagrams os resultados apontaram para uma tendência geral dos modelos de mostrar um viés condicional do tipo I positivo. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais correspondentes observadas. O desempenho dos modelos tendeu a ser melhor para o ECMWF-pf. A contagem de amostras em cada classe foi predominantemente maior na primeira classe de probabilidades.

- A análise de consistência das previsões sugeriu que as previsões por conjunto sempre foram mais consistentes entre si do que a previsão determinística de referência. Além disso, a consistência obtida com o ECMWF-pf e o Super Ensemble foi muito similar a obtida com a previsão usando chuva observada.

Estes resultados são uma fotografia geral do desempenho dos EPS, modelo determinístico, e Super ensemble para a previsão de vazões na bacia do rio São Francisco. Com ela é possível avaliar os resultados dos modelos visando responder as perguntas levantadas na pesquisa.

Observa-se que as previsões possuem em geral um viés negativo, com tendência de subestimativa especialmente nos maiores horizontes de previsão e maiores vazões. Isto é uma indicação de que os valores geralmente sugeridos pelos membros do conjunto e por sua média são menores do que os valores de vazões observadas nestes casos, devendo isto ser levado em conta na hora da interpretação dos resultados.

A calibração das previsões por conjunto também não é perfeita, estando sujeitas geralmente a superestimativas nas probabilidades de ocorrência de eventos. Também, o espalhamento das previsões não é o ideal, onde todos os EPS apresentaram pouco espalhamento em todos os horizontes de previsão. Estas duas considerações sugerem que não é possível confiar plenamente no espalhamento dos membros como uma medida de incerteza nas previsões.

Apesar destas fraquezas, as previsões probabilísticas, principalmente as do ECMWF-pf, sempre se sobressaíram sobre as previsões determinísticas, indicando benefícios no uso de ensembles tanto no quesito erros diretos quanto para a detecção de limiares de cheias.

Ainda, em algumas métricas como CRPS médio e curvas ROC o desempenho dos ensembles chegou a superar resultados obtidos com previsões usando chuva observada. Provavelmente isto está em parte relacionado com a falta de mais dados telemétricos de observação de chuva na bacia, mas também atesta que os EPS possuem resultados próximos das observações.

Dentre os EPS, o que mais se destacou através das métricas foi o ECMWF-pf, com resultados em geral superiores que os demais, que a previsão determinística, e que as previsões com chuva observada. Contudo o ECMWF-pf também foi o modelo que apresentou mais viés negativo para altas vazões no último horizonte de previsão.

Na análise de composição do Super Ensemble verificou-se que em alguns casos, como no CRPS médio, existiu uma vantagem na composição do conjunto usando todos os modelos. Todavia, no conjunto de métricas avaliadas isto não foi um padrão. Muitas vezes o desempenho do Super Ensemble foi similar ou ligeiramente inferior ao ECMWF-pf.



### 7.1.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio São Francisco

Em termos de qualidade geral das previsões dada por métricas como o EMA, EMR, CRPS e Correlação, nas análises de chuva para a bacia do rio Alto São Francisco foi verificado que as chuvas do ECMWF-pf geralmente apresentam os menores erros e maiores correlações, com algumas subestimativas nas maiores chuvas (análises com limiares) e maiores horizontes de previsão, seguido respectivamente do GEFS e do CPTEC-pf. Este comportamento também foi verificado nas análises vazões, onde geralmente o ECMWF-pf mostrou menores erros e melhores correlações.

O comportamento geral do CPTEC-pf na análise dos erros da chuva apresentou maiores erros, assim como na vazão. Contudo, é possível afirmar que os erros foram mais expressivos nas análises de vazão do que nas de chuva, onde as curvas que representam os erros do CPTEC-pf nas vazões previstas se distanciam mais das curvas dos outros modelos, principalmente nos maiores horizontes de previsão (maiores do que cinco dias). Isto provavelmente está relacionado com a acumulação dos erros que pode ser cometida quando o modelo hidrológico é forçado com chuvas previstas incertas, conforme discutido no capítulo de verificação dos modelos ao viés na chuva.

Também para as métricas de erros gerais, o GEFS foi verificado em ambas as análises como o EPS com desempenho intermediário entre os dois demais EPS. E o Super Ensemble apresentou um desempenho em geral similar ou próximo ao ECMWF-pf individualmente tanto nas análises de chuva quanto de vazão.

Apesar destas semelhanças entre as análises de chuva e vazão, também são encontradas distinções entre as análises. A primeira delas é dada pelas análises de climatologia do coeficiente de variação, que mostram geralmente valores próximos da unidade para a chuva, incluindo alguns valores maiores em épocas menos chuvosas, obtidos pelos cálculos usando números pequenos. Já nas previsões de vazão os coeficientes de variação possuem um formato de “U” bem marcado, indicando que as grandes incertezas se concentram nos períodos úmidos, e geralmente os valores se situam abaixo de um. Nas análises de vazão também as diferenças entre os modelos são mais evidentes, especialmente nos maiores horizontes de previsão.

A segunda diferença é a dada pelas métricas relacionadas com a detecção de limiares, como as curvas ROC e o BS. A ocorrência de determinadas cheias na bacia não pode ser

simplesmente relacionada a limiares de chuva média, já que a ocorrência de uma cheia depende de muitos outros fatores, como a umidade do solo no momento da ocorrência das chuvas e a distribuição espacial das precipitações. Assim, por mais que tenham sido avaliados diferentes limiares de chuva, eles não contêm as mesmas informações do que as análises feitas para os limiares de vazão. Isto é importante no contexto da UHE Três Marias, por exemplo, pois ela possui uma operação que visa amortecer cheias a jusante.

O mesmo raciocínio é válido para as análises dos *reliability diagrams*, que demonstram em geral curvas de calibração diferentes entre as obtidas analisando a vazão e as analisando a chuva. Apesar da tendência de viés condicional tipo I positivo em ambas as análises de vazão e chuva, o viés foi mais expressivo na vazão.

Os Rank Histograms, que medem o espalhamento das previsões, sempre indicam um grande viés negativo nas análises de chuva. Este viés de fato é observado também nas análises de vazão, contudo com uma curva em forma de “rampa” ou “L invertido” mais suave do que as curvas da chuva. Conforme o verificado nas análises de sensibilidade do modelo hidrológico, ele insere mais incerteza nas previsões, de forma que os Rank Histograms ficam um pouco mais espalhadas quando passam pelo modelo hidrológico.

Outra grande diferença entre os resultados das análises de métricas pra chuva e vazão é a ocasionada pela assimilação de dados no modelo hidrológico (que, cabe aqui dizer, é diferente da assimilação de dados nos modelos meteorológicos), e pela incerteza adicionada à previsão pela modelagem hidrológica ao longo da previsão (evolução dos estados do modelo hidrológico ao ser forçado pela chuva prevista). Em todos os resultados de vazão nota-se um aumento dos erros, de valores muito próximos do considerado ideal no início da previsão para valores mais elevados ao final da previsão. Já nas análises de chuva, esta mudança das características dos ensembles ao longo dos horizontes de previsão é bem menos evidente, com alterações mais discretas entre o início e o fim da previsão. Além de isto ser visto nas métricas de qualidade, também pode ser visto na própria análise de coeficientes de variação.

Estas diferenças dadas pelas análises de chuva e vazão demonstram a transformação que a informação de chuva prevista sofre quando usada no modelo hidrológico, também adicionando incertezas, para gerar a informação de vazão. Estes efeitos podem ser atribuídos aos processos geração de escoamento pelo modelo, que incluem diferentes processos desde a geração direta de escoamento superficial até a geração de vazão provinda de fluxo de base, após a infiltração da água. E também a propagação de vazões entre diferentes regiões da bacia.

---

Como principal nota da comparação entre os resultados de chuva e vazão na bacia do rio São Francisco, pode-se dizer que uma análise apenas da precipitação média sobre a bacia serviu para indicar características gerais que podem ser esperadas nas previsões de vazão, como vieses nas grandes precipitações (e conseqüentemente nas cheias), e dar indicações do desempenho médio esperado na utilização de diferentes modelos. Contudo, ela não é capaz de fornecer informações de aspectos importantes na previsão hidrológica relacionados com a capacidade de detecção de limiares de cheia, espalhamento do conjunto, calibração da previsão, e incertezas que são incluídas simplesmente pela utilização do modelo hidrológico, como as alterações do desempenho da previsão devido à assimilação de dados, impacto da calibração do modelo hidrológico, e a variação dos estados do modelo hidrológico ao longo da previsão.

---

## 7.2. Bacia do Rio Doce

Para a bacia do Rio Doce também foram selecionados dois limiares de vazão para o cálculo das métricas de desempenho. Os valores escolhidos foram  $1600\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ .

Assim como no caso de Três Marias, o valor de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  foi escolhido por que representa aproximadamente a vazão  $Q_{10}$  da curva de permanência da vazão afluyente a UHE Aimorés. Este é um valor relativamente alto de vazão que indica o início de uma situação de cheia na bacia.

Neste caso também este valor foi usado nas análises tanto para as métricas de ultrapassagem de detecção de eventos discretos, quando para as demais métricas de qualidade da previsão. Nestes últimos casos o limite foi usado visando considerar nos cálculos apenas o desempenho para altas vazões observadas, excluindo da medida de desempenho os longos períodos de recessão do hidrograma onde geralmente as previsões de chuva são iguais a zero e os resultados são puramente dependentes de observações e do modelo hidrológico.

Já o valor de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  corresponde ao valor adotado pela CEMIG como o limiar a ser detectado nas previsões de vazão para a execução da operação de “*pass thought*” no reservatório da UHE Aimorés. Esta é uma operação de limpeza de sedimentos do reservatório da usina que depende da detecção de cheias acima de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  entre 5 e 10 dias de antecedência para que possa ser executada.

Este limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  foi usado no cálculo de métricas relacionadas com eventos discretos.

Os resultados das análises de previsão de vazão para a Bacia do Rio Doce, para cara uma das métricas avaliadas, são apresentados a seguir.

### 7.2.1. Análises Visuais

Para a análise visual das previsões de vazões na bacia do Rio Doce foram escolhidas também três entre as maiores cheias que ocorreram no período analisado e os seus hidrogramas previstos com alguns dias de antecedência foram plotados e analisados.

As seguintes previsões foram plotadas:

- 14/12/2008 00h
- 28/02/2011 00h
- 29/12/2011 12h

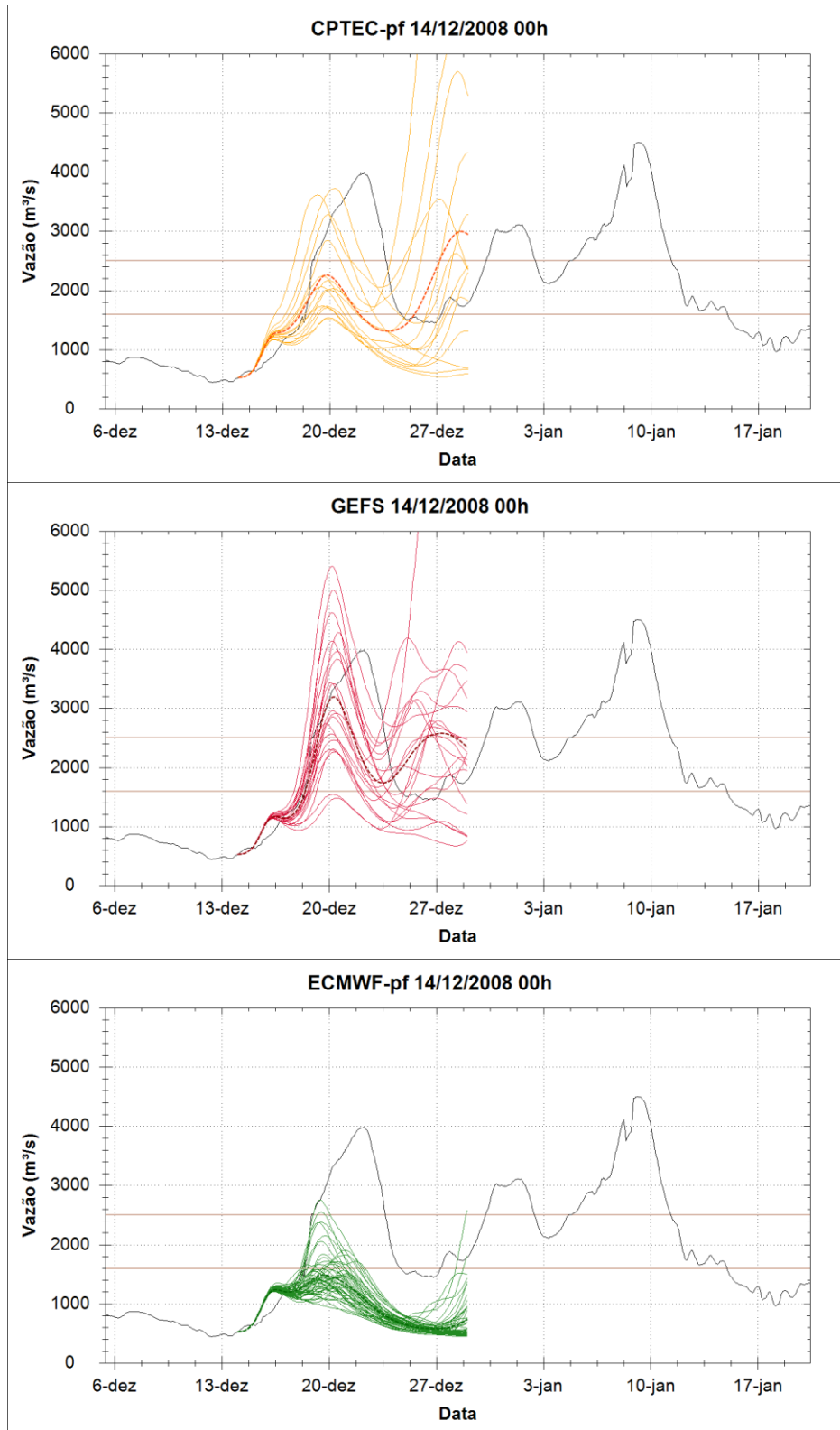
Foram analisadas as previsões para as seis fontes de dados de precipitação prevista consideradas neste trabalho: CPTEC-pf, GEFS, ECMWF-pf, Super Ensemble (combinação dos três EPS), ECMWF-fc (previsão determinística de referência), e chuva observada.

Na descrição das análises visuais foram considerados os seguintes aspectos nos hidrogramas:

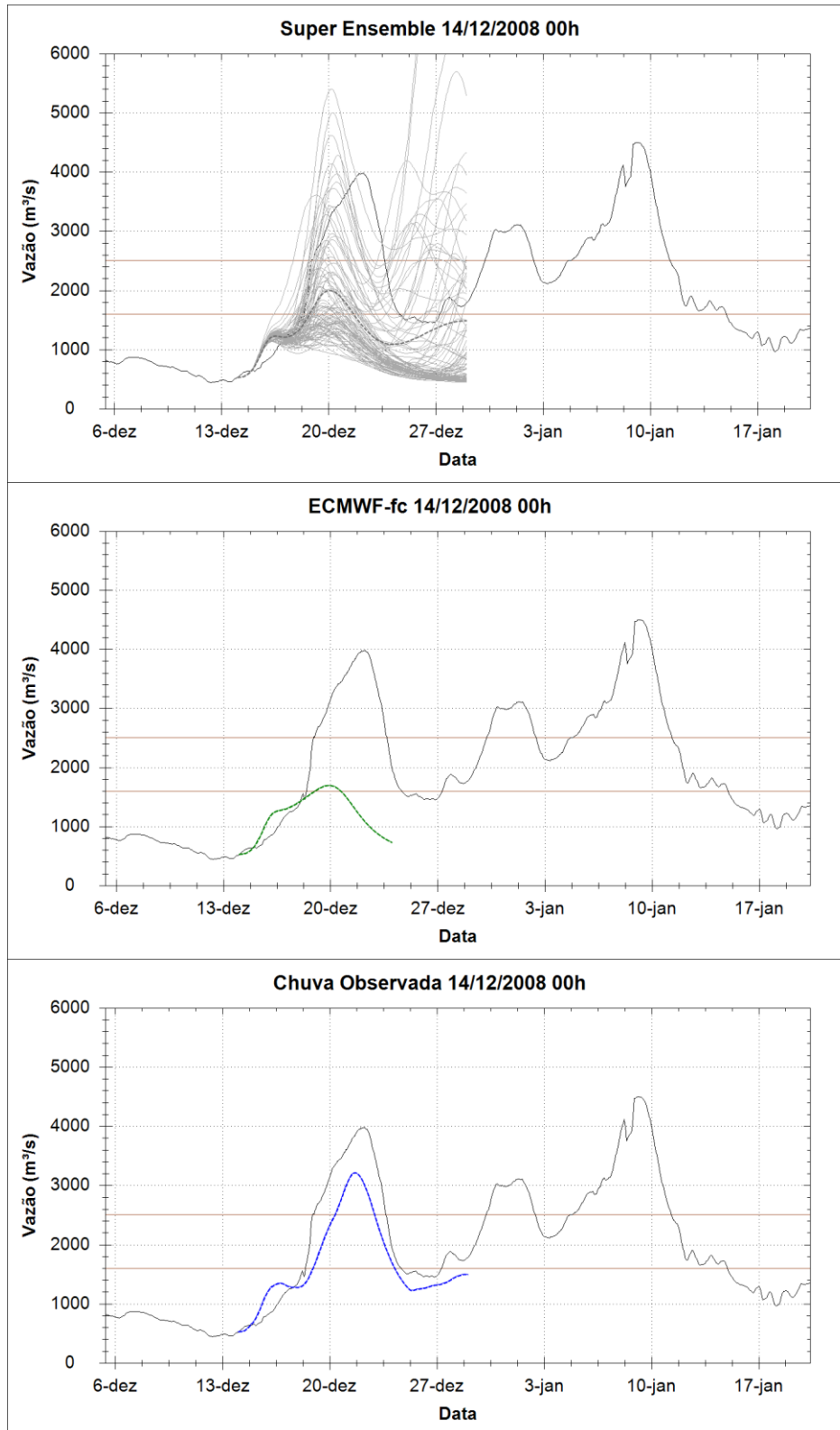
- Capacidade de prever o pico da cheia;
- Erro da média e dos limites inferiores e superiores dos conjuntos;
- Capacidade de abranger as observações entre os membros dos conjuntos;
- Se a concentração de membros indicou as maiores probabilidades de ocorrência;
- Capacidade das previsões em discriminar a ultrapassagem de limiares ( $1600\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ ).

A Figura 128 e a Figura 129 apresentam as previsões feitas no dia 14/12/2008 às 00h para o início da cheia afluyente a UHE Aimorés no período chuvoso de 2008/2009. O evento de cheia a ser previsto teve pico de  $4000\text{m}^3/\text{s}$  no dia 23 de Dezembro, enquanto que no dia da previsão as vazões ainda estavam em torno de  $500\text{m}^3/\text{s}$ .

Na previsão emitida pelo CPTEC-pf alguns membros do conjunto indicaram a subida do hidrograma e o pico da cheia, embora com valores subestimados e um pouco adiantados. No quesito de ultrapassagem do limiar os membros indicaram com boa concordância a ultrapassagem do limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ , e um número menor de membros a ultrapassagem do limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . O espalhamento do CPTEC-pf nesta previsão foi grande, envolvendo a observação até o dia 20 de Dezembro e sugerindo grande incerteza no futuro após os primeiros dias da previsão. A média do conjunto apresentou uma tendência geral de subestimativa das vazões. Adicionalmente a previsão nos maiores dias de horizonte também indicou a possível ocorrência de uma segunda grande cheia, em uma data que coincidiu com a recessão do hidrograma.



**Figura 128.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 14/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 129. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 14/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

Na previsão do GEFS os membros do conjunto sinalizaram a subida do hidrograma com bom acompanhamento das observações, e espalhamento do conjunto muito pequeno na ultrapassagem dos limiares, indicando pouca incerteza nos eventos que realmente ocorreram. O pico da cheia foi previsto um pouco adiantado, mas com espalhamento cobrindo de forma coerente as observações. A média do conjunto teve um desempenho também muito próximo das observações até aproximadamente o dia 20 de Dezembro. Nos maiores horizontes de previsão o GEFS também previu a ocorrência de uma segunda cheia com grande parte de seus membros. Porém, esta cheia não foi efetivamente observada.

Já na previsão de vazão feita com o ECMWF-pf foi verificado um desempenho que pode ser considerado ruim. A maioria dos membros e a média do conjunto não apontaram para a possibilidade de ocorrência do evento da grande cheia. Apenas um pequeno número de membros do conjunto indicou a ultrapassagem do menor limiar, e um único membro a ultrapassagem do maior limiar. Ficando o pico da cheia subestimado.

Na previsão com o Super Ensemble o efeito do ECMWF-pf se fez presente, mostrando um grande número de membros subestimando a vazão da cheia, assim como a média do conjunto. Todavia, a presença das previsões do CPTEC-pf e do GEFS também mostrou um grande número de membros indicando a ocorrência do pico de cheia. Em termos de espalhamento, os membros cobriram de forma adequada as observações.

A previsão determinística de referência apresentou uma trajetória futura muito similar às observações até a ultrapassagem do limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ . A partir deste momento a tendência geral foi de uma subestimativa do pico também, não ultrapassando  $1700\text{m}^3/\text{s}$ . Em comparação com as previsões probabilísticas do GEFS e do CPTEC-pf, a informação sobre a possibilidade de uma grande cheia é inferior nesta previsão determinística. Isto também é válido para a previsão do ECMWF-pf, que apesar das grandes subestimativas, pelo menos alguns membros sugeriram a possibilidade da ultrapassagem do limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ .

Já a previsão com chuva observada do evento de cheia analisado apresentou boa coerência relacionada com o acompanhamento do hidrograma observado e das ultrapassagens dos limiares, porém com uma subestimativa dos valores de vazão.

A Figura 130 e a Figura 131 apresentam as previsões feitas no dia 14/12/2008 às 00h para uma cheia afluyente a UHE Aimorés que ocorreu no período chuvoso de 2010/2011. O evento de cheia a ser previsto teve pico de  $2400\text{m}^3/\text{s}$  no dia 11 de Março, não chegando a ultrapassar o limiar de interesse de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . No momento em que as previsões foram emitidas, a vazão era de aproximadamente  $600\text{m}^3/\text{s}$ .



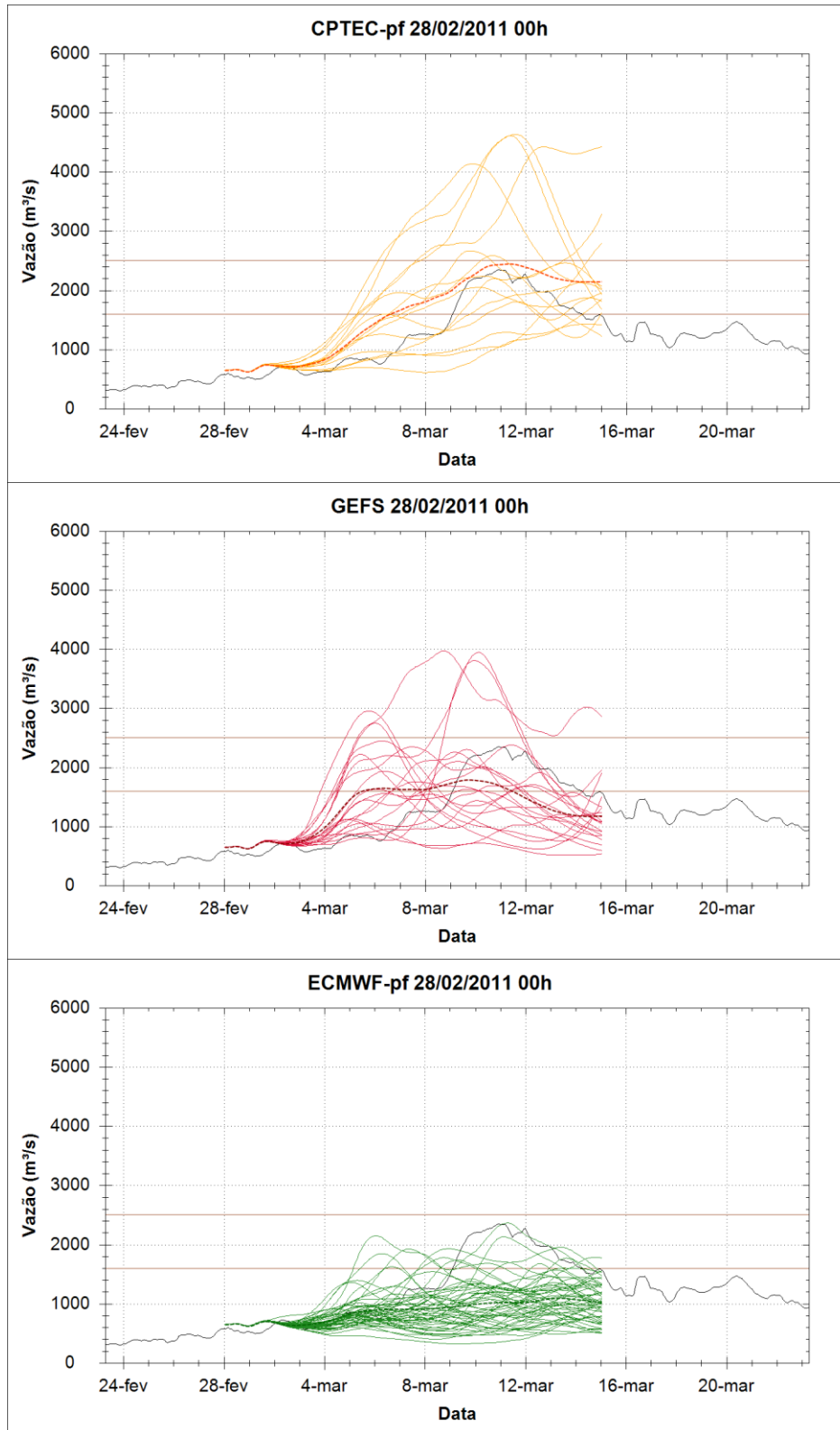
O CPTEC-pf apresentou neste evento uma ampla distribuição de seus membros depois do dia 4 de março, onde cinco dos seus quatorze membros apresentaram resultados sugerindo a ultrapassagem do limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  ao longo do horizonte de previsão, e três membros sugeriram vazões baixas ao longo do horizonte. Esta distribuição indicou muita incerteza no horizonte de previsão. A média do conjunto, no entanto, apresentou um bom desempenho, com vazões máximas muito próximas das observadas.

O GEFS apresentou em seu conjunto alguns membros com pico adiantado em relação às observações, chegando a vazões de quase  $4000\text{m}^3/\text{s}$ . Em geral as indicações do modelo de ultrapassagem do limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  foram feitas com antecedência, e o espalhamento dos membros foi grande, sugerindo alta imprevisibilidade. O maior número de membros sugeriu vazões baixas e a média do conjunto apresentou-se com volumes menores que às observações. Todavia, as observações do pico foram capturadas pelas previsões.

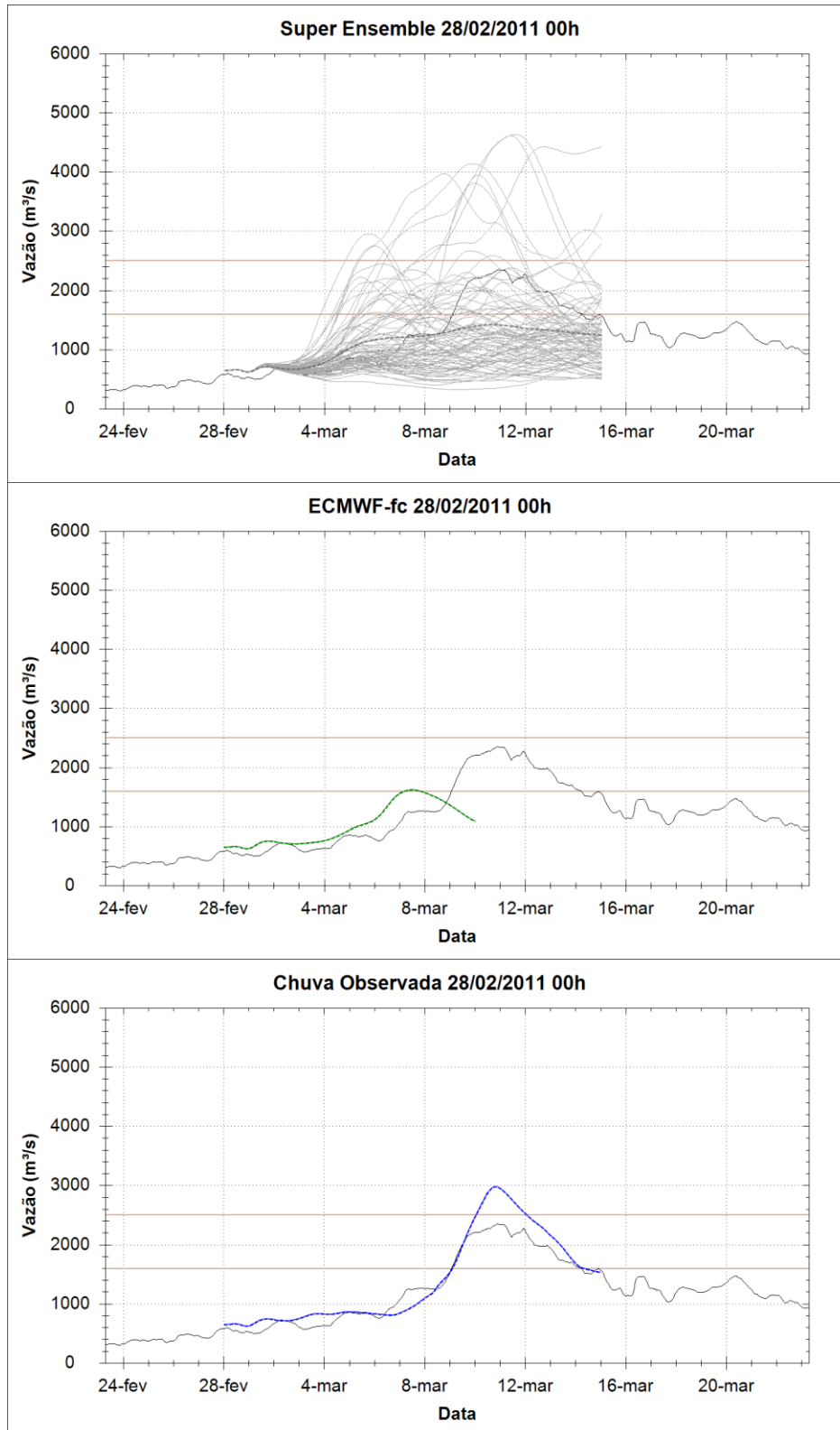
O ECMWF-pf, ao contrário dos outros modelos, não apresentou nenhum membro em suas previsões acima do limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ . Contudo, ele apresentou uma grande concentração de membros abaixo das observações, em uma configuração típica de um viés negativo nos dados. Apenas alguns membros do ECMWF-pf apresentaram previsões de pico próximas da observação. Contudo, até aproximadamente o dia 5 de Março este foi o modelo com a maior concentração de membros mais próximos da observação, e apesar do viés, o seu espalhamento geralmente incluiu o pico de cheia.

O Super Ensemble mostra em sua composição um cenário bem abrangente de futuro, com alguns membros sugerindo a ultrapassagem de limiares de previsão e picos adiantados. Contudo, nos primeiros 6 dias do horizonte de previsão a concentração de membros foi maior nas proximidades das observações, e nos horizontes maiores de previsão, apesar da grande influência do ECMWF-pf, vários membros também sugeriram a ocorrência de vazões próximas da observação. Em termos de espalhamento, as observações sempre ficaram compreendidas dentro dos ensembles.

A previsão determinística do ECMWF-pf mostrou neste evento um bom acompanhamento das observações até aproximadamente o dia 5 de março. Quando as vazões foram um pouco subestimadas, sugerindo uma ocorrência adiantada do limiar de cheia de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ . Ainda, a ocorrência do pico principal foi subestimado. Neste sentido, novamente as previsões por conjunto pelo menos indicaram a possibilidade de ocorrência do evento, o que não foi o caso da previsão determinística.



**Figura 130.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600 $m^3/s$  e 2500 $m^3/s$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 131. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1600m^3/s$  e  $2500m^3/s$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

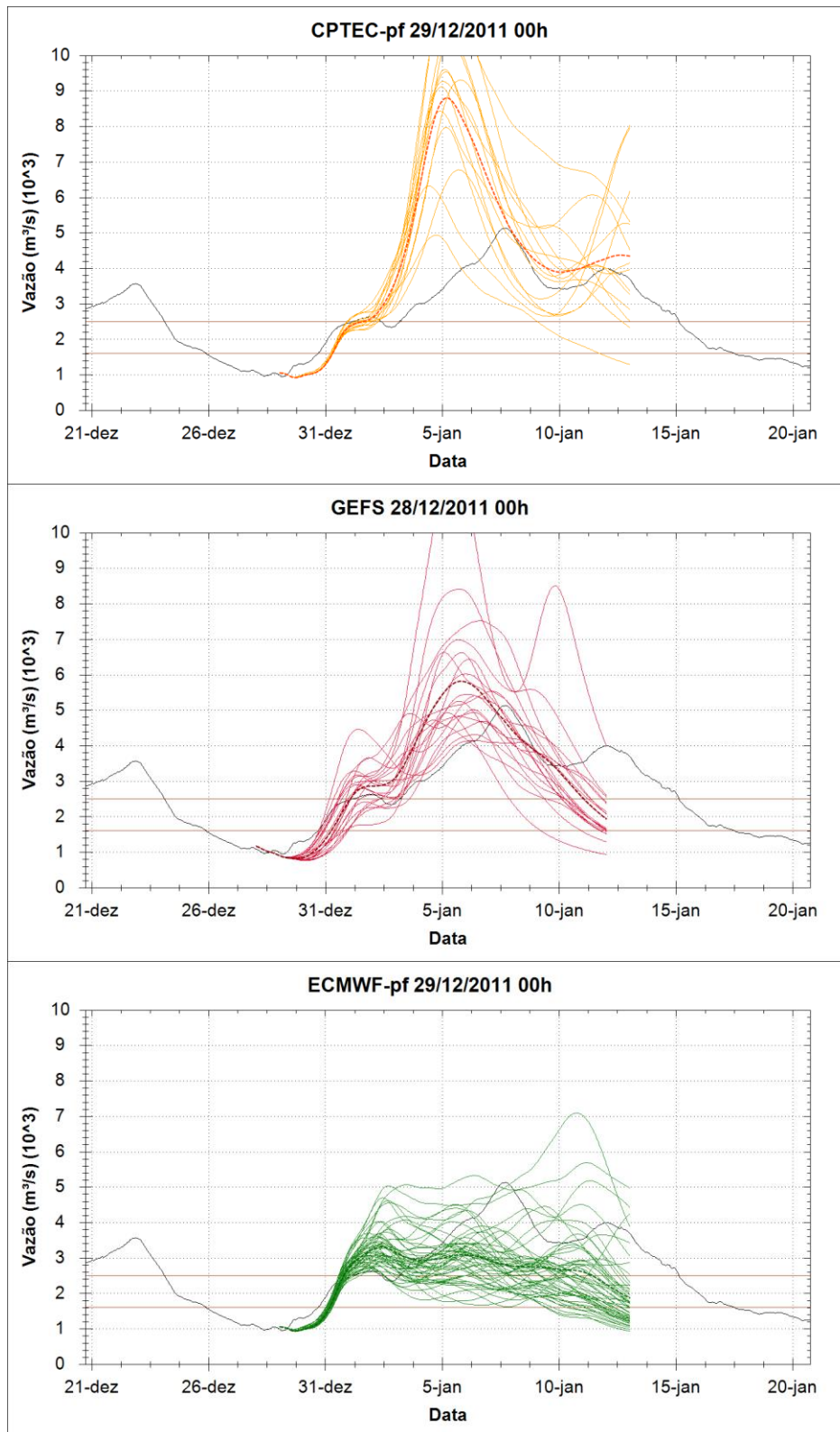
Já a previsão com chuva observada do evento mostrou um desempenho muito adequado, com uma boa representação do hidrograma. O único ponto negativo desta previsão é que ela também sugeriu a ultrapassagem do limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , o que efetivamente não aconteceu.

A Figura 132 e a Figura 133 apresentam as previsões feitas no dia 28/12/2011 às 00h para o início de uma cheia afluyente da UHE Aimorés no período chuvoso de 2011/2012. O principal pico do evento de cheia ocorreu entre os dias 6 e 8 de Janeiro de 2012, com vazões máximas maiores do que  $5000\text{m}^3/\text{s}$ .

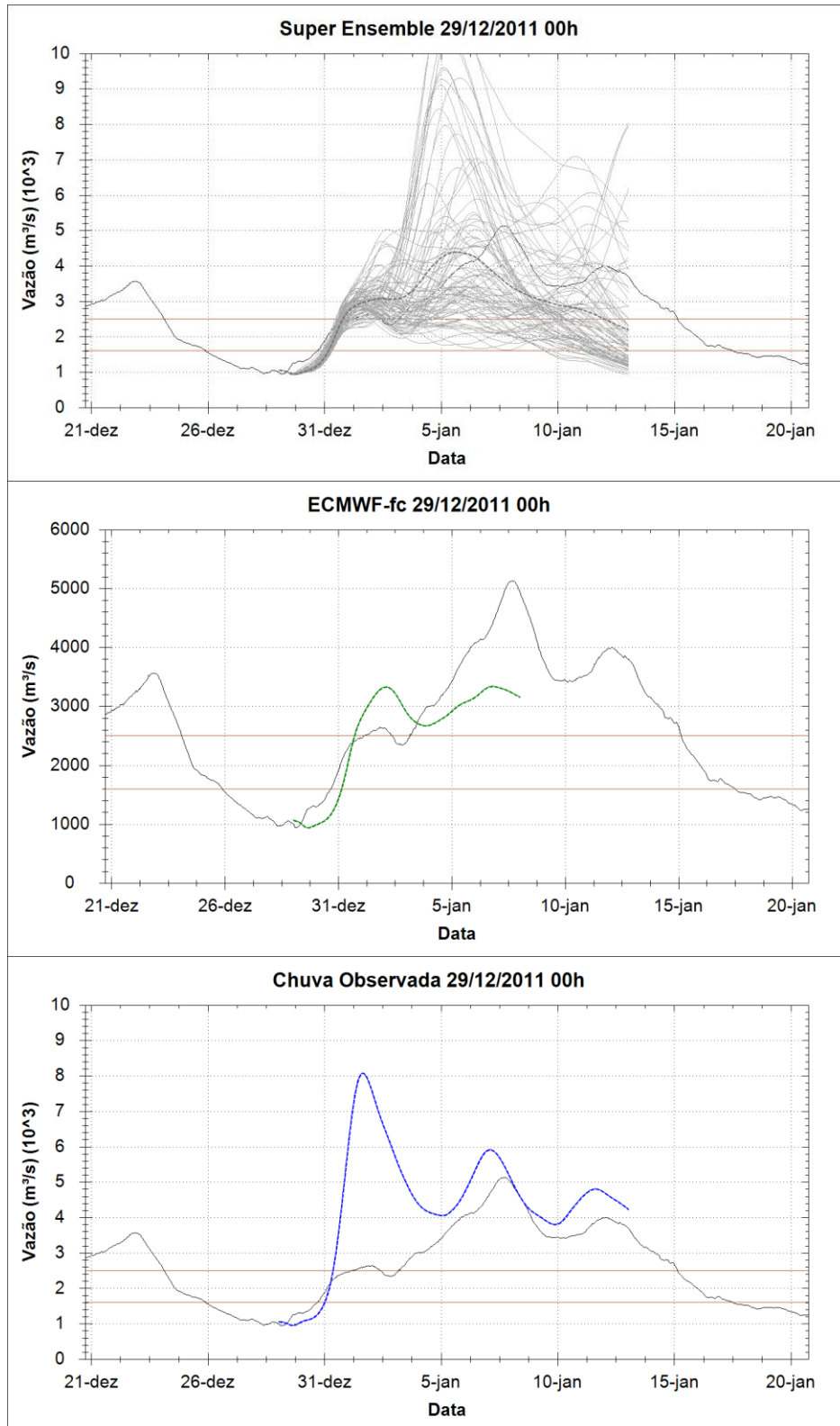
Os membros do CPTEC-pf nos menores horizontes de previsão, até o momento da ultrapassagem dos limiares de cheia, apresentaram resultados concordantes e muito próximos das observações. Contudo, a partir do dia 3 de Janeiro as previsões indicaram a ocorrência de grande pico de vazão, chegando a valores maiores que  $10.000\text{m}^3/\text{s}$ , inclusive com a média do conjunto indicando vazões próximas de  $9000\text{m}^3/\text{s}$ . Esta ocorrência foi indicada pela maioria dos membros, e o espalhamento dos membros foi inadequado, sendo distante das observações.

O GEFS, por sua vez, apresentou uma previsão visualmente muito adequada com a ocorrência do evento. Os membros do conjunto mostraram uma boa concordância em relação a ultrapassagem dos limiares, bem como da ocorrência da principal cheia. Apesar de ela ter sido indicada com um dia de antecedência. Os membros mais elevados do conjunto chegaram a indicar a possibilidade de cheias maiores que  $10.000\text{m}^3/\text{s}$ , mas o maior número de membros se concentrou próximo e abrangeu bem as observações.

As previsões do ECMWF-pf considerando a ultrapassagem dos limiares também apresentaram muita concordância e resultados adequados. Contudo, para as maiores antecedências observou-se no ECMWF-pf novamente uma forte tendência de subestimativa dos resultados, com uma grande número de membros abaixo das observações. Os membros superiores do conjunto chegaram a indicar a ocorrência de altas vazões, contudo, a média e a maior concentração de membros apontaram para valores abaixo do observado.



**Figura 132.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 29/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de 1600m<sup>3</sup>/s e 2500m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 133. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 29/12/2008 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, as linhas horizontais os limiares de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  e  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

O Super Ensemble, apresentou em sua composição as características negativas das previsões do CPTEC-pf e do ECMWF-pf. Com isso, seus resultados também foram adequados para a ultrapassagem dos limiares, mas posteriormente apresentaram muitos membros abaixo das observações e membros sugerindo a ocorrência de cheias maiores que  $10.000\text{m}^3/\text{s}$ . Mas, os erros na média do Super Ensemble foram relativamente pequenos até o dia 5 de Janeiro, e o seu espalhamento sempre compreendeu as observações.

A previsão determinística do ECMWF-fc mostrou-se também muito eficiente na previsão dos limiares no momento certo. Já na ocorrência do maior pico do evento de cheia ela tendeu a indicar uma subestimativa. Apesar de o erro em geral não ter sido alto, a única trajetória prevista não trouxe informações que possam versar sobre a real magnitude possível do evento.

A previsão com chuva observada deste evento apresentou um erro muito grande após o dia 31 de Dezembro. Provavelmente devido a pouca informação de chuva na bacia, os valores observados neste evento foram superestimados, indicando uma previsão de  $8000\text{m}^3/\text{s}$  nos primeiros dias de Janeiro, que efetivamente não se concretizou. Apesar deste erro, o pico que efetivamente ocorreu foi previsto com boa proximidade pelo modelo.

Este resultado sugere novamente como a falta de dados adequados de chuva pode impactar a modelagem hidrológica de forma negativa.

### 7.2.2. Análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação dos ensembles de vazão

Na Figura 134 é apresentada uma análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a previsão foi emitida (climatologia dos desvios padrão). Os valores apresentados para cada mês correspondem ao valor médio computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.

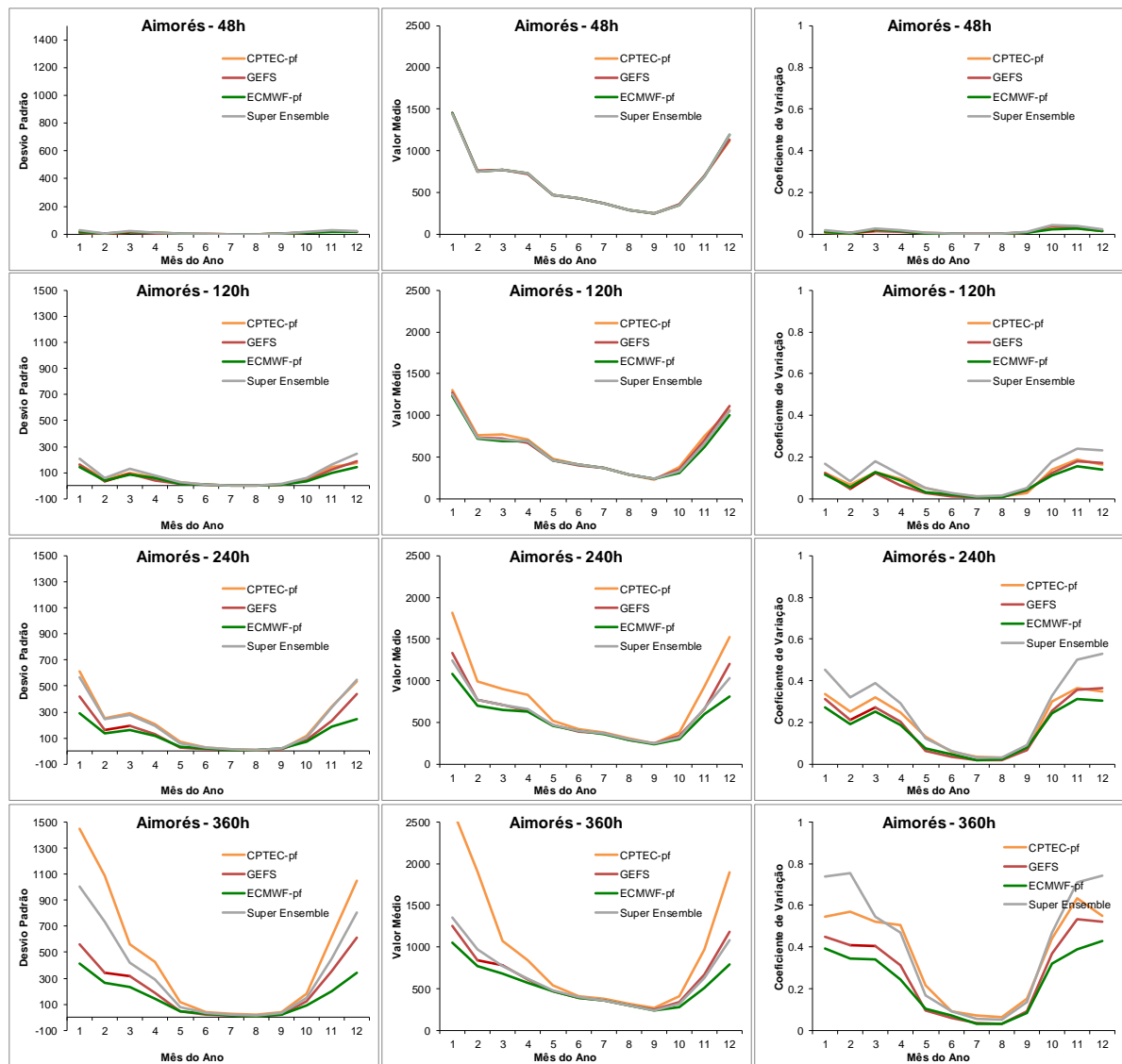


Figura 134. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Rio Doce, no ponto da UHE Aimorés.



Nestes resultados, nota-se que o espalhamento do conjunto é praticamente nulo em todos os meses para o horizonte de previsão de 48h. Isto acontece por que neste horizonte de previsão os resultados ainda se comportam da mesma forma que uma previsão determinística, devido a maior dependência das condições observadas do que as previstas.

Nas demais antecedências dos resultados o formato de “U” das curvas mostra novamente que durante os meses secos (Maio a Setembro) o desvio padrão das previsões é pequeno, possivelmente por que todos os membros do conjunto preveem chuvas próximas de zero nesta época do ano. Já durante os meses úmidos (Outubro a Abril) os valores de desvio são maiores, que é o período chuvoso na bacia.

Com o aumento dos horizontes de previsão o CPTEC-pf mostrou um grande aumento em comparação com os demais EPS no desvio padrão das previsões para o período chuvoso. Os valores variaram de cerca de  $120\text{m}^3/\text{s}$  (120h) para mais de  $1250\text{m}^3/\text{s}$  (360h) em Janeiro.

Os demais EPS também mostraram um aumento nos desvios padrão com o horizonte de previsão. O GEFS apresentou valores que variaram de cerca de  $120\text{m}^3/\text{s}$  (120h) para cerca de  $500\text{m}^3/\text{s}$  (360h) em Janeiro. E o ECMWF-pf apresentou valores que variaram de cerca de  $120\text{m}^3/\text{s}$  (120h) para cerca de  $400\text{m}^3/\text{s}$  (360h) em Janeiro. Nestes casos, o ECMWF-pf foi o EPS com menor desvio dentre os analisados.

Em relação ao comportamento do Super Ensemble, seus desvios foram em geral similares ou um pouco menores que os desvios do CPTEC-pf, e maiores que os dos demais EPS. Como exemplo, ele apresentou valores que variaram de cerca de  $200\text{m}^3/\text{s}$  (120h) para cerca de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  (360h) em Janeiro.

Em termos de média, o CPTEC-pf apresentou um comportamento que pode ser considerado incomum, com uma grande mudança em sua média para os meses úmidos entre os horizontes de previsão maiores e menores.

Para o coeficiente de variação, nota-se que em geral os coeficientes de variação do Super Ensemble são os maiores, indicando ele possui uma maior abrangência em seu conjunto do que os EPS individualmente. Já o ECMF-pf mostrou em geral os menores coeficientes de variação nos maiores horizontes, indicando que este EPS é geralmente menos abrangente.

### 7.2.3. Erro Médio Absoluto

Os resultados obtidos para o Erro Médio Absoluto (EMA) de cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 135 e na Figura 136.

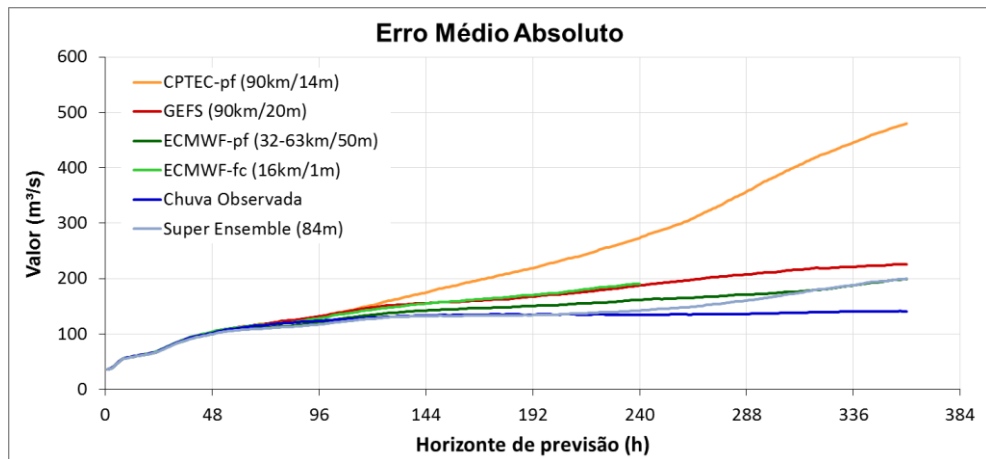


Figura 135. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados.

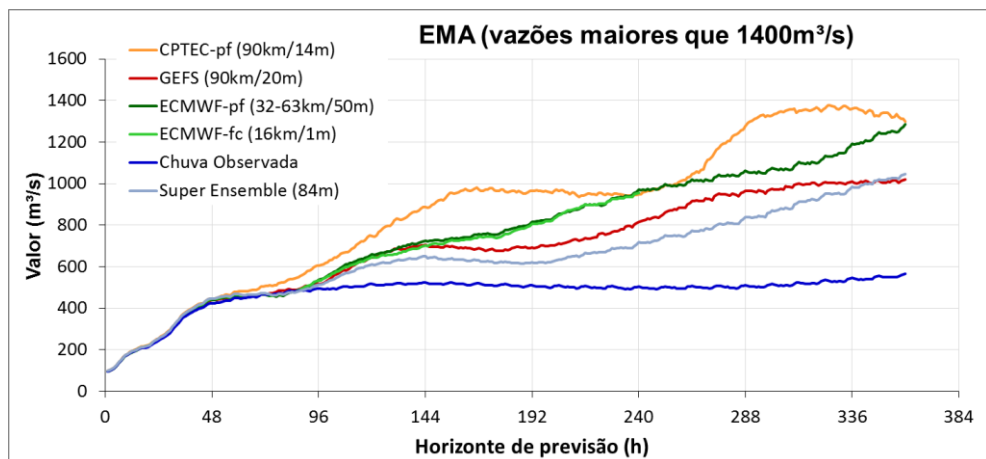


Figura 136. Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando vazões maiores que 1400m³/s.

Nos resultados, conforme esperado, o aumento do horizonte de previsão sugere um aumento nos erros, e os erros nos horizontes iniciais da previsão são similares para todas as fontes de dados. Os valores de EMA são praticamente iguais para as primeiras 32h e possuem poucas diferenças até pouco antes de 48h de horizonte. Isto acontece por que o tempo de concentração da bacia hidrográfica está situado dentro desta faixa de tempo, fazendo com que

todos os resultados iniciais dentro deste intervalo sejam mais dependentes dos valores observados na rede telemétrica e da assimilação de dados do que das previsões de chuva propriamente ditas. A partir destes horizontes de previsão os resultados entre os dados de chuva usados na previsão passam a diferir.

Na previsão com chuva observada nota-se que o modelo tem um desempenho com erros que variam dentro do horizonte de previsão entre  $40\text{m}^3/\text{s}$  até  $120\text{m}^3/\text{s}$  quando são considerados todos os dados, e erros que variam entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  e  $500\text{m}^3/\text{s}$  quando são consideradas apenas as altas vazões. A tendência dos erros neste caso é aumentar até cerca de 120h (5 dias) de horizonte de previsão, e posteriormente variar pouco com uma performance similar ao desempenho do modelo hidrológico rodando em modo de simulação puramente.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os maiores erros nas duas análises realizadas. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $490\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre  $420\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até pouco menos de  $1400\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h.

Os erros do GEFS foram menores que os do CPTEC-pf na análise considerando todos os dados, e foram os melhores entre os EPS na análise considerando somente as altas vazões. Os erros variaram entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $410\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre  $420\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h.

A média do ECMWF-pf foi a média do EPS com menores erros na análise com todos os dados, e teve um desempenho intermediário entre o CPTEC-pf e o GEFS na análise de altas vazões. Na primeira análise os erros variaram entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $200\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre  $420\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $1300\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h.

O Super Ensemble, composto pelos três EPS, apresentou um desempenho de erro médio absoluto superior aos demais EPS em todos os horizontes da previsão, sugerindo um benefício na composição do conjunto por todos os modelos. Provavelmente isto acontece por que a média da combinação dos modelos tende a compensar algumas deficiências dos modelos entre eles.

Já a previsão determinística ECMWF-fc apresentou um desempenho que pode ser considerado melhor ou equivalente ao CPTEC-pf. Na análise com todos os dados o seu

desempenho até as 240h foi muito próximo do GEFS, e na análise somente com altas vazões foi e muito similar a média do ECMWF-pf. Assim na comparação dos resultados determinísticos com a média dos conjuntos, em geral um dos EPS e o Super Ensemble sempre foi melhor que a previsão de referência. Mas também um dos EPS sempre foi pior que a determinística.

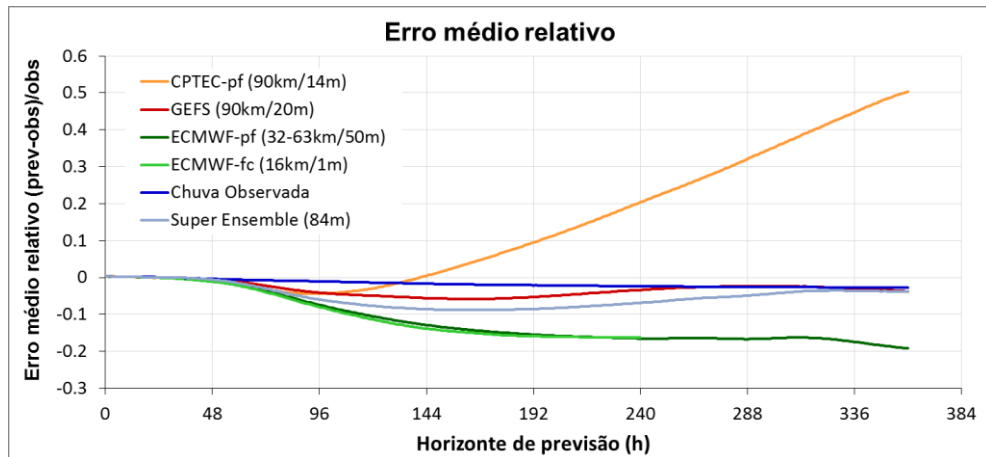
Na comparação das previsões com chuva perfeita com as previsões feitas utilizando os modelos meteorológicos é possível notar que no último horizonte de previsão os erros do CPTEC-pf chegam a ser mais que o dobro dos erros da previsão perfeita em ambas as análises. Já na análise com todos os dados os erros do GEFS e do ECMWF-pf são cerca de 40 a 60% maiores que os erros da previsão perfeita. Para a análise de altas vazões estas porcentagens são de 80% a 100%.

Especialmente a análise para todos os dados permite a interpretação de que uma parcela importante dos erros finais da previsão pode ter grande influência dos erros inerentes à modelagem hidrológica e aos dados observados, já que a distância entre as curvas de erro é relativamente menor que o erro da previsão perfeita em si.

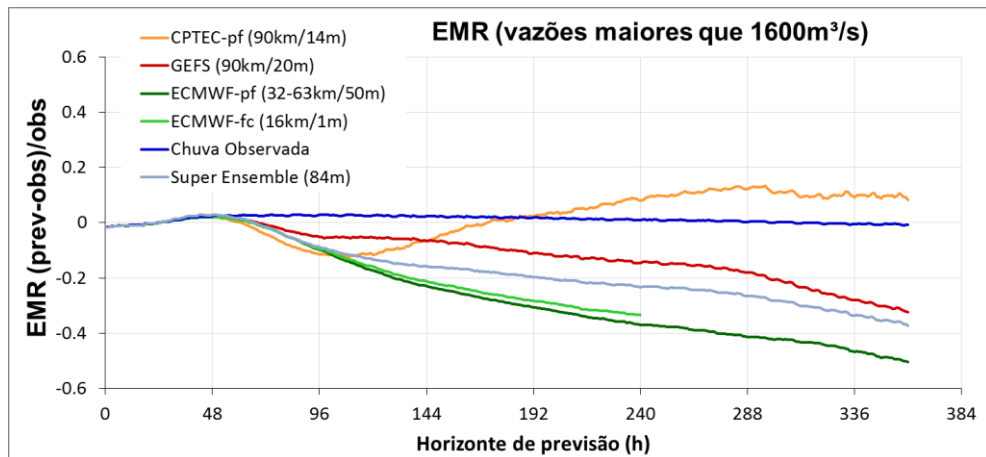
Ainda, é possível verificar na evolução da curva de EMA para todos os dados ao longo dos horizontes de previsão que nas antecedências de até cerca de 144h (6 dias) a diferença entre as curvas é relativamente pequena, não sendo tão expressiva a diferença entre os modelos e a previsão perfeita. Na análise de altas vazões esta diferença é mais destacada já a partir das 96h de previsão.

#### **7.2.4. Erro Médio Relativo**

Os resultados obtidos de Erro Médio Relativo (EMR) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 137 e na Figura 138.



**Figura 137. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados.**



**Figura 138. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando vazões maiores que 1400m³/s.**

Nos resultados de EMR também se notam aumentos dos erros com o aumento do horizonte de previsão, com uma maior diferenciação dos resultados dos modelos após os primeiros dois dias de horizonte de previsão (48h).

Na previsão com chuva observada os erros concentraram-se sempre em uma faixa próxima de zero, para ambas as análises realizadas, em todo o horizonte de previsão.

O CPTEC-pf na análise com todos os dados apresentou os maiores erros no maior horizonte de previsão, que variou de aproximadamente zero na antecedência de 120h chegando a cerca de 0,5 na antecedência de 360h. Para a análise considerando apenas as maiores vazões foi verificado um viés negativo de aproximadamente -0,15 na antecedência 96h e um viés positivo de cerca de 0,1 na antecedência de 360h.

Os erros do GEFS foram os mais próximos de zero na análise com todos os dados, apenas com uma pequena tendência negativa próxima da antecedência de 144h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros chegaram até cerca de -0,33 na antecedência de 360h.

O ECMWF-pf apresentou sempre uma tendência negativa em seus resultados. Na análise com todos os dados os erros chegaram a -0,2 na maior antecedência. E na análise das vazões eles chegaram a -0,56 na maior antecedência (360h). Por serem os resultados mais afastados de zero, estes podem ser considerados os piores resultados entre os EPS.

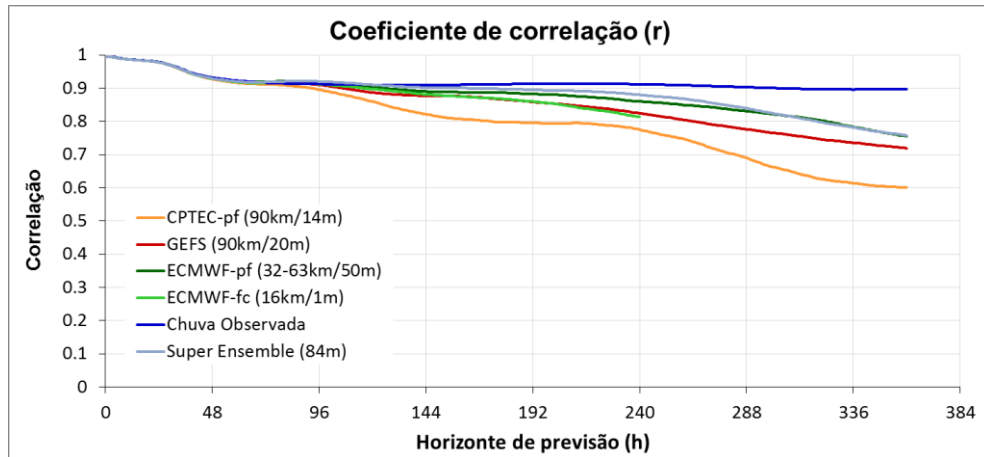
O Super Ensemble, composto pelos três EPS, apresentou um desempenho intermediário entre os erros do ECMWF-pf e do GEFS, com um viés negativo ao longo dos horizontes de previsão.

O ECMWF-fc (previsão determinística de referência) apresentou um comportamento muito similar a média do ECMWF-pf, com um viés negativo em seus resultados. Na análise considerando todos os dados os erros chegaram a até -0,16 na antecedência de 240h. Na análise para as maiores vazões os erros chegaram a -0,3.

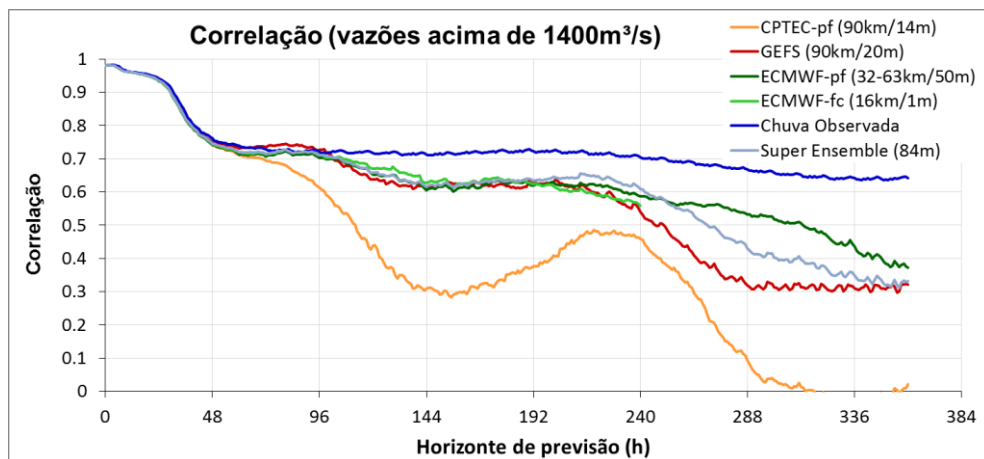
Sobre a comparação geral dos resultados, o CPTEC-pf mostrou um viés bem expressivo nas maiores antecedências para todos os dados, indicando que possivelmente ele tenda a forçar previsões de vazões altas mesmo nos períodos de recessão. Já o ECMWF-pf e a previsão determinística apresentaram um viés negativo expressivo na comparação com a previsão com chuva observada e com os demais EPS, indicando que o modelo do ECMWF pode tendeu a indicar muitas subestimativas de vazões.

### **7.2.5. Correlação**

Os resultados obtidos de coeficiente de correlação ( $r$ ) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 139 e na Figura 140.



**Figura 139.** Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados.



**Figura 140.** Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando apenas com vazões maiores que  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .

Nos resultados, nos primeiros intervalos de tempo da previsão, o coeficiente de correlação até pouco menos de 48h de antecedência para ficarem situados entre 1,0 e 0,9 na análise com todos os dados, e entre 1,0 e 0,7 na análise com as maiores vazões. A partir destes horizontes de previsão os resultados das previsões de vazão com as diferentes fontes de dados de chuva passaram a diferir.

Na previsão com chuva observada notam-se coeficientes de correlação de no mínimo 0,9 quando são considerados todos os dados, e de no mínimo 0,65 quando são consideradas apenas as altas vazões.

O CPTec-pf apresentou os menores coeficientes de correlação entre os testados. Na análise considerando todos os dados os valores chegaram a cerca de 0,6 nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões a correlação teve um comportamento errático, variando entre 0,3 (antecedência de 144h), 0,5 (antecedência de

230h), a valores menores que zero na antecedência de 336h. Este desempenho inferior do CPTEC-pf sugere que o sistema pode em muitas situações ter previsto vazões que efetivamente não foram observadas, indicando um comportamento que não se correlaciona devidamente com a realidade.

Os coeficientes de correlação do GEFS foram maiores que o do CPTEC-pf. Na análise considerando todos os dados os erros variaram entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,78 nas antecedenças de 360h.

O ECMWF-pf foi o EPS com melhor desempenho (maior coeficiente de correlação) dentre os analisados, embora nos horizontes de previsão em torno de 192h o GEFS tenha sido muito similar. Na análise considerando todos os dados as correlações variaram entre 0,9 na antecedência de 100h até cerca de 0,77 nas antecedenças de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões as correlações variaram entre 0,7 na antecedência de 100h até cerca de 0,4 na antecedência de 360h.

O Super Ensemble apresentou um coeficiente de correlação muito similar ao ECMWF-pf para as análises considerando todos os dados. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o coeficiente de correlação foi similar ao ECMWF-pf até a antecedência de aproximadamente 240h, quando seu desempenho foi ligeiramente inferior.

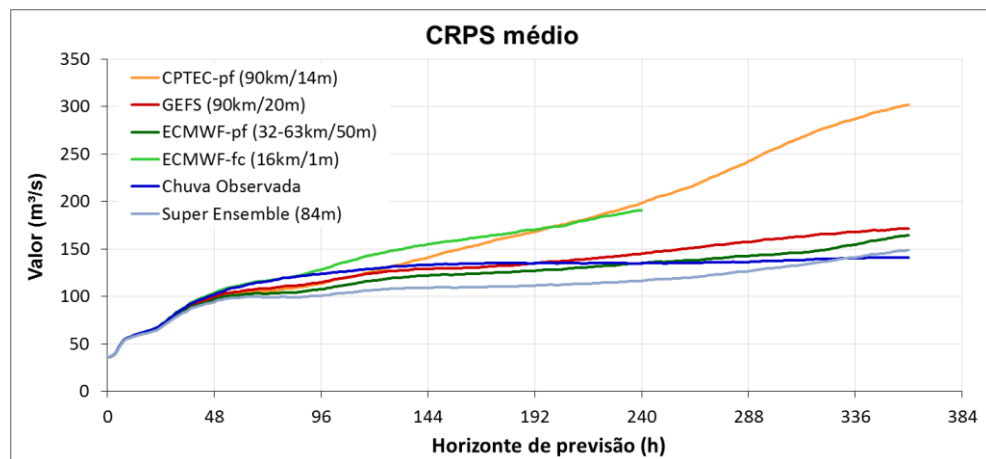
A previsão determinística ECMWF-fc apresentou na análise considerando todos os dados correlações entre 0,9 na antecedência de 48h até cerca de 0,8 na antecedenças 240h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões as correlações variaram entre 0,7 na antecedência de 48h até cerca de 0,58 na antecedência de 240h. Este desempenho foi melhor que o CPTEC-pf e muito próximo do GEFS e do ECMWF-pf.

Na comparação das previsões com chuva perfeita com as previsões feitas utilizando os modelos meteorológicos é possível notar que, apesar das diferenças, as previsões do ECMWF-pf e do GEFS diferem pouco da previsão com chuva observada até os horizontes de 192h.

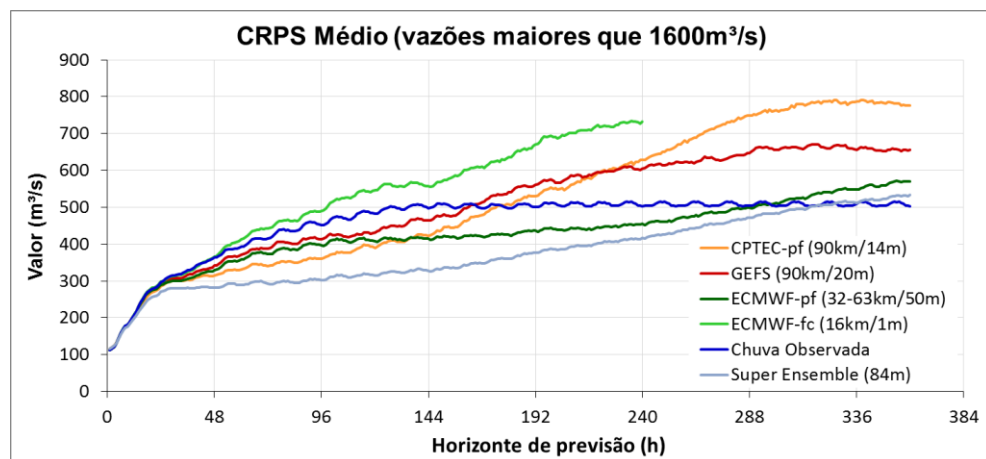


### 7.2.6. CRPS Médio

Os resultados obtidos para o CRPS médio para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 141 e na Figura 142.



**Figura 141.** Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados.



**Figura 142.** Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Doce apenas vazões maiores que  $1600\text{m}^3/\text{s}$ .

Assim como para as demais métricas de erros, nas análises de CRPS médio o aumento do horizonte de previsão também sugere um aumento nas incertezas e nos primeiros intervalos de tempo (entre 32h e 48h) os desempenhos são similares entre as previsões com as diferentes fontes de dados.

O CRPS médio para as previsões com chuva observada é equivalente ao EMA, pois esta é uma previsão determinística. Assim verificou-se que os erros variaram entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  (48h) a  $150\text{m}^3/\text{s}$  (360h), e erros que variaram entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  (48h) e  $400\text{m}^3/\text{s}$  (360h) quando são consideradas apenas as altas vazões.

O CPTEC-pf apresentou os melhores desempenhos entre 48h e 120h de antecedência, em que os erros variaram entre  $100\text{-}125\text{m}^3/\text{s}$  (considerando todos os dados), e  $300\text{-}400\text{m}^3/\text{s}$  (considerando somente as vazões altas). Como contraponto, para as maiores antecedências, os erros do CPTEC-pf foram os maiores registrados. Na análise considerando todos os dados os valores chegaram até cerca de  $300\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os valores foram de cerca de  $800\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h.

O GEFS apresentou CRPS médio ligeiramente maior que os demais EPS entre 48h e 120h de horizonte de previsão, e para as maiores antecedências seus erros foram intermediários entre o CPTEC-pf e o ECMWF-pf. Na análise considerando todos os dados os valores chegaram até cerca de  $170\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões os valores foram de cerca de  $650\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h.

O ECMWF-pf considerando todos os dados apontou para valores variando entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $160\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre cerca de  $340\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até cerca de  $570\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 360h. Este foi o melhor desempenho entre os EPS para os horizontes de previsão maiores que 144h.

Na análise do Super Ensemble, os valores apresentaram um desempenho de CRPS médio superior aos demais EPS (mais próximos de zero) em todos os horizontes de previsão, em ambas as análises. Ou seja, O CRPS médio calculado com a distribuição do conjunto dada pelo agrupamento dos três modelos apresentou resultados melhores que os modelos individualmente.

Já a análise do desempenho dos EPS em comparação com as previsões com chuva observada indicou valores de CRPS menores usando os EPS do que os próprios valores de chuva observada para diversos horizontes de previsão, sendo o ECMWF-pf melhor que a previsão com chuva perfeita até a antecedência de 288h na análise com altas vazões. Parte deste desempenho pode ser atribuída ao fato da medição da chuva observada na bacia não ter distribuição satisfatória.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de CRPS são equivalentes ao EMA. Na análise considerando todos os dados o erro variou entre  $100\text{m}^3/\text{s}$  na

antecedência de 48h até cerca de  $190\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 240h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre  $360\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 48h até pouco menos de  $240\text{m}^3/\text{s}$  na antecedência de 240h.

Na comparação do desempenho entre a previsão determinística e os EPS pode-se dizer que a previsão determinística apresentou um desempenho inferior que todos os EPS em termos de CRPS para todas as análises, com exceção do CPTEC-pf em horizontes maiores que 192h. Ou seja, a maior parte dos resultados, principalmente do GEFS e do ECMWF-pf, sugere uma vantagem na utilização das previsões por ensemble.

### 7.2.7. Rank Histogram

Os Rank Histograms obtidos com cada um dos EPS mais o Super Ensemble para cada um dos limiares de análise são apresentados na Figura 143 e na Figura 144.

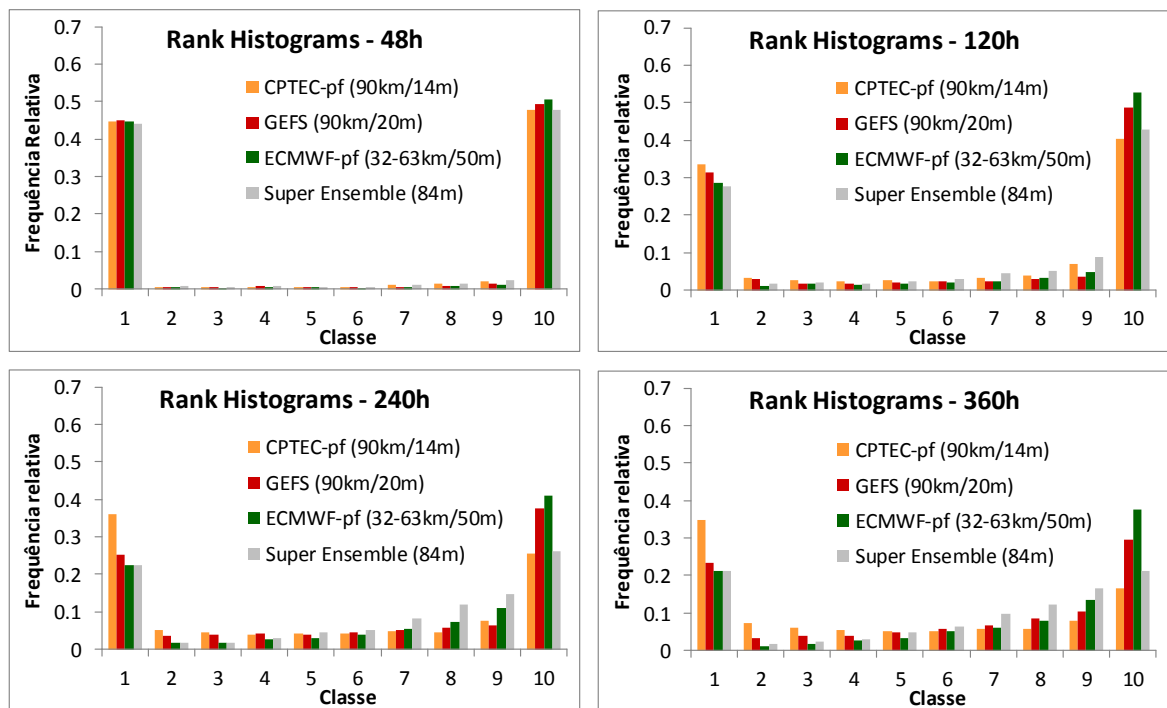
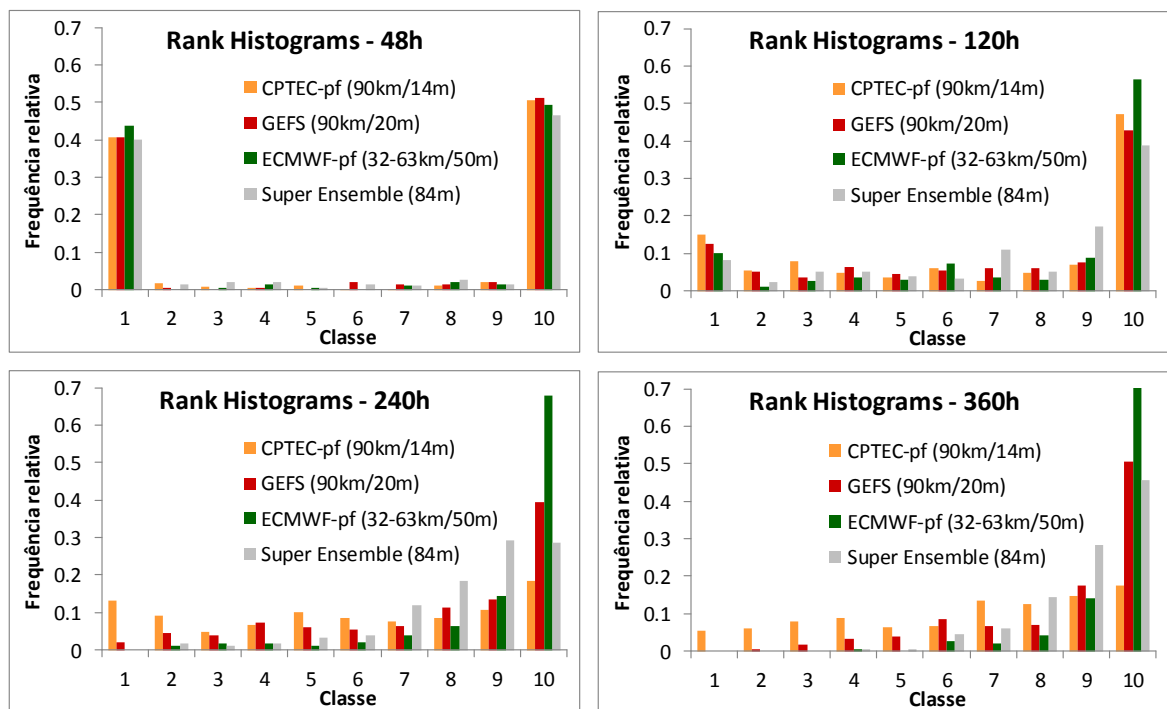


Figura 143. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando todos os dados.



**Figura 144. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando apenas com vazões maiores que  $1400\text{m}^3/\text{s}$ .**

Nos Rank Histograms correspondentes a análise com todo o período de dados disponíveis observa-se uma tendência geral para o formato de “U”, que é um indicativo de falta de espalhamento do conjunto, já que simboliza que as observações se concentram muito sempre acima ou abaixo dos resultados do conjunto.

Além deste formato de “U”, observa-se que nas análises do ECMWF-pf e do GEFS nas antecedências maiores que 120h que a região das maiores classes dos histogramas possui frequências mais altas, indicando uma tendência maior de viés negativo nos resultados (isto é, maior concentração das observações nas partes superiores dos hidrogramas do ensemble).

Na segunda sequência de histogramas, que considera apenas as vazões acima do limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ , o efeito das grandes recessões do hidrograma sobre os resultados não é incluído, pois são consideradas apenas as vazões altas para computar a estatística.

Nestes histogramas, para o limiar de 48h onde as previsões ainda possuem pouco espalhamento o formato predominante é de “U”. O que é comum, visto que as previsões tem um comportamento similar a uma previsão determinística. Porém, nos maiores horizontes de previsão (240h e 360h), o formato dos histogramas é de “L invertido”, especialmente do GEFS e do ECMWF-pf, indicando viés negativo nos resultados.

Para o CPTEC-pf, apesar de o horizonte de 120h sugerir um viés nos resultados, os histogramas são relativamente planos nas antecedências de 240h e 360h, se comparadas aos demais EPS, sugerindo um espalhamento mais adequado deste modelo nestes casos.

Na comparação entre os EPS, pode-se dizer que o viés mais pronunciado é no ECMWF-pf.

Em relação ao Super Ensemble, os resultados indicaram que a agregação de todos os membros pode resultar em um histograma mais plano, mas ainda assim fortemente influenciado pelo ECMWF-pf, que possui mais membros. Assim, o Super Ensemble também sugeriu a existência de viés negativo.

### 7.2.8. Brier Score

Os resultados obtidos para o Brier Score (BS) com cada um dos EPS, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 145 e na Figura 146.

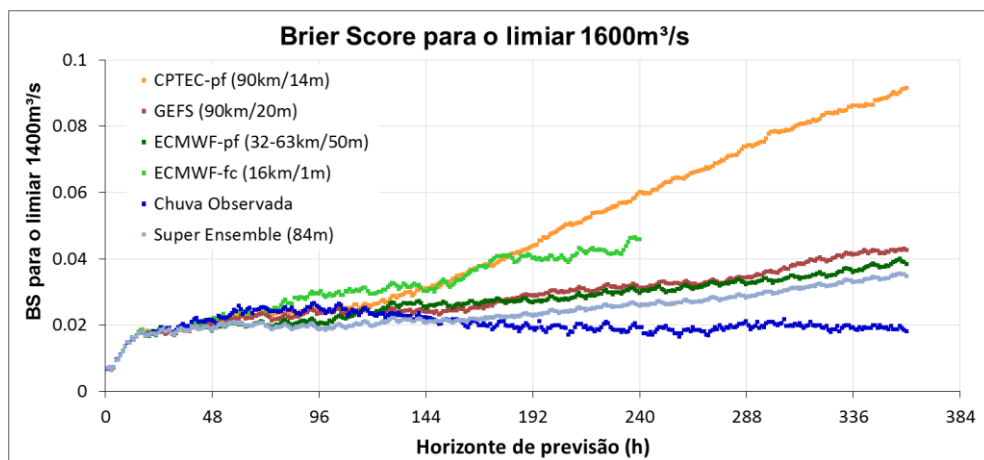
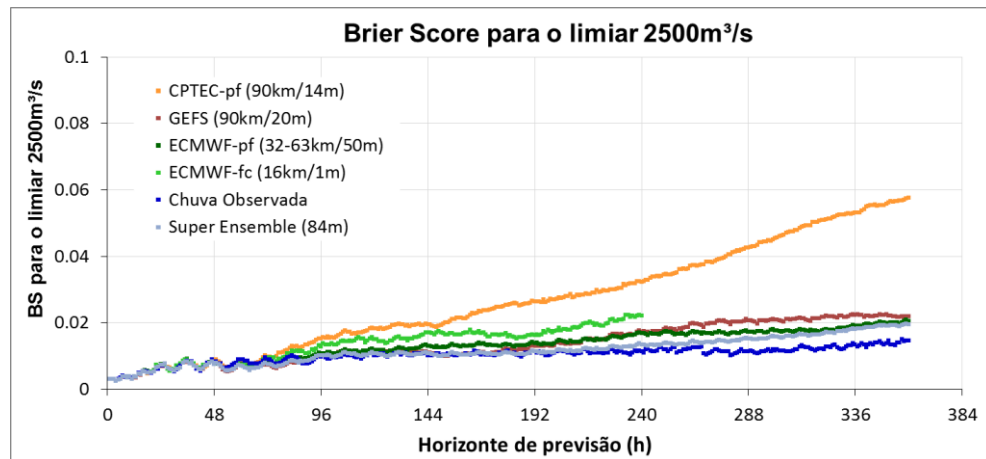


Figura 145. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de 1600m³/s.



**Figura 146. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de 2500m³/s.**

Assim como para as outras métricas de erro, na análise de BS os erros aumentam com o aumento do horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. E nos primeiros intervalos de tempo, até cerca de 48h, os valores são muito similares entre os diferentes dados de chuva prevista devido ao fato do começo da previsão ser mais dependente das condições observadas e tempo de concentração da bacia.

O BS obtido para as previsões com chuva observada considerando o limiar de 1600m³/s variou em torno de 0,01 entre as 48h e as 360h de antecedência. Para o limiar de 2500m³/s o BS se manteve em aproximadamente 0,01 desde as 48h até o final do horizonte de previsão.

O CPTEC-pf apresentou os valores de BS mais altos (pior desempenho) para as antecedências maiores que 96h em comparação com os demais EPS. Na análise considerando o menor patamar o BS variou entre 0,02 (antecedência de 96h) até aproximadamente 0,09 (antecedência de 360h). Na análise considerando o maior patamar o BS variou entre 0,01 (antecedência de 150h) até quase 0,06 (antecedência de 360h).

Os resultados de BS para o GEFS e para o ECMWF-pf foram muito similares. Na análise considerando o menor patamar o BS variou entre 0,02 (antecedência de 96h) até aproximadamente 0,04 (antecedência de 360h). Na análise considerando o maior patamar o BS variou entre 0,01 (antecedência de 150h) até quase 0,02 (antecedência de 360h). Nesses casos, o desempenho do ECMWF-pf foi ligeiramente melhor nas últimas antecedências.

Na análise de Super Ensemble, os valores apresentaram um BS ligeiramente menor que o ECMWF-pf em todos os horizontes de previsão. De uma forma geral, é possível dizer

que a agregação dos membros em um super conjunto resultou em uma previsão com melhor desempenho que os EPS individualmente.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de BS foram inferiores aos resultados dos EPS, com exceção do CPTEC-pf nos horizontes maiores que 144h. Os valores de BS para o ECMWF-fc giraram em torno de 0,015 a 0,02 (para o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s), e 0,021 a 0,045 (para o limiar de 2500m<sup>3</sup>/s).

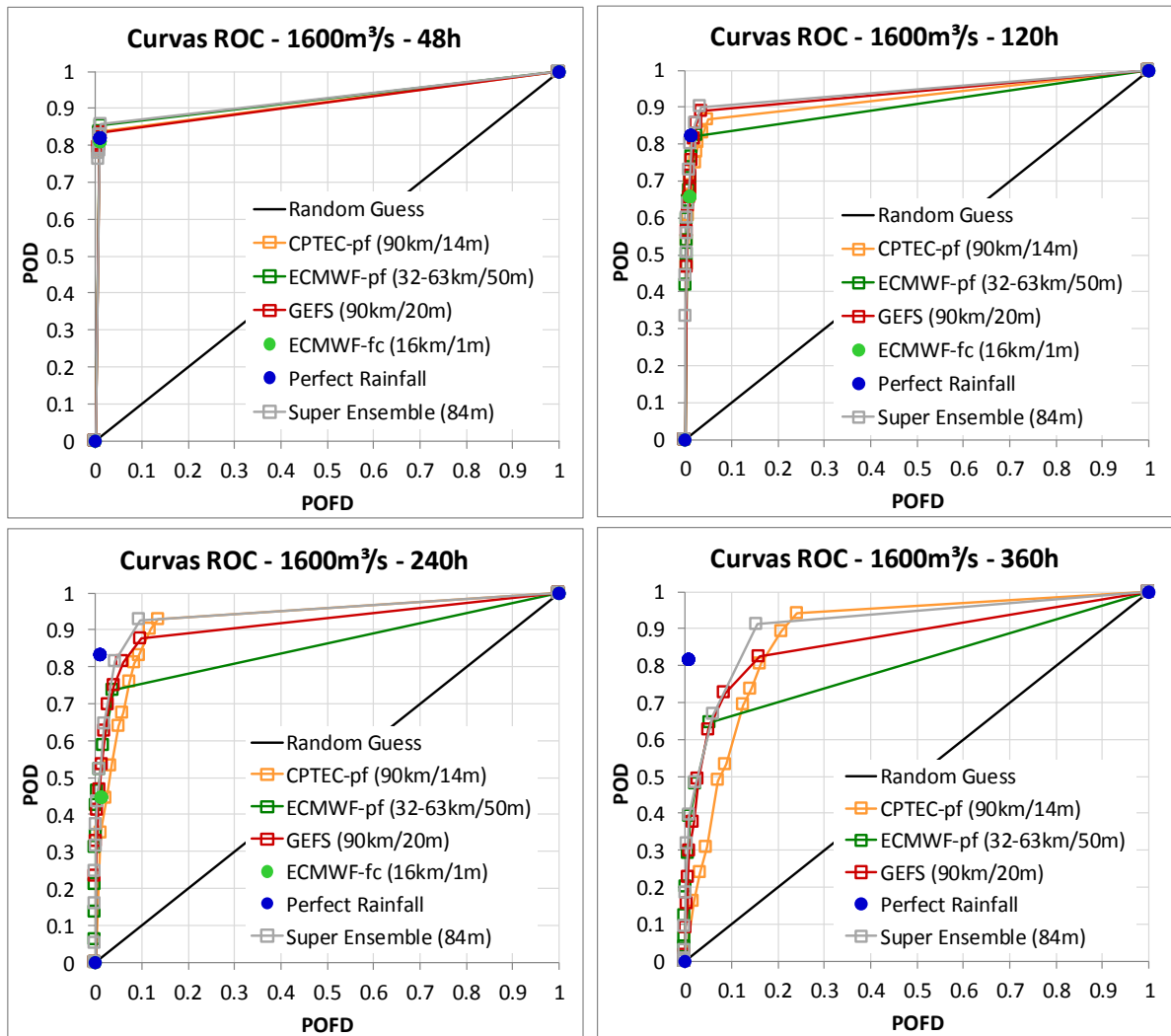
Na comparação do desempenho dos modelos de previsão de chuva com a previsão com chuva perfeita nota-se que para antecedências menores do que 192h geralmente os resultados do GEFS, ECMWF-pf e Super Ensemble são muito próximos ao da previsão com chuva perfeita, sugerindo que o desempenho pode ser equivalente ao uso de observações no futuro (apesar da chuva observada não ser exatamente perfeita).

### 7.2.9. Diagramas ROC

O diagrama ROC é a segunda estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os resultados de diagramas ROC para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 147 e na Figura 148.

A análise das curvas ROC para ambos os limiares (1600m<sup>3</sup>/s e 2500m<sup>3</sup>/s) na antecedência de 48h é muito similar independente do dado de chuva utilizado. Por que nesta antecedência existe muita dependência das observações sobre os resultados, e pouca influência das previsões. Já para os maiores horizontes é possível ver diferenças entre os resultados.

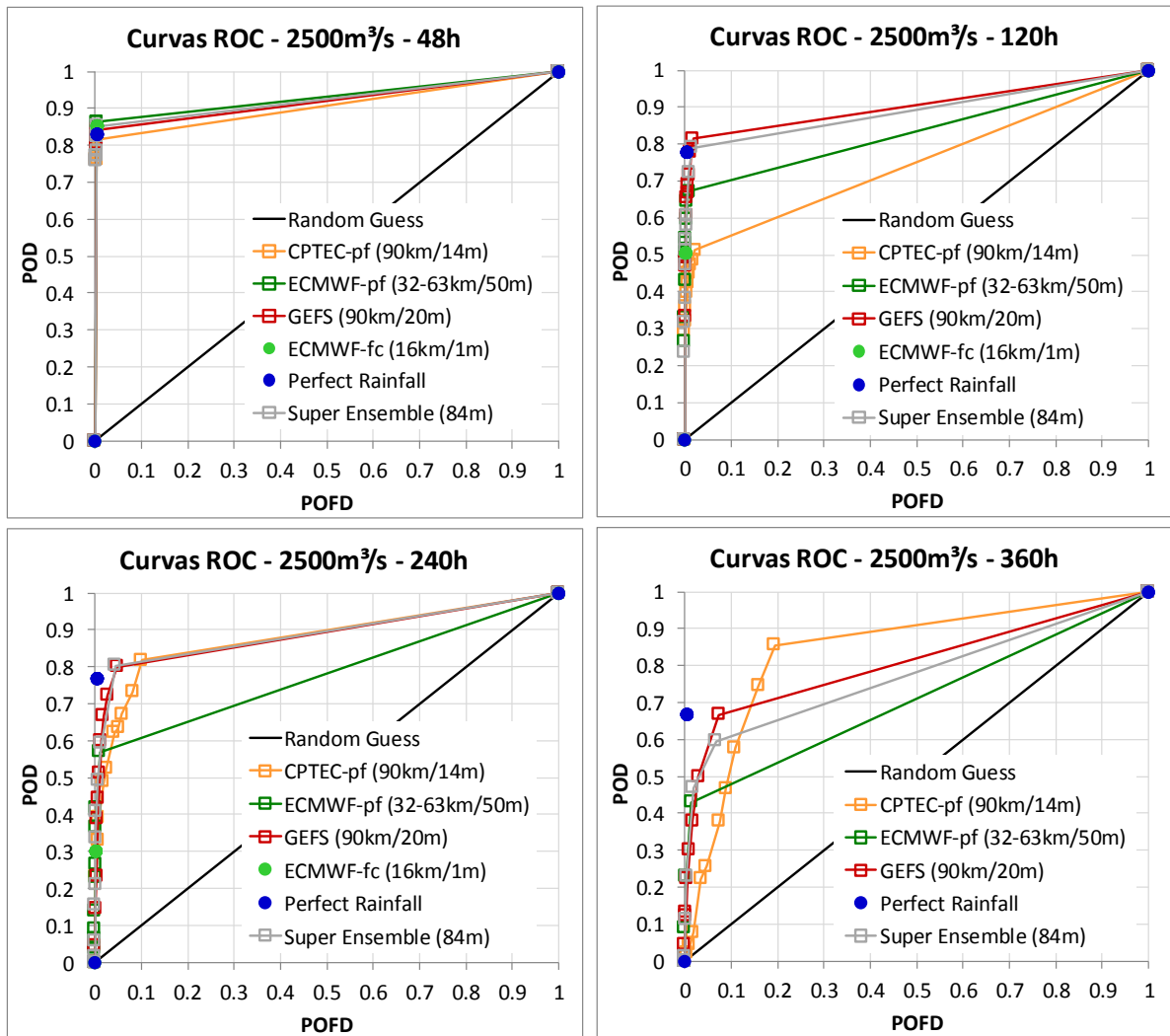
O desempenho do CPTEC-pf para o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s geralmente apresentou POFD um pouco mais elevado que os demais EPS, porém também com valores de POD mais elevados considerando os percentis mais altos da previsão. Por exemplo, na antecedência de 240h considerando o maior percentil a POD foi de aproximadamente 0,93 e a POFD de aproximadamente 0,15.



**Figura 147. Resultados das curvas ROC com limiar de 1600m³/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce.**

O desempenho do CPTEC-pf para o limiar de 2500m³/s e antecedência de 120h foi pior que os outros modelos, com POFD próxima de zero, porém com POD de cerca de 0,5 a 0,3. Para as antecedências de 240h e 360h o desempenho do CPTEC-pf também mostrou POFD mais elevado que os demais EPS, com uma maior POD que as demais no caso do horizonte de 360h, mas não horizonte de 240h. Para a antecedência de 240h e maior percentil do conjunto foi verificada uma POD de aproximadamente 0,91 e POFD de aproximadamente 0,1. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,85 e POFD de aproximadamente 0,2. Este desempenho está de acordo com o verificado em outras métricas, onde o CPTEC-pf mostra um desempenho que varia conforme o horizonte de previsão.





**Figura 148. Resultados das curvas ROC com limiar de 2500m³/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce.**

O desempenho do GEFS para a antecedência de 240h e limiar de 1600m³/s, considerando os percentis mais altos da previsão, foi uma POD de aproximadamente 0,89 e POFD de aproximadamente 0,1. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,81 e POFD de aproximadamente 0,15. Considerando estes resultados e os demais pontos da curva pode-se dizer que o desempenho geral do GEFS neste caso acerta menos a ocorrência dos eventos que o CPTEC-pf, porém, também comete menos erros do tipo alarme falso.

Para o limiar de 2500m³/s o desempenho do GEFS na antecedência de 120h foi de POD em torno de 0,8 com POFD muito próxima de zero, considerando o percentil mais elevado da previsão. Para a antecedência de 240h e maiores percentis a POD foi em torno de 0,8 para uma POFD em torno de 0,04. Na antecedência de 360h e maiores percentis a POD foi em torno de 0,69 para uma POFD em torno de 0,09. Considerando este desempenho

também os dos percentis menores pode-se dizer que o GEFS proporciona o melhor *trade-off* entre detecções e falsos alarmes até o horizonte de 240h entre os três EPS testados. No horizonte de 360h Ele proporcionar menores POFD que o CPTEC-pf, porém com menores POD, ficando a cargo do uso desejado a escolha sobre qual o que é um melhor resultado.

O desempenho do ECMWF-pf foi geralmente o pior entre os EPS em termos de POD nos horizontes de previsão 120h, 240h e 360h. Apesar das POFDs nesses horizontes terem sido próximas de zero, os PODs sempre se mantiveram abaixo dos demais modelos. Isso é coerente com o viés negativo verificado no modelo em outras estatísticas. Como o modelo não prevê adequadamente a ocorrência de cheias, ele acaba por indicar menos as ocorrências. Como exemplo, o desempenho do ECMWF-pf para a antecedência de 240h e limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ , considerando os percentis mais altos da previsão, foi uma POD de aproximadamente 0,75 e POFD de ligeiramente menor que 0,04. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,65 e POFD de aproximadamente 0,05. Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , antecedência de 240h, e maiores percentis, o POD foi em torno de 0,59 para uma POFD em torno de 0,01. Na antecedência de 360h e maiores percentis o POD foi em torno de 0,44 para uma POFD em torno de 0,01.

O Super Ensemble no caso das previsões para o limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  apresentou um desempenho geralmente superior aos EPS individualmente, com uma POFD geralmente menor para uma mesma POD verificada nos percentis superiores dos EPS. Por exemplo, na curva para 240h a POD foi de aproximadamente 0,92 e a POFD foi de 0,1.

Nas análises para o maior limiar ( $2500\text{m}^3/\text{s}$ ), no entanto, o Super Ensemble não apresentou desempenho superior aos demais. Sendo similar ao GEFS nas antecedências de 120h e 240h, e intermediário entre o GEFS e o ECMWF-pf na antecedência de 360h.

O desempenho da previsão determinística (ECMWF-fc) foi geralmente inferior aos percentis superiores dos EPS em todas as análises realizadas. Parte disto acontece por que existe um viés negativo no modelo (verificado em outras métricas). Contudo, na comparação com o próprio ECMWF-pf (que também tem viés negativo verificado), o desempenho da previsão determinística foi igualmente sempre inferior ao ensemble na detecção de limiares. Como exemplo, o desempenho do ECMWF-fc para a antecedência de 240h e limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  foi uma POD de aproximadamente 0,45 e POFD de ligeiramente menor que 0,02. Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$ , antecedência de 240h o POD foi em torno de 0,3 para uma POFD em torno de 0,01.

O desempenho encontrado para as previsões com chuva observada foi sempre de POFD praticamente nula. Nas análises para o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s a POD ficou em torno de 0,81 nos horizontes de previsão, e para o limiar de 2500m<sup>3</sup>/s a POD ficou em torno de 0,69-0,81 nos horizontes de previsão. Especialmente no horizonte de 120h os limiares superiores dos ensembles chegaram a apresentar POD superior a da previsão com chuva perfeita. Nos horizontes de 240h e 360h o desempenho da previsão com chuva observada serve de referência para o desempenho dos ensembles, onde no horizonte de 240h os maiores percentis das previsões do GEFS e do CPTEC-pf também se aproximam do obtido com as observações.

Adicionalmente, este desempenho serve para mostrar que a chuva observada na bacia e outros erros hidrológicos (por exemplo, limitações do modelo calibrado) ainda são importantes desafios a serem superados, pois este desempenho de POD não está próximo do que seria considerado “perfeito”, mesmo com o uso de observações.

#### **7.2.10. Reliability Diagrams**

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo Idas previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades previstas. Ele é a terceira estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os *Reliability Diagrams* para cada um dos EPS usados e o Super Ensemble, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 149 e na Figura 150. Estes diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Os diagramas para a antecedência de 48h apresentaram um comportamento errático nas análises, pois nesta antecedência as previsões são muito similares a uma previsão determinística (existe pouco espalhamento no conjunto). Com o maior número de resultados concentrados na primeira e na última classe de análise, a estatística é afetada pelo baixo número de amostras nas classes centrais de probabilidades. Assim, estes resultados são mostrados apenas como referência, mas não são analisados.

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf nas antecedências de 120h, 240h e 360h para os dois limiares testados apresentaram comportamento relacionado com um viés condicional positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foi maior que a frequência condicional observada correspondente. Por exemplo, para o limiar

de  $1600\text{m}^3/\text{s}$  e antecedência de 240h quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,95 os eventos foram observados com frequências de 0,5. Para o limiar de  $2500\text{m}^3/\text{s}$  os resultados de viés condicional positivo foram mais expressivos, onde para o horizonte de previsão de 360h o CPTEC-pf indicou ocorrências probabilidades de 0,5, 0,7 e 0,95 e os eventos foram observados com frequências relativas próximas de 01.

Em relação a contagem de amostras do CPTEC-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi mais elevado que para as demais classes. O valor foi sempre maior que 1000, enquanto que nas demais classes o número de amostras sempre se manteve em torno de 100 a 10.

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado com um viés condicional tipo I positivo nas previsões, para todos os horizontes de previsão de 120h, 240h e 360h. Como exemplo, para as previsões do menor limiar ( $1600\text{m}^3/\text{s}$ ) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,95 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,87 na antecedência 240h. Para as previsões do maior limiar ( $2500\text{m}^3/\text{s}$ ) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,9 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,7 na antecedência 240h. Contudo, este viés condicional positivo foi menor que o viés verificado no CPTEC-pf, especialmente no caso dos horizontes de previsão de 240h e 360h. O GEFS pode ser considerado o EPS com melhor função de calibração dentre os testados.

Em relação a contagem de amostras do GEFS, assim como para o CPTEF-pf, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi sempre maior (entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral entre 10 e 100), com exceção da análise para  $2500\text{m}^3/\text{s}$  e 360h.

Ao contrário dos demais modelos, o desempenho obtido para o ECMWF-pf sugere um viés condicional tipo I negativo. Ou seja, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram em geral menores que a frequência condicional observada correspondente. Ou seja, poucos membros do conjunto efetivamente mostraram a ocorrência do evento em casos onde eles foram relativamente frequentes. Este efeito foi mais pronunciado nos horizontes de previsão de 240h e 360h. Como exemplo, para as previsões do menor limiar ( $1600\text{m}^3/\text{s}$ ) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,75 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,9 na antecedência 240h. Para as previsões do maior limiar ( $2500\text{m}^3/\text{s}$ ) foram indicadas probabilidades de ocorrências de 0,5 e os eventos foram observados com frequência relativa de 0,7 na antecedência 240h.

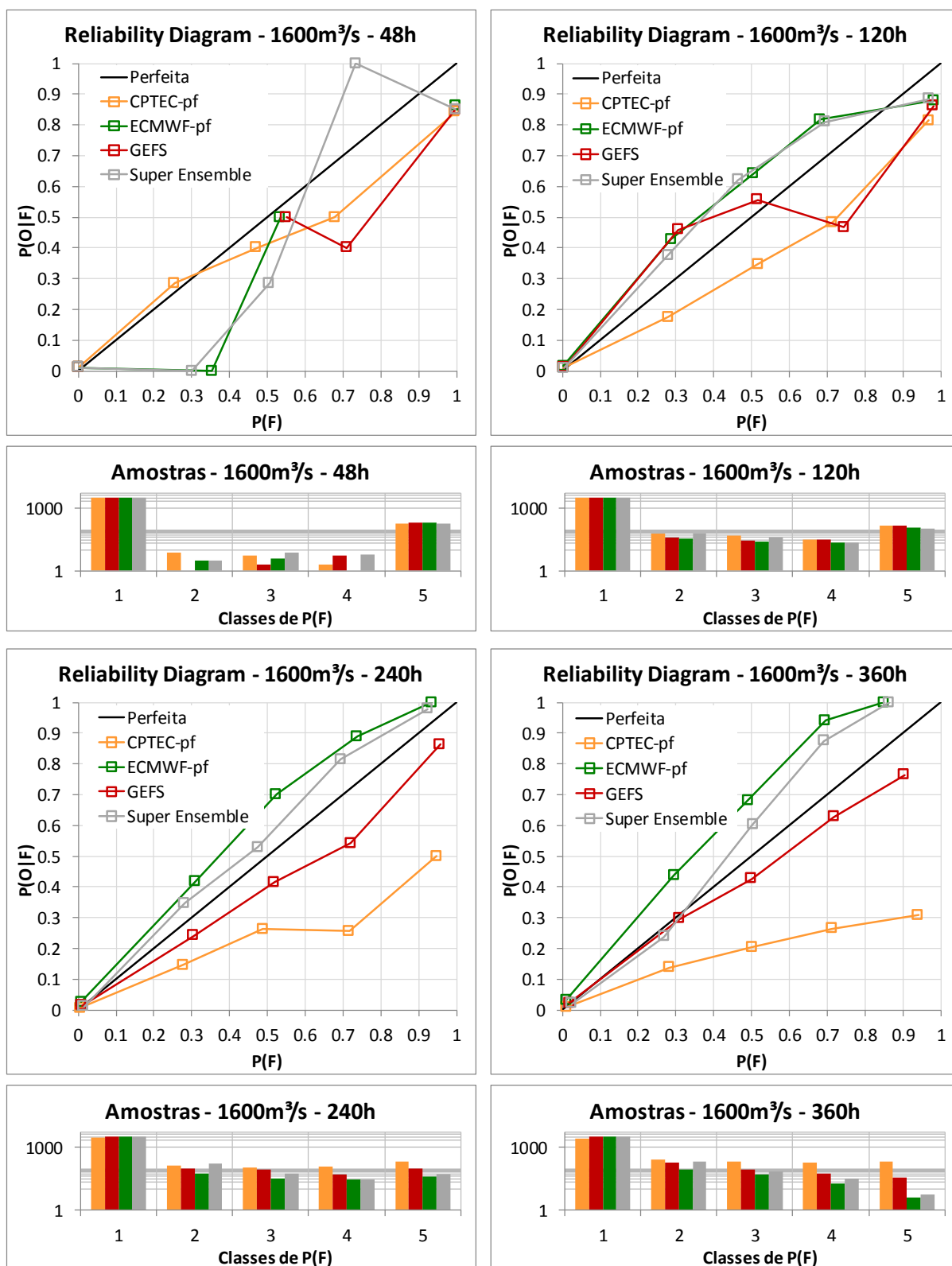


Figura 149. Reliability Diagram com limiar de 1600m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce.

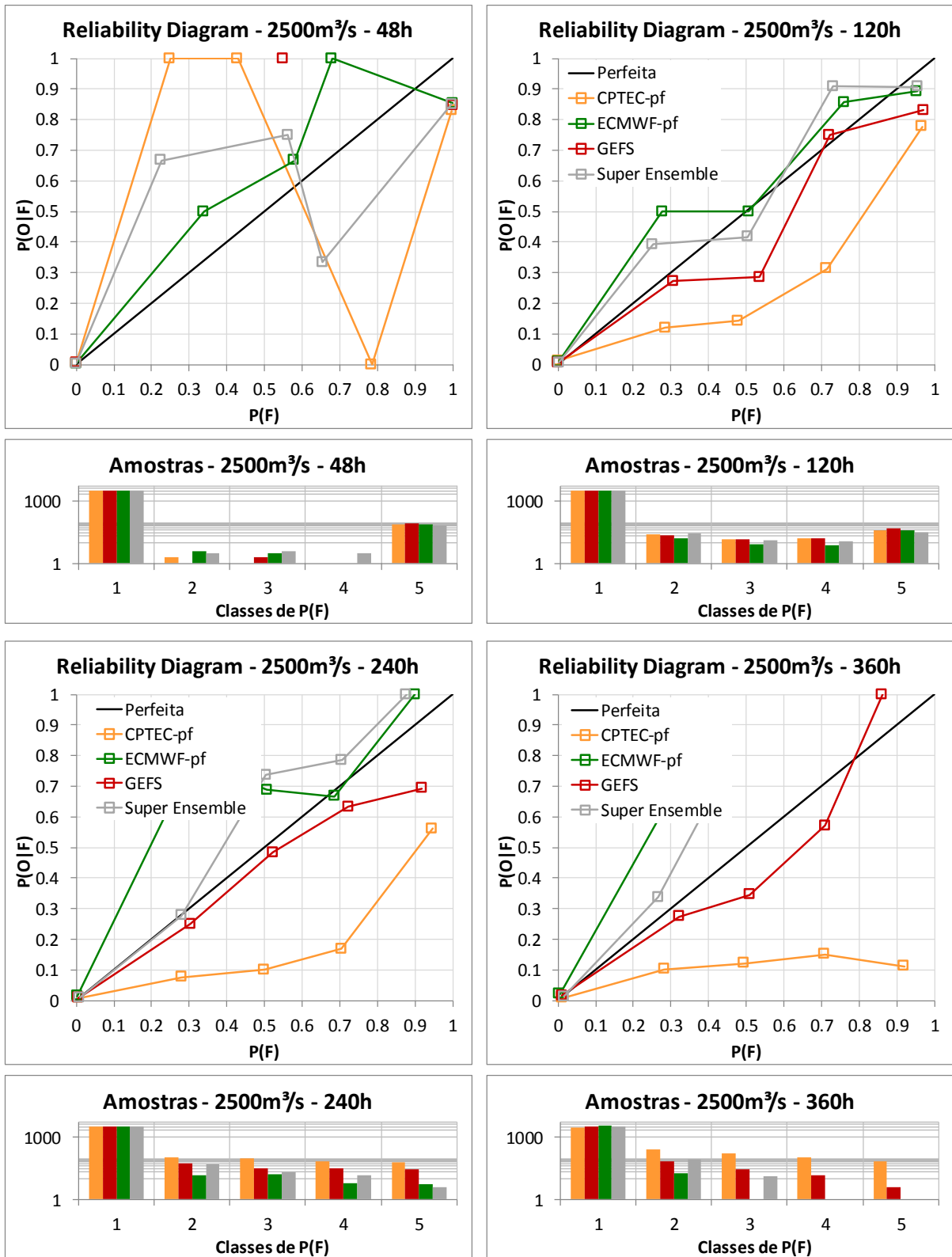


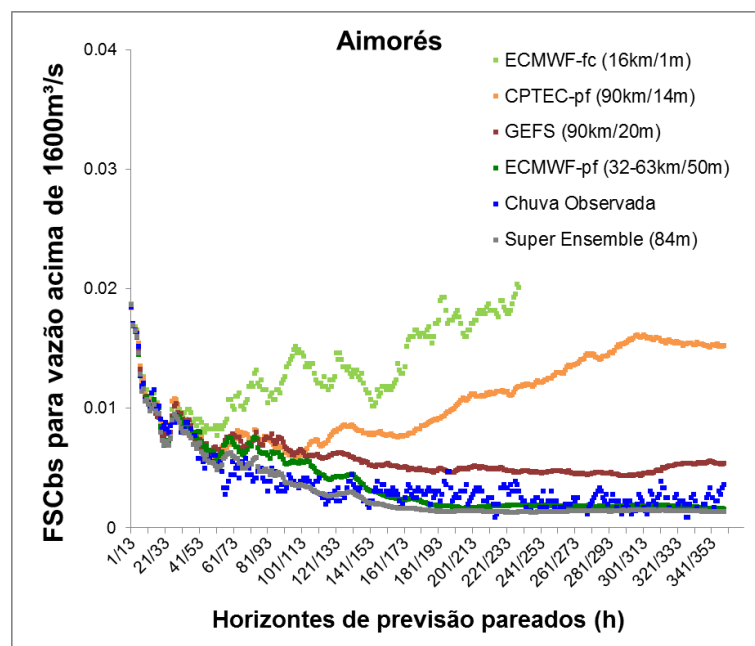
Figura 150. Reliability Diagram com limiar de 2500m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Doce.

Esta calibração negativa pode estar relacionada com o viés negativo geral na média do conjunto, o que inclusive também afetou os resultados na análise de 240h e 360h para o maior limiar, tendo em vista o baixo número de amostras nas maiores classes de probabilidades.

Em relação ao Super Ensemble, o seu desempenho foi dirigido principalmente pelo ECMWF-p, indicando um viés condicional tipo I também negativo, porém um pouco menos expressivo que o ECMWF-pf, devido a influência dos outros EPS na combinação. Sendo sua curva, então, mais próxima de uma calibração perfeita.

### 7.2.11. Forecast Convergence Score (FCS)

Os resultados obtidos para o Forecast Convergence Score (FCS) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para o limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ , são apresentados na Figura 151.



**Figura 151. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Rio Doce considerando o limiar de  $1600\text{m}^3/\text{s}$ .**

Até as antecedências de aproximadamente 60h, os resultados obtidos com as análises de FCS sugerem valores muito similares entre os diferentes dados de chuva. E a partir destes horizontes os valores de FCS diferem.

Após estas antecedências iniciais as previsões determinísticas apresentaram em geral os valores mais elevados de FCS, e, portanto menor consistência entre si. Este resultado

significa que as previsões determinísticas foram menos consistentes entre si do que as previsões por conjunto. Para os horizontes de previsão de cerca de 60h os valores de FCS foram um pouco menores do que 0,01 e no horizonte de 240h eles chegaram a aproximadamente 0,02.

Entre os EPS, neste caso da bacia do rio Doce o CPTEC-pf foi o modelo que apresentou maior FCS (menor consistência entre previsões consecutivas). Ele também foi o único EPS que cresceu ao longo do horizonte de previsão, atingindo até quase 0,02 (360h). E o ECMWF-pf foi o que apresentou menores valores de FCS em geral (maior consistência entre previsões consecutivas) mostrando em geral valores próximos de zero após os horizontes iniciais.

O GEFS apresentou valores de FCS intermediários entre o CPTEC-pf e o ECMWF-pf, também diminuindo com o aumento do horizonte de previsão. Já o Super Ensemble acompanhou com valores inclusive mais baixos os resultados obtidos com o ECMWF-pf, indicando consistências maiores entre as decisões consecutivas.

Na comparação dos resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble com as previsões feitas utilizando chuva observada novamente nota-se que os resultados são similares. Ou seja, que os resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble apresentaram consistência similar a da previsão com “chuva perfeita”.

### **7.2.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do Rio Doce**

Os principais resultados encontrados para as análises de vazão para o Rio Doce podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros tendem a aumentar com o horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. E até cerca de 48h de horizonte de previsão a previsão é mais dependente das condições observadas (vazão e chuva), do que da chuva prevista.
- As análises visuais dos ensembles na bacia do Rio Doce mostraram desempenhos diferentes para os três EPS. O CPTEC-pf apresentou um desempenho discordante nos três eventos, com subestimativa em um dos eventos, bons resultados em outro, e uma grande superestimativa no terceiro. Já o GEFS geralmente apresentou previsões onde a média do ensemble se adequou bem com as observações, assim como o espalhamento nos primeiros dias de previsão. Já o ECMWF-pf indicou geralmetne uma subestimativa nos



seus resultados, principalmente em horizontes maiores do que cinco dias. Neste caso, os resultados do ECMWF-pf que mais se destacaram em termos de proximidade das observações foram os seus limites superiores do conjunto.

- O Super ensemble apresentou resultados visualmente que sugerem uma melhor cobertura das incertezas do que os EPS individualmente. Embora sua média tenha sido em geral bem influenciada pelo ECMWF-pf, indicando subestimativas.

- Na comparação visual dos EPS com a previsão determinística novamente a grande vantagem observada nas previsões por conjunto foi que em momentos em que a previsão determinística não detectou a ocorrência dos maiores eventos, pelo menos alguns membros do ensemble sugeriram esta possibilidade.

- Já as previsões com chuva observada geralmente mostraram um desempenho visualmente bom nas previsões. Com a exceção de um grande pico de cheia previsto pelas observações que não ocorreu efetivamente, provavelmente devido a uma chuva observada na bacia que foi extrapolada além do domínio de sua ocorrência pela baixa densidade de postos na bacia.

- Os erros médios absolutos do ECMWF-pf foram os menores na análise com todos os dados, e os do GEFS foram os menores na análise com o limiar de 1400m<sup>3</sup>/s. O CPTEC-pf foi o EPS com maior EMA em ambas análises, e o Super Ensemble superou os três EPS em ambas análises. A comparação com a previsão perfeita mostra que é possível obter resultados parecidos com ela usando o GEFS e o ECMWF-pf na análise de todos os dados até o horizonte de cerca de 192h, mas não na análise de altas vazões.

- Os resultados de EMR mostraram um desempenho com pouco viés no uso das previsões com chuva observada. O CPTEC-pf apresentou um viés positivo expressivo (chegando a 0,5 na análise com todo os dados) nas maiores antecedências, e um viés negativo nas menores antecedências (em torno de 96h). Já o ECMWF-pf apresentou um viés negativo marcante, especialmente para as análises de altas vazões, onde superou -0,5. O GEFS, por sua vez, também apresentou um viés negativo nas análises, mas menos expressivo que o ECMWF-pf.

- O coeficiente de correlação mostrou a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. Verificou-se novamente um comportamento errático do CPTEC-pf ao longo do horizonte de previsão, e que a previsão determinística apresentou uma pequena desvantagem em relação ao ECMWF-pf na análise com todo os

dados, mas não demonstrou desvantagem na análise de altas vazões. A média do Super Ensemble não apresentou benefícios em relação ao ECMWF-pf nessa métrica.

- O CRPS médio indicou o CPTEC-pf como o melhor desempenho entre as antecedências de 48h e 144h na análise de altas vazões, todavia ele também apresentou os piores desempenhos nos maiores horizontes de previsão em ambas análises. O ECMWF-pf foi o modelo que apresentou melhor desempenho para esta métrica. O super ensemble apresentou desempenho melhor que todos os demais EPS, e a previsão determinística de referência (ECMWF-fc) apresentou desempenho pior que os EPS.

- Também na análise de CRPS médio verificou-se que para a antecedência de até cerca de 192h os EPS obtiveram desempenho inclusive melhor que a previsão com chuva observada, atestando qualidade certa qualidade aos ensembles, mas também deficiências nas observações na bacia.

- Nos Rank Histograms correspondentes a análise com todos dados disponíveis observou-se uma tendência geral para o formato de “U”, que é um indicativo de falta de espalhamento do conjunto, com uma tendência de maior concentração de frequências nas maiores classes do ECMWF-pf e do GEFS, assinalando tendência de viés negativo no conjunto. Já na análise com todos os dados ficou evidente a tendência de viés negativo no ECMWF-pf para altas vazões, e a também do GEFS, menos expressiva. A previsão do CPTEC-pf para altas vazões apresentou novamente um comportamento errático, com viés negativo no horizonte de 120h e histogramas relativamente planos nos maiores horizontes.

- As análises de BS indicaram também a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CPTEC-pf. E a previsão determinística apresentou um desempenho inferior aos EPS do ECMWF-pf e do GEFS, indicando benefício no uso destes ensembles em termos desta estatística em comparação com a previsão determinística. Na comparação com o Super Ensemble, foi detectado benefício no uso da combinação de dados, onde o desempenho do Super Ensemble foi geralmente superior ao do ECMWF-pf. Também, o desempenho da previsão por conjunto foi muito próximo ao da previsão com chuva observada até a antecedência de aproximadamente 192h.

- A análise das curvas ROC mostrou o impacto do viés negativo do ECMWF-pf sobre os resultados, onde ele foi o modelo com piores resultados em termos de detecção dos limiares. O GEFS apresentou o melhor desempenho geral em termos do *trade-off* entre POD e POFD na maioria dos horizontes de previsão. O CPTEC-pf apresentou um comportamento novamente errático na antecedência de 120h, com PODs baixas em comparação com os

demais EPS. Na comparação com a previsão determinística em geral os EPS sempre tiveram um desempenho melhor quando usados seus maiores percentis, indicando benefício no uso de previsões por ensemble. Também na comparação com a previsão usando chuva perfeita os resultados dos EPS foram superiores na antecedência de 120h. Na comparação com o Super Ensemble foi detectado benefício no uso da combinação de dados para o limiar de 1400m<sup>3</sup>/s, mas não para o limiar de 2500m<sup>3</sup>/s, onde o ECMWF-pf exerceu grande influência por ter maior número de membros.

- Na análise dos Reliability Diagrams os resultados do GEFS e do CPTEC-pf apontaram para uma tendência geral dos modelos de mostrar um viés condicional do tipo I positivo. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foram maiores que as frequências condicionais correspondentes observadas. O ECMWF-pf, por outro lado, apresentou características de viés condicional do tipo I negativo em sua função de calibração. Os erros foram mais expressivos no CPTEC-pf principalmente nos maiores horizontes, enquanto que o GEFS foi o mais calibrado entre os EPS testados. Sobre o número de amostras, o viés negativo do ECMWF-pf fez com que poucas previsões para as maiores classes ocorressem nos maiores horizontes, inibindo o cálculo completo das estatísticas nestes casos.

- A análise de consistência das previsões através do FCS sugeriu que as previsões por conjunto sempre foram mais consistentes entre si do que a previsão determinística de referência. Além disso, a consistência obtida com o ECMWF-pf e o Super Ensemble foi muito similar a obtida com a previsão usando chuva observada.

Estes resultados são uma fotografia geral do desempenho dos EPS, modelo determinístico, e Super ensemble para a previsão de vazões na bacia do rio Doce. Com ela é possível avaliar os resultados dos modelos visando responder as perguntas levantadas na pesquisa.

Observa-se que as previsões do GEFS e do ECMWF-pf possuem em geral um viés negativo em sua média. Sendo que o viés do ECMWF-pf é mais expressivo com tendência de grande subestimativa das maiores vazões e especialmente nos maiores horizontes de previsão. Já o CPTEC-pf apresentou um comportamento mais incomum que os demais EPS, mostrando um viés na média dependente do horizonte de previsão. O CPTEC-pf foi também o EPS que apresentou as piores estatísticas em termos de média.

Em termos de distribuição do conjunto (dada pelo Rank Histogram), nota-se também o viés negativo nos resultados do conjunto para as altas vazões, com muitos diagramas em forma de “L invertido), para o GEFS e mais expressivamente para o ECMWF-pf. O CPTEC-pf com o comportamento dependente do horizonte de previsão mostrou um viés negativo no horizonte de 120h e distribuição mais adequada nos maiores horizontes nas análises altas vazões.

A calibração das previsões dos EPS também não é perfeita, estando o GEFS e o CPTEC-pf sujeitos geralmente a superestimativas nas probabilidades de ocorrência de eventos (principalmente o CPTEC-pf). Já o ECMWF-pf apresentou uma calibração ao contrário, onde com subestimativas nas probabilidades de ocorrência de eventos. Em ambos os casos, isto sugere que a medida do espalhamento do conjunto nem sempre pode ser associada com a incerteza das previsões.

Dentre todos os EPS, o que se destacou com estatísticas mais robustas foi o GEFS, com a melhor função de calibração verificada, erros que podem ser considerados baixos na comparação com o obtido usando as vazões observadas e na comparação com os demais EPS, além de o seu viés ser o menos expressivo que os demais modelos.

A previsão do ECMWF-pf apresentou bons resultados em termos de CRPS médio e de BS, mostrando qualidade em seu conjunto apesar do viés na média. Contudo, conforme sugerido pelas curvas ROC, ele possui deficiências importantes na detecção de cheias, principalmente causadas pelo viés negativo em seus resultados para as mais altas vazões. Não sendo ele completamente indicado, então, para o uso na detecção de cheias sem a aplicação de técnicas de correção no viés.

O CPTEC-pf mostrou um desempenho peculiar em comparação com os outros EPS, com comportamento especialmente ruim para a detecção de eventos de altas vazões nas antecedências médias (em torno de 120h), e com erros mais expressivos que os demais EPS em termos de estatísticas como CRPS médio e BS, além de sua calibração não possuir grande viés condicional negativo nos maiores horizontes. Com isso, este EPS também exige a aplicação de técnicas de correção de seus dados antes do uso efetivo.

Apesar destas fraquezas, as previsões probabilísticas, principalmente as do ECMWF-pf e do GEFS, sempre se sobressaíram sobre as previsões determinísticas, indicando o benefício no uso de previsões por conjunto tanto no quesito de erros quanto para a detecção de limiares de cheias.

Finalmente, na análise de composição do Super Ensemble verificou-se que para esta bacia o uso do Super Ensemble gerou benefícios adicionais em muitas métricas, como CRPS médio, EMA e Curvas ROC para o limiar de 1600m<sup>3</sup>/s. Este desempenho é encorajador para o uso do Super Ensemble, já que ele sugere que é possível compensar erros dos EPS na sua composição, gerando resultados que nunca são os piores para nenhuma estatística, e inclusive são os melhores em algumas delas.

### **7.2.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio Doce**

Em termos de qualidade geral das previsões dada por métricas como o EMA, EMR, CRPS e Coeficiente de correlação, nas análises de chuva para a bacia do rio Doce foi verificado que as chuvas do ECMWF-pf geralmente subestimaram os valores observados, especialmente nas maiores chuvas (análises com limiares). Este efeito foi verificado também nas vazões, onde geralmente o ECMWF-pf mostrou um comportamento com viés negativo, inclusive nas análises visuais, nas análises para cheias. Também, em ambas as análises de vazão e chuva os dados do ECMWF-pf foram os que mostraram maior correlação com as observações, apesar do viés.

O comportamento geral do CPTEC-pf nestes termos de análises de erros de chuva e vazão também foi similar, onde em ambas ele foi o modelo que geralmente apresentou maiores erros. Todavia, é possível afirmar que os erros foram mais evidentes nas análises de vazão do que nas de chuva, onde as curvas que representam os erros do CPTEC-pf nas vazões previstas se distanciam mais das curvas dos outros modelos, do que nas análises de chuva. Isto provavelmente é um efeito da “amplificação” dos erros que pode ser cometida pelo modelo hidrológico quando forçado com chuvas previstas incertas, conforme discutido no capítulo de verificação dos modelos ao viés na chuva deste texto.

Da mesma forma, para as métricas de erros gerais, o GEFS foi verificado em ambas as análises como o EPS com menores erros em situações de chuvas mais elevadas (no caso da chuva) e cheias (no caso da vazão). E o Super Ensemble apresentou um desempenho em geral similar ou superior aos EPS individualmente tanto nas análises de chuva quanto de vazão.

Contudo, apesar destas semelhanças entre as análises, a verificação entre apenas a chuva e a verificação das vazões mostram algumas diferenças. A primeira delas é dada pelas análises de coeficiente de variação, que mostram geralmente valores próximos da unidade

para a chuva, incluindo alguns valores maiores em épocas menos chuvosas, obtidos pelo trabalho com números pequenos. Já nas previsões de vazão os coeficientes de variação possuem um formato de “U” bem marcado, indicando que as grandes incertezas se concentram nos períodos úmidos, e geralmente os valores se situam abaixo de um, e as diferenças entre os modelos são mais evidentes, especialmente nos maiores horizontes de previsão.

A segunda diferença é a dada pelas métricas relacionadas com a detecção de limiares, como as curvas ROC e o BS. A ocorrência de determinadas cheias na bacia não pode ser simplesmente relacionada a limiares de chuva média, como os testados, já que a ocorrência de uma cheia depende de muitos outros fatores, como a umidade do solo no momento da ocorrência das chuvas e a distribuição espacial das precipitações. Assim, por mais que tenham sido avaliados diferentes limiares de chuva nas análises de chuva, eles não contêm as mesmas informações do que as análises feitas para os limiares de vazão. Isto é importante no contexto da UHE Aimorés, por exemplo, pois ela tem uma operação (“flushing” para a limpeza de sedimentos do reservatório) dependente da detecção de limiares de vazão.

O mesmo raciocínio é válido para as análises dos *reliability diagrams*, que demonstram em geral curvas de calibração diferentes entre as obtidas analisando a vazão e as analisando a chuva. A maior diferença é encontrada para o ECMWF-pf, que sugeriu viés condicional tipo I negativo nas análises de vazão, e positivo nas análises de chuva. Para os demais modelos as calibrações encontradas para os dados de chuva foram mais positivas do que as encontradas para as vazões, que em geral foram mais bem calibradas.

Os Rank Histograms, que medem o espalhamento das previsões, sempre indicam um grande viés negativo nas análises de chuva. Este viés de fato é observado também nas análises de vazão, contudo com uma curva em forma de “rampa” ou “L invertido” mais suave do que as curvas da chuva. Isso sugere um efeito de amortecimento do modelo hidrológico na geração das vazões, de forma que elas ficam um pouco mais espalhadas quando passam pelo modelo hidrológico.

A última maior diferença entre os resultados das análises de métricas pra chuva e vazão é a ocasionada pela assimilação de dados no modelo hidrológico (que, cabe aqui dizer, é diferente da assimilação de dados nos modelos meteorológicos), e pela incerteza adicionada à previsão pela modelagem hidrológica ao longo da previsão (evolução dos estados ao ser forçado pela chuva prevista). Em todos os resultados de vazão nota-se um aumento dos erros, de valores muito próximos do considerado ideal no início da previsão para valores mais

elevados ao final da previsão. Já nas análises de chuva, esta mudança das características dos ensembles ao longo dos horizontes de previsão é bem menos evidente, com alterações mais discretas entre o início e o fim da previsão. Além de isto ser visto nas métricas de qualidade, também pode ser visto na própria análise de coeficientes de variação.

Estas diferenças dadas pelas análises de chuva e vazão demonstram a transformação que a informação de chuva prevista sofre quando usada no modelo hidrológico, também adicionando incertezas, para gerar a informação de vazão. Estes efeitos podem ser atribuídos aos processos geração de escoamento pelo modelo, que incluem diferentes processos desde a geração direta de escoamento superficial até a geração de vazão provinda de fluxo de base, após a infiltração da água. E também a propagação de vazões entre diferentes regiões da bacia.

Como principal nota da comparação entre os resultados de chuva e vazão na bacia do rio Doce, pode-se dizer que uma análise apenas da precipitação média sobre a bacia serviu para indicar características gerais que podem ser esperadas nas previsões de vazão, como vieses nas grandes precipitações (e conseqüentemente nas cheias), e dar indicações do desempenho médio esperado na utilização de diferentes modelos. Contudo, ela não é capaz de fornecer informações de aspectos importantes na previsão hidrológica relacionados com a capacidade de detecção de limiares de cheia, espalhamento do conjunto, calibração da previsão, e incertezas que são incluídas simplesmente pela utilização do modelo hidrológico, como as alterações do desempenho da previsão devido à assimilação de dados, impacto da calibração do modelo hidrológico, e a variação dos estados do modelo hidrológico ao longo da previsão.

### 7.3. Bacia do Rio Tocantins

Para a bacia do Rio Tocantins foi selecionado apenas um limiar de vazão para o cálculo das métricas de desempenho. O valor de  $7200\text{m}^3/\text{s}$  foi escolhido por que representa aproximadamente a vazão  $Q_{10}$  da curva de permanência da vazão afluente a UHE Estreito. Este também é um valor relativamente alto de vazão que indica o início de uma situação de cheia na bacia.

Este valor foi usado nas análises tanto para as métricas de ultrapassagem de detecção de eventos discretos, quanto para as demais métricas de qualidade da previsão. Nestes últimos casos o limite foi usado visando considerar nos cálculos apenas o desempenho para altas vazões observadas, excluindo da medida de desempenho os longos períodos de recessão do hidrograma onde geralmente as previsões de chuva são iguais a zero e os resultados são puramente dependentes de observações e do modelo hidrológico.

Os resultados das análises de previsão de vazão para a Bacia do Rio Tocantins, para cada uma das métricas avaliadas, são apresentados a seguir.

#### 7.3.1. Análises Visuais

Para a análise visual das previsões de vazões na bacia do Rio Tocantins foram escolhidas também três entre as maiores cheias que ocorreram no período analisado e os seus hidrogramas previstos com alguns dias de antecedência foram plotados e analisados.

As seguintes previsões foram plotadas:

- 31/12/2011 12h
- 17/01/2013 12h
- 07/03/2014 12h

Foram analisadas as previsões para as seis fontes de dados de precipitação prevista consideradas neste trabalho: CPTEC-pf, GEFS, ECMWF-pf, Super Ensemble (combinação dos três EPS), ECMWF-fc (previsão determinística de referência), e chuva observada.

Na descrição das análises visuais foram considerados os seguintes aspectos nos hidrogramas:

- Capacidade de prever o pico da cheia;
- Erro da média e dos limites inferiores e superiores dos conjuntos;
- Capacidade de abranger as observações entre os membros dos conjuntos;

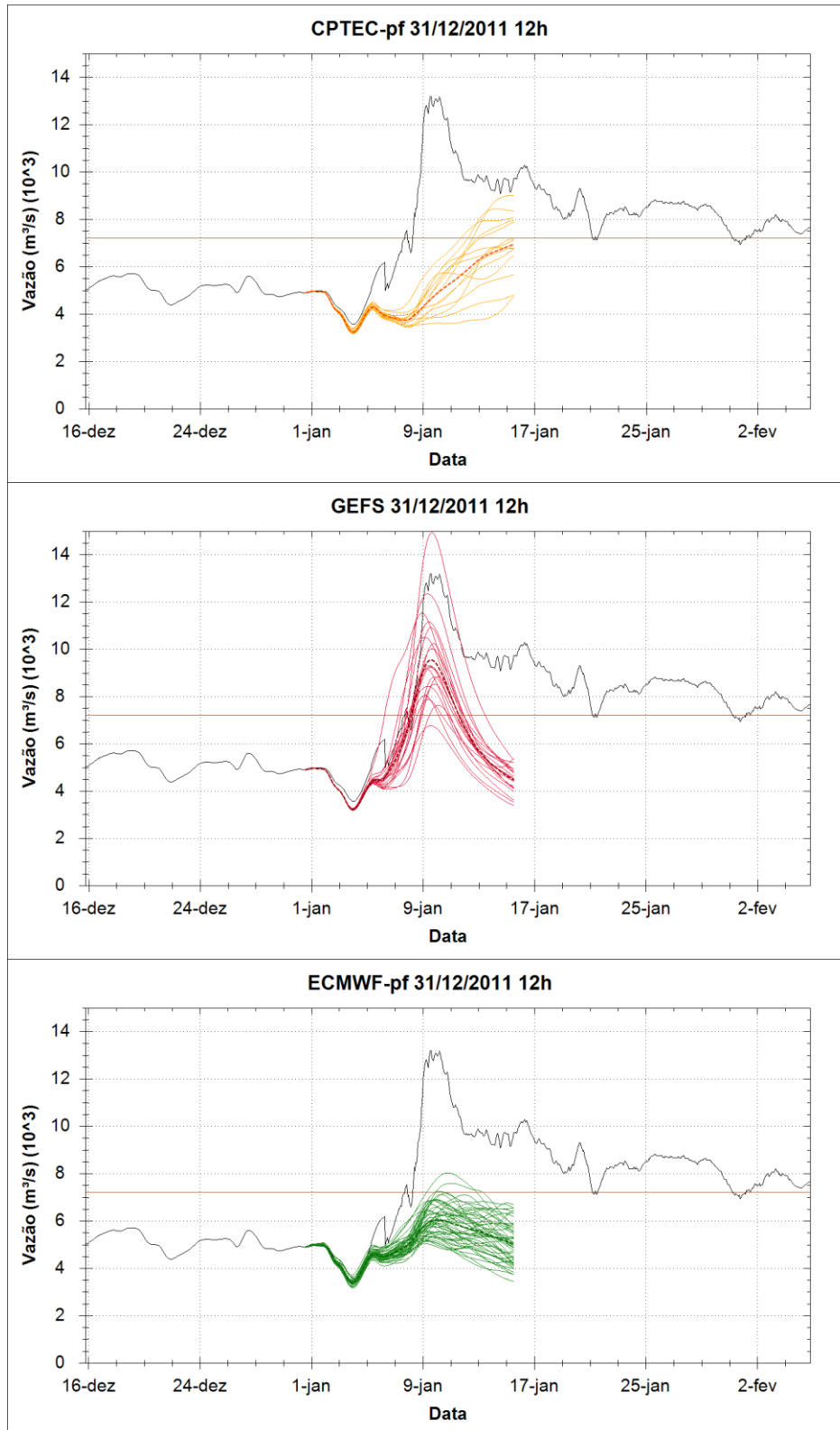


- Se a concentração de membros indicou as maiores probabilidades de ocorrência;
- Capacidade das previsões em discriminar a ultrapassagem do limiar ( $7200\text{m}^3/\text{s}$ ).

A Figura 152 e a Figura 153 apresentam as previsões feitas no dia 31/12/2011 às 12h para o início da cheia afluente a UHE Estreito no período chuvoso de 2011/2012. O evento de cheia a ser previsto teve pico de mais de  $13000\text{m}^3/\text{s}$  nos dias 09 e 10 de Janeiro de 2012, enquanto que no dia da previsão as vazões ainda estavam em torno de  $5000\text{m}^3/\text{s}$ .

Na previsão emitida pelo CPTEC-pf todos os membros do conjunto indicaram a ocorrência de subidas na vazão, porém mais lentas e com menor volume que a cheia efetivamente observada, onde no dia 9 de Janeiro, quando o pico aconteceu, o membro mais elevado indicou valores de aproximadamente  $6000\text{m}^3/\text{s}$ , e a ultrapassagem do limiar na data que ela aconteceu não foi sugerida. O espalhamento e a média do conjunto também não se mostraram adequados na comparação com as observações.

Na previsão do GEFS a grande maioria dos membros do conjunto sinalizou a subida do hidrograma com bom acompanhamento das observações, e com um espalhamento do conjunto muito pequeno em relação à ultrapassagem do limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , indicando pouca incerteza na possível ocorrência dos eventos. Alguns dos membros do conjunto também previram o pico da cheia em valores próximos ao observado. A média do conjunto teve um desempenho também muito próximo das observações até aproximadamente o dia 8 de Janeiro.



**Figura 152.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 31/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2011/2012. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.

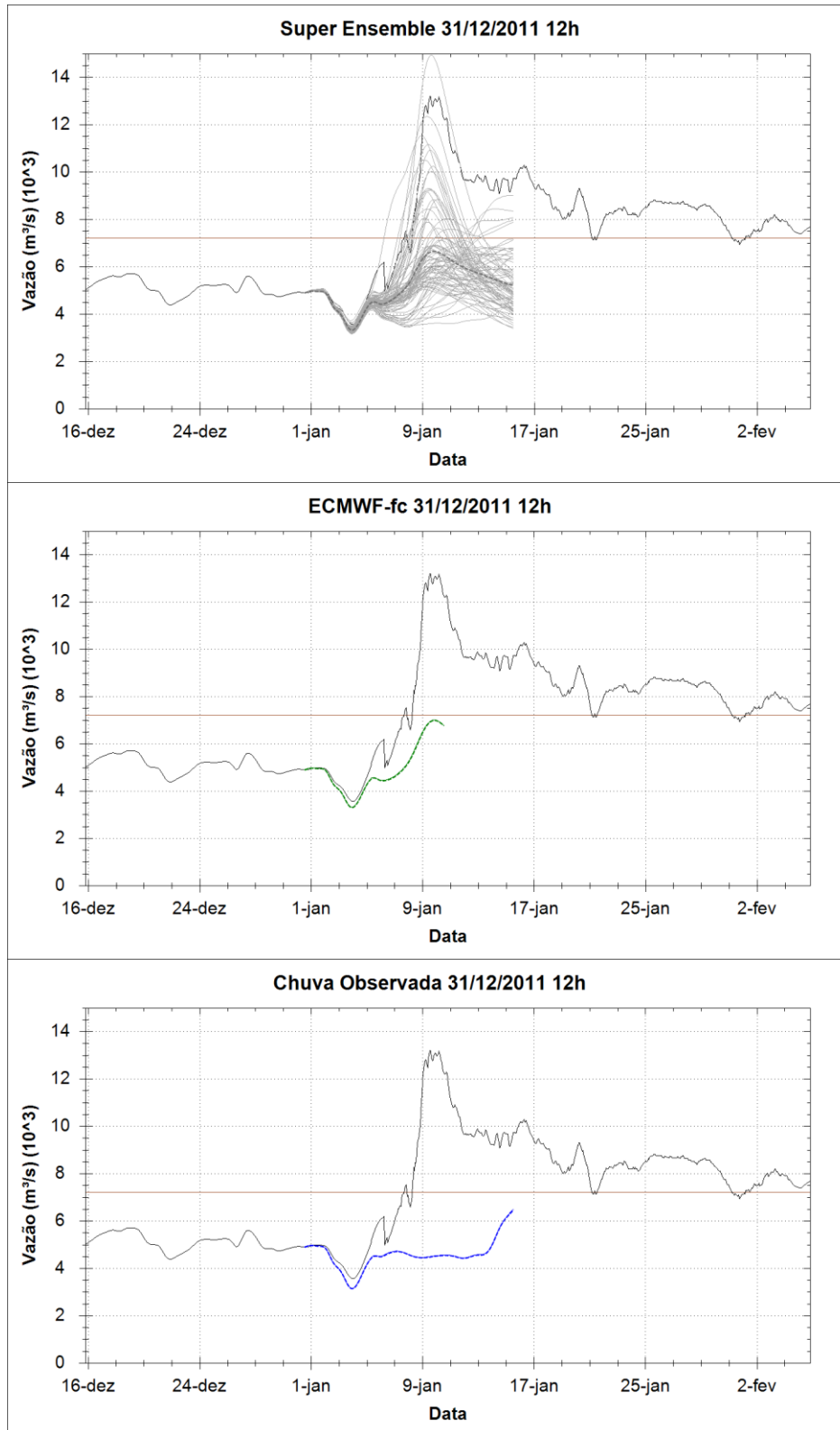


Figura 153. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 31/12/2011 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de  $7200 \text{ m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.

Já na previsão de vazão feita com o ECMWF-pf também foi verificado um desempenho que pode ser considerado ruim. Nenhum dos membros do conjunto apontou para a possibilidade de ocorrência do evento da grande cheia, onde em geral os volumes esperados foram subestimados. Apenas um pequeno número de membros do conjunto indicou a ultrapassagem do limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , com algumas horas de atraso.

Na previsão com o Super Ensemble, em termos de espalhamento, os membros cobriram de forma adequada as observações. Pode-se distinguir o efeito da presença do GEFS no conjunto, que indica efetivamente a ocorrência da cheia, e o efeito do ECMWF-pf e do CPTEC-pf que subestimam os volumes nas suas previsões. Isto pode ser considerado um efeito positivo da composição do Super Ensemble, uma vez que a presença dos três modelos sugere uma faixa mais ampla de possibilidades, incluindo membros que sugerem de forma apropriada a cheia. Todavia, também é possível dizer que talvez somente a presença do modelo com bons resultados seria mais adequada na detecção do pico da cheia.

A previsão determinística de referência mostrou uma tendência de subestimativa do pico também, não ultrapassando  $7200\text{m}^3/\text{s}$ . Em comparação com as previsões probabilísticas do GEFS, a informação sobre a possibilidade de uma grande cheia é inferior nesta previsão determinística.

Já a previsão com chuva observada neste caso também apresentou uma tendência de subestimativa da cheia. Possivelmente por que as chuvas que causaram este evento não foram bem captadas pelas estações existentes na bacia. Com isso, seu desempenho foi inclusive pior que o desempenho dos modelos meteorológicos.

A Figura 154 e a Figura 155 apresentam as previsões feitas no dia 17/01/2013 às 12h para uma cheia afluyente a UHE Estreito que ocorreu no período chuvoso de 2012/2013. O evento de cheia a ser previsto teve pico de aproximadamente  $9000\text{m}^3/\text{s}$  no dia 29 de Janeiro de 2013, ultrapassando o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ . No momento em que as previsões foram emitidas, a vazão era de aproximadamente  $5900\text{m}^3/\text{s}$ .

O CPTEC-pf apresentou uma ampla distribuição de seus membros em torno das observações, onde a maioria dos seus membros indicou a correta ultrapassagem do limiar de cheia e os membros centrais do conjunto indicaram a ocorrência do pico com uma boa precisão. A média do conjunto, portanto, apresentou um bom desempenho, com vazões máximas muito próximas das observadas.

O GEFS sugeriu, de uma forma geral, que uma cheia estava a caminho com grande chance de ultrapassagem do limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$  por todos os membros. Contudo, os primeiros

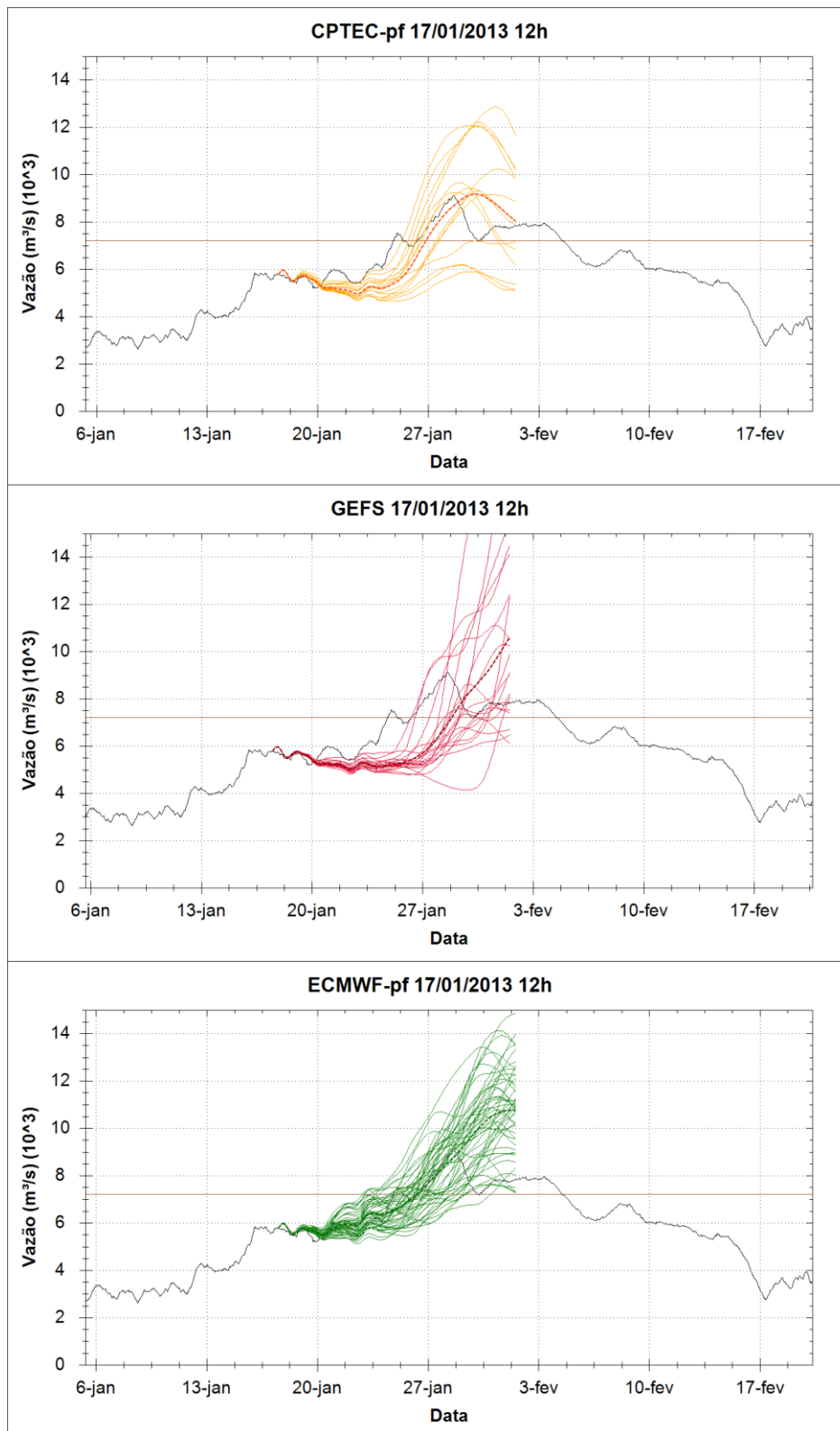
dias da previsão foram subespalhados e abaixo da observação, e no dia do pico vários membros indicaram uma cheia exagerada. Os maiores erros aconteceram depois do dia 29 de Janeiro de 2013.

O ECMWF-pf, ao contrário dos outros modelos, apresentou um bom espalhamento do conjunto desde o dia 20 de Janeiro de 2013, cobrindo completamente as observações. A ultrapassagem dos limiares foi bem demarcada por grande parte dos membros e a ocorrência do pico de cheia também foi detectada em tempo pela maioria dos membros do conjunto. Contudo, como ponto negativo, após a cheia, a grande maioria dos membros do conjunto seguiu indicando a possibilidade da vazão seguir aumentando, sugerindo vazões inclusive próximas de  $15000\text{m}^3/\text{s}$  no último horizonte de previsão. Assim, as previsões podem ser consideradas como bem sucedidas até aproximadamente 30 de Janeiro, a partir de onde se mostrar superestimadas.

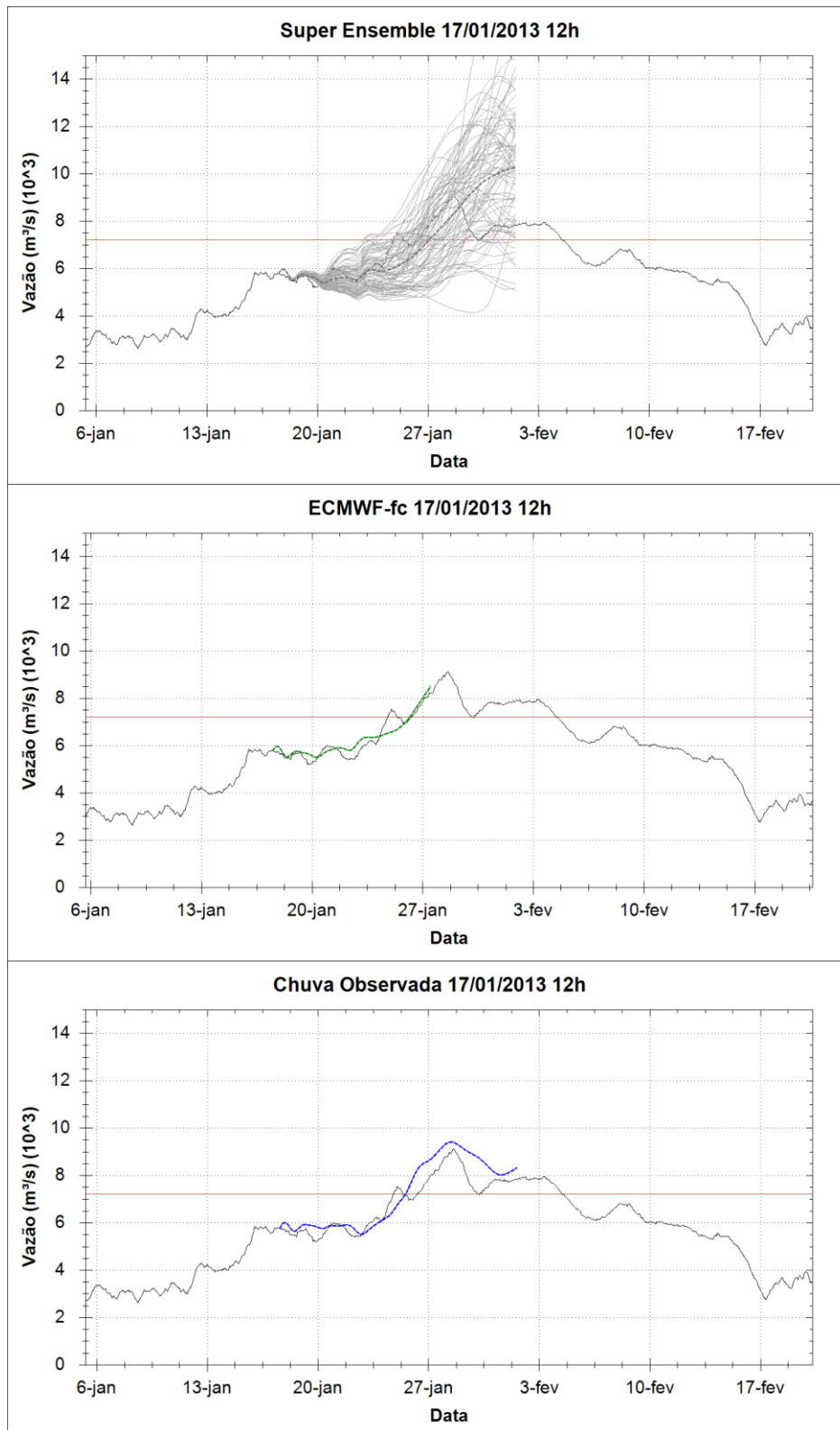
O Super Ensemble é abrangente em relação às observações, onde muitos membros mostram a ultrapassagem do limiar no momento certo. A média do conjunto também se situa próxima das observações. Contudo, assim como observado no GEFS e no ECMWF-pf, que compõem o Super Ensemble, muitos dos membros do Super Ensemble também indicam a ocorrência de vazões que continuam crescendo depois do dia 30 de Janeiro, o que efetivamente não ocorreu.

A previsão determinística do ECMWF-pf mostrou neste evento um bom acompanhamento das observações até o último horizonte de previsão. O seu desempenho pode ser considerado muito adequado para este caso em estudo.

Já a previsão com chuva observada do evento também um desempenho muito adequado, com uma boa representação do hidrograma. Incluindo ultrapassagem do limiar e cobertura do pico.



**Figura 154.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 17/01/2013 às 12h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2012/2013. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.



**Figura 155. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 28/02/2011 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2010/2011. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.**

A Figura 156 e a Figura 157 apresentam as previsões feitas no dia 07/03/2014 às 00h para o início da maior cheia afluyente a UHE Estreito no período chuvoso de 2013/2014. O evento ocorreu entre os dias 11 e 16 de Março de 2014, com vazões máximas próximas de 12000m<sup>3</sup>/s. O evento foi motivado pela operação das UHEs a montante da UHE Estreito, e as chuvas que ocorreram na bacia não foram as principais responsáveis pela subida na vazão. Este é um tipo de acontecimento particular destes tipos de bacia hidrográfica onde as vazões sofrem influência antrópica de operação de reservatórios.

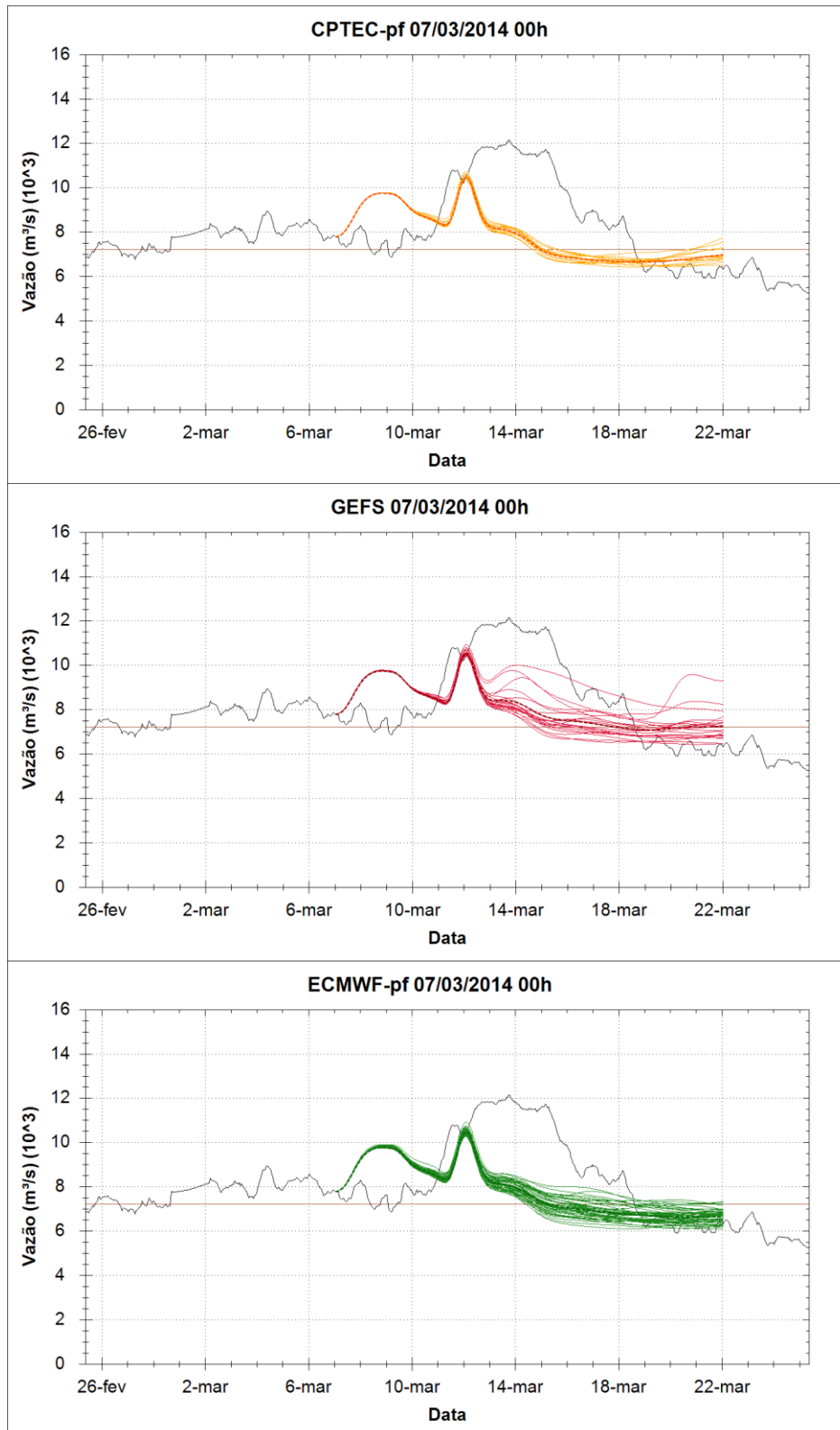
Neste evento em particular todas as previsões realizadas mostraram uma tendência de subestimar a ocorrência do evento, já que ele não foi gerado somente pela chuva na bacia. Nas previsões, o começo do evento ocorre devido a substituição de vazões das usinas na bacia com o modelo de previsão, o que ocasiona o pico mostrado nas previsões de aproximadamente 10000m<sup>3</sup>/s no dia 12 de março de 2014.

A partir do pico da cheia todos os modelos indicaram a ocorrência de poucas chuvas, insuficientes para aumentar a vazão. Mas mesmo assim a cheia continuou devido a operação das usinas em intervalos de tempo agora não mais considerados no horizonte de previsão dos experimentos.

Em todas as previsões por conjunto do CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf, no Super Ensemble, e na previsão determinística de referência ECMWF-fc nota-se este efeito. A previsão que mais se assemelhou das observações foi a feita com chuva observada, e ainda assim as vazões foram subestimadas em mais de 2000m<sup>3</sup>/s.

Este exemplo de hidrograma mostra que a modelagem hidrológica para previsões de vazão não só está sujeita a incertezas nos modelos em si, mas também a incertezas adicionadas pela interferência antrópica no regime de vazões das bacias hidrográficas.





**Figura 156.** Previsões feitas, respectivamente, com o CPTEC-pf, GEFS, e ECMWF-pf no dia 07/03/2014 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.

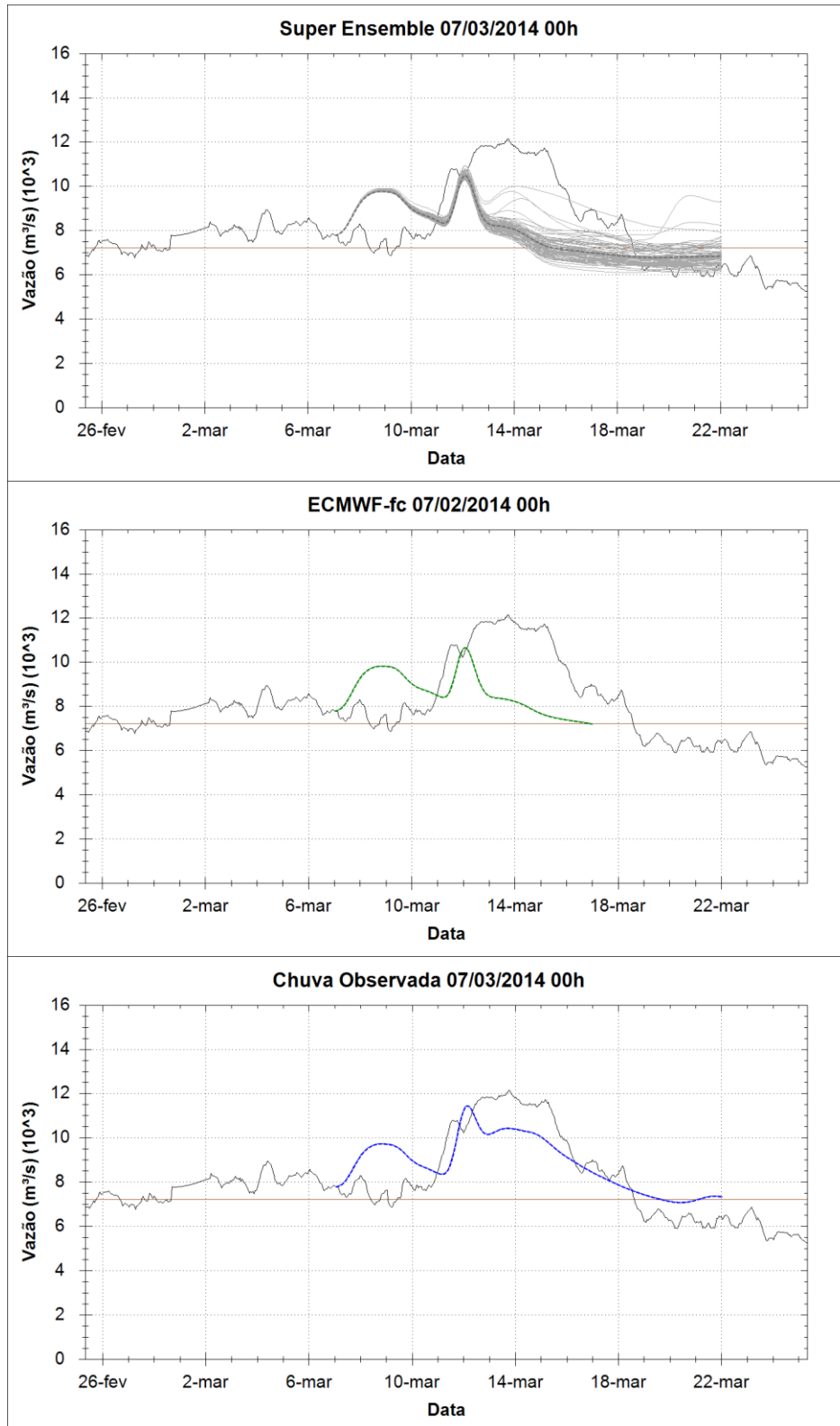


Figura 157. Previsões feitas, respectivamente, com o Super Ensemble, ECMWF-fc, e Chuva Observada no dia 07/03/2014 às 00h. No início da maior cheia no período chuvoso de 2008/2009. A linha escura contínua mostra as observações, a linha horizontal o limiar de  $7200 \text{ m}^3/\text{s}$ , as linhas coloridas as previsões, e a linha pontilhada a média do ensemble.

### 7.3.2. Análise do desvio padrão dos ensembles

Na Figura 158 é apresentada uma análise do desvio padrão, média, e coeficiente de variação entre os membros das previsões por conjunto em função do mês para o qual a previsão foi emitida (climatologia dos desvios padrão). Os valores apresentados para cada mês correspondem ao valor médio computado para aquele mês ao longo de todo o período analisado.

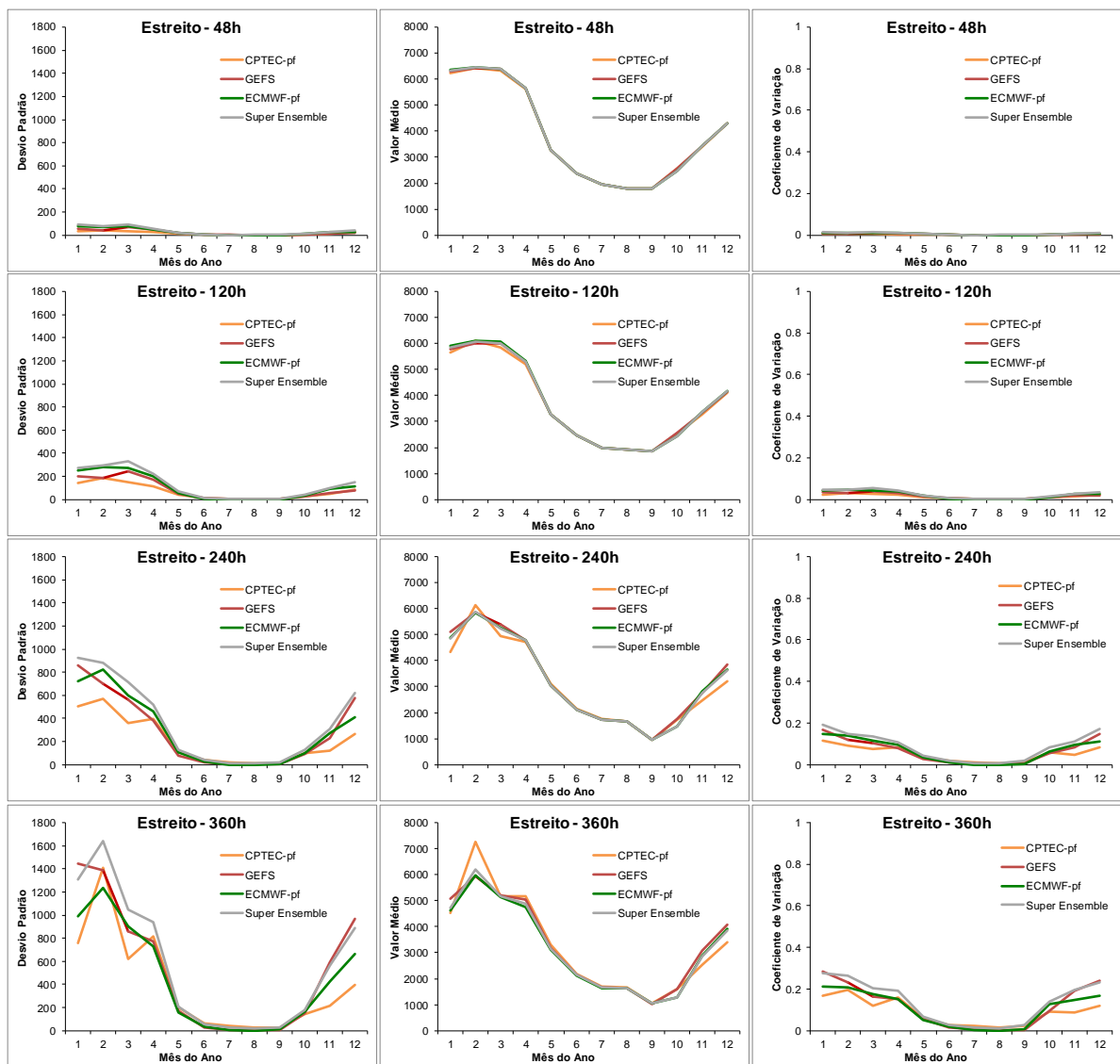


Figura 158. Climatologia do desvio padrão, média, e coeficiente de variação das previsões de vazão para a bacia do Rio Tocantins, no ponto da UHE Estreito.

Assim como verificado nas demais bacias, o formato de “U” das curvas mostra que durante os meses secos o desvio padrão das previsões é pequeno, praticamente zero, possivelmente por que todos os membros do conjunto geralmente preveem chuvas próximas de zero. Já durante os meses úmidos os valores de desvio são maiores, que é o período chuvoso nas bacias. Comportamento similar é encontrado para as médias, que também, em geral, possuem valores muito próximos entre os EPS usados.

Com o aumento dos horizontes de previsão nota-se um aumento no desvio padrão das previsões para o período chuvoso. A variação é de valores próximos de  $200\text{m}^3/\text{s}$  no horizonte de 120h até valores em torno de  $1000\text{m}^3/\text{s}$  no horizonte de 360h.

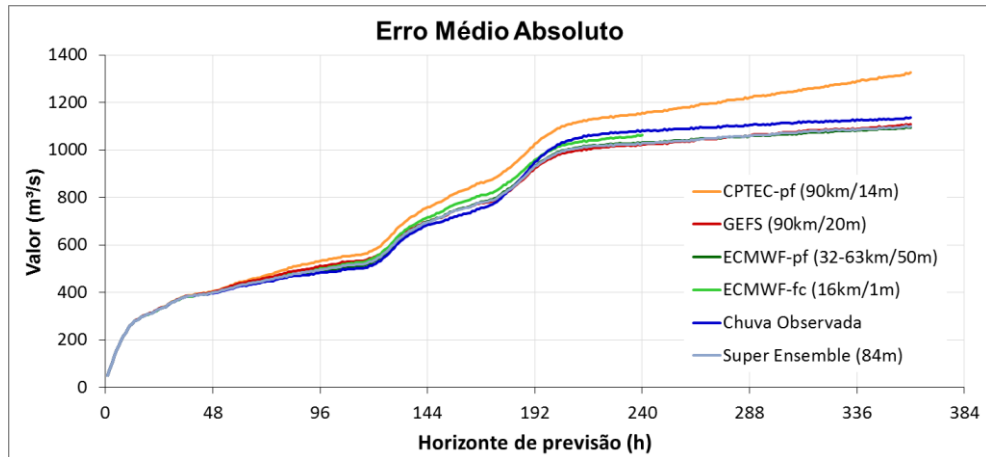
Na comparação entre os EPS geralmente os desvios padrão do CPTEC-pf para o período chuvoso foram menores do que o desvio dos demais modelos em todos os horizontes de previsão. Isto indica que os membros do conjunto são menos espalhados entre si do que os dos demais modelos. O ECMWF-pf indicou um desvio padrão geralmente maior que os demais EPS nos horizontes de 120h e 240h, e o GEFS um desvio maior no horizonte 360h.

Em relação ao comportamento do Super Ensemble, em geral ele sugeriu um desvio maior que os EPS que o compõem. Novamente acredita-se que isto possivelmente ocorre devido ao fato de ele ser formado por três conjuntos que quando combinados indicam um leque de trajetórias mais amplo que qualquer um dos EPS individualmente. Assim como foi observado em algumas das análises visuais.

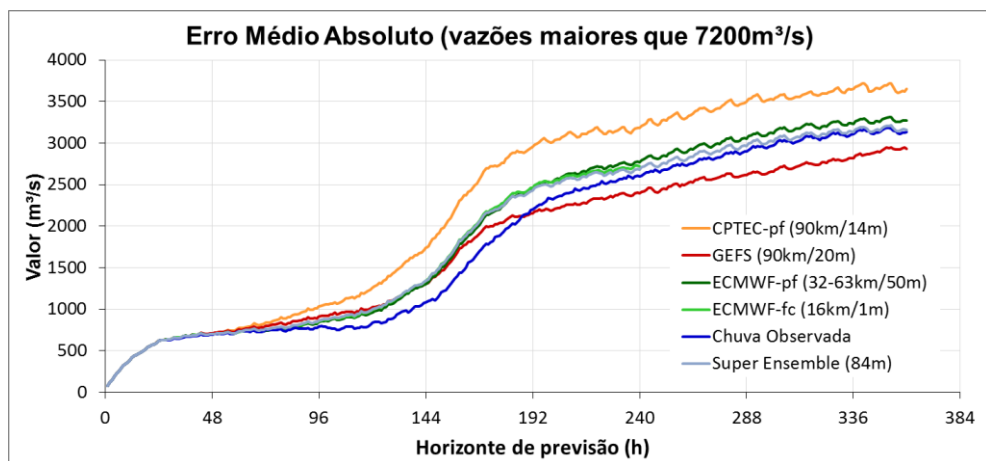
Conclusões similares às comentadas para o desvio padrão podem ser tiradas do coeficiente de variação.

### **7.3.3. Erro Médio Absoluto**

Os resultados obtidos para o Erro Médio Absoluto (EMA) de cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 159 e na Figura 160.



**Figura 159.** Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados.



**Figura 160.** Resultados de EMA na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando vazões maiores que  $7200\text{m}^3/\text{s}$ .

Em termos de formato dos resultados, com o aumento do horizonte de previsão observa-se um aumento nos erros, e os erros nos horizontes iniciais da previsão são similares para todas as fontes de dados, como esperado. Adicionalmente, também nota-se nos resultados do rio Tocantins uma mudança na tendência das linhas que representam os erros entre os horizontes de previsão de 120h a 192h. Esta mudança de tendência acontece devido ao efeito da consideração das defluências dos reservatórios nas simulações, cujas defluências foram consideradas completamente conhecidas nos três primeiros dias de previsão, e a partir de então todos os reservatórios foram considerados como operando a fio d'água. Com isso, o desempenho das previsões tende a piorar de forma mais abrupta dentro dos horizontes citados.

Na previsão com chuva observada nota-se que o modelo tem um desempenho com erros que chegam até  $1100\text{m}^3/\text{s}$  no horizonte de previsão quando são considerados todos os dados, e até aproximadamente  $3000\text{m}^3/\text{s}$  quando são consideradas apenas as altas vazões.

Em relação aos EPS testados, o CPTEC-pf apresentou os maiores erros nas duas análises realizadas. Na análise considerando todos os dados os erros chegaram até cerca de  $1300\text{m}^3/\text{s}$ . Já na análise considerando apenas as maiores vazões os erros variaram entre apontaram até cerca de  $3600\text{m}^3/\text{s}$  antecedências de 360h.

Os erros do GEFS foram os menores entre os EPS testados, incluindo melhores em alguns momentos do que a própria previsão usando chuva observada na análise considerando somente as altas vazões. Os erros ficaram em cerca de  $1100\text{m}^3/\text{s}$  e  $2900\text{m}^3/\text{s}$  nas antecedências de 360h, pas as análises respectivamente considerando todos os dados e considerando apenas as altas vazões.

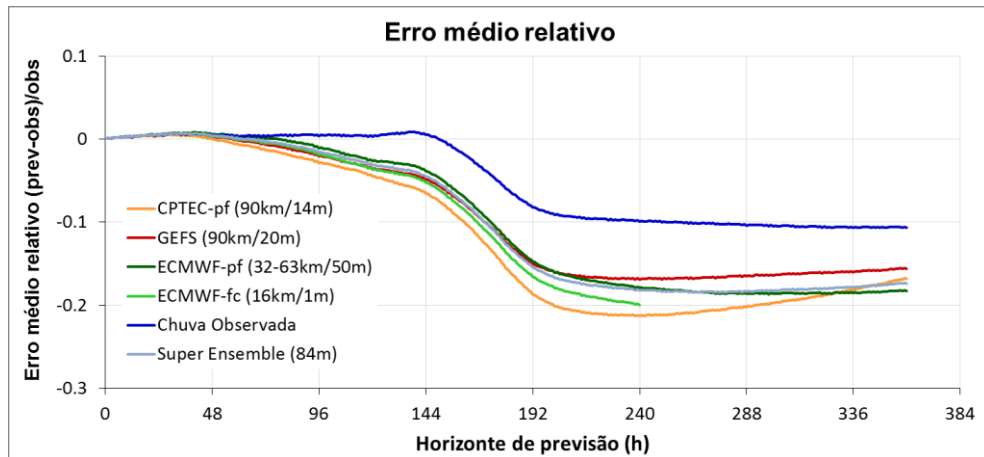
A média do ECMWF-pf mostrou um desempenho muito similar ao GEFS e a previsão perfeita na análise com todos os dados. Na análise com altas vazões os seus erros foram um pouco maiores que os da previsão com chuva observada, mostrando cerca de  $3300\text{m}^3/\text{s}$  (360h).

O Super Ensemble, composto pelos três EPS, apresentou um desempenho de erro médio absoluto similar ao do ECMWF-pf em ambos os casos. Já a previsão determinística ECMWF-fc apresentou um desempenho que pode ser considerado u melhor que CPTEC-pf, equivalente ao ECMWF-pf e ao Super Ensemble, e inferior aos resultados do GEFS.

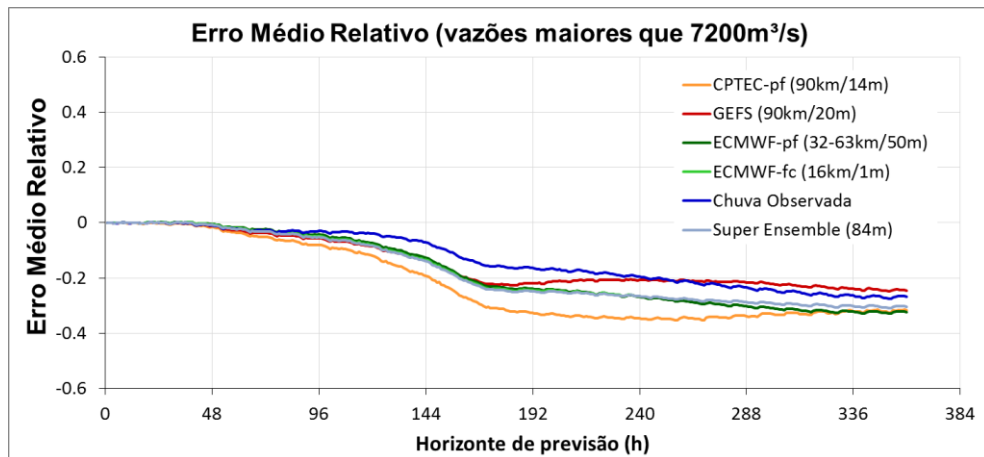
Ainda, é válido notar que os resultados obtidos indicando desempenho superior do GEFS em comparação com a chuva perfeita indicam que a chuva observada pode não estar captando devidamente todos os fenômenos que acontecem na bacia.

#### **7.3.4. Erro Médio Relativo**

Os resultados obtidos de Erro Médio Relativo (EMR) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 137 e na Figura 138.



**Figura 161. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados.**



**Figura 162. Resultados de EMR na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando vazões maiores que 7200m³/s.**

Nos resultados de EMR também se notam aumentos dos erros com o aumento do horizonte de previsão, com uma maior diferenciação dos resultados dos modelos após os primeiros três dias de horizonte de previsão (96h). Além disso, também nota-se o reflexo da consideração das vazões defluentes das usinas nos resultados, com a mudança de tendência dos erros a partir da antecedência de cerca de 140h.

Na previsão com chuva observada os erros foram geralmente os mais próximos de zero, embora a partir do momento em que as defluências das usinas passam a deixar de fazer efeito o erro passe a ser cerca de -10% considerando todos os dados e -30% quando são consideradas apenas as vazões altas.

Os resultados das previsões usando os modelos meteorológicos neste caso podem ser interpretados de maneira conjunta. De uma forma geral todos os modelos apresentaram um

erro na ordem de -5% nos horizontes iniciais da previsão, e um erro em torno de -20% nos horizontes finais, na análise usando todos os dados. Já na análise considerando apenas as vazões altas os modelos apresentaram um erro na ordem de -5% nos horizontes iniciais da previsão, e um erro em torno de -30% nos horizontes finais.

Dentre os EPS, o que se destacou pelos erros ligeiramente mais próximos de zero foi o GEFS. A previsão determinística apresentou resultados em geral piores que o ECMWF-pf e o GEFS, e ligeiramente melhores que o CPTEC-pf. E o Super Ensemble mostrou resultados sempre similares ao ECMWF-pf, que é o ensemble com mais membros.

### 7.3.5. Correlação

Os resultados obtidos de coeficiente de correlação ( $r$ ) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 163 e na Figura 164.

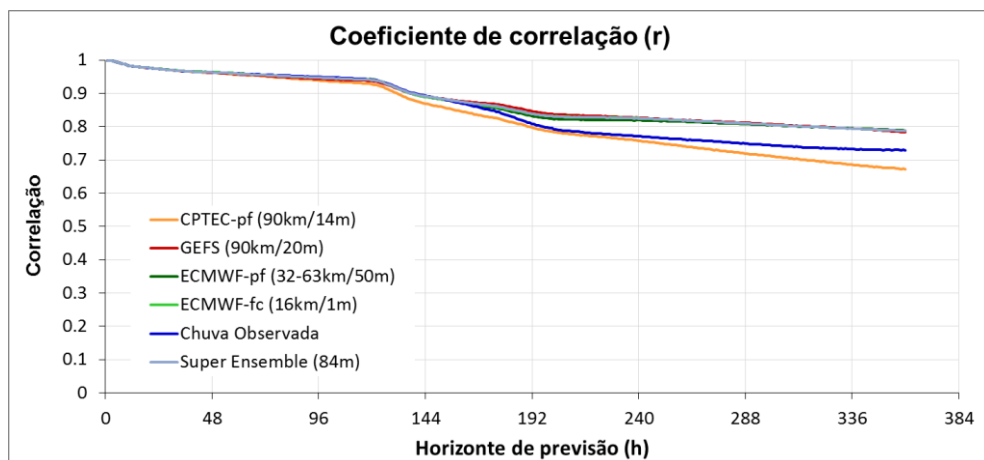
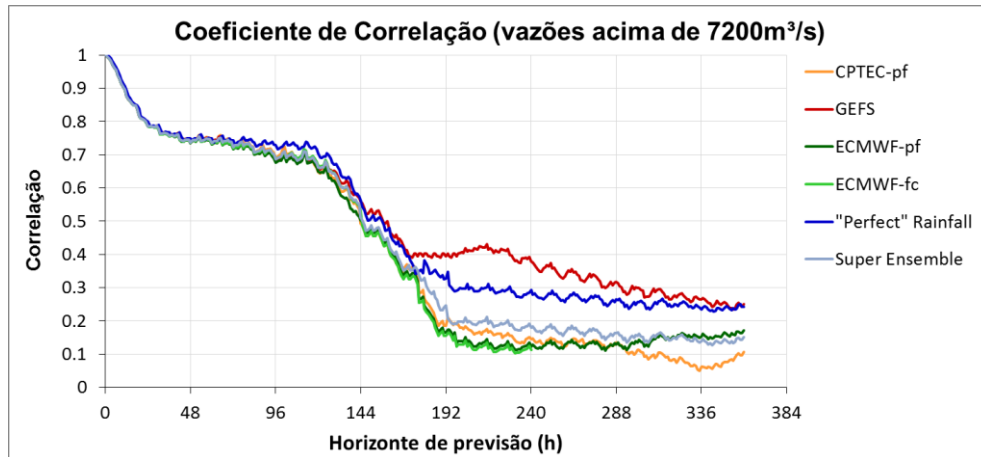


Figura 163. Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados.





**Figura 164.** Coeficiente de correlação na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando apenas com vazões maiores que  $7200\text{m}^3/\text{s}$ .

Nos primeiros intervalos de tempo da previsão, o coeficiente de correlação até pouco menos de 144h de antecedência ficaram situados entre 1,0 e 0,8 na análise com todos os dados, e entre 1,0 e 0,7 na análise com as maiores vazões (exceção para a previsão determinística, que apresenta coeficientes menores neste último caso).

Na previsão com chuva observada os coeficientes de correlação tiveram um mínimo de 0,7 quando considerados todos os dados. E apresentaram uma queda no desempenho que chegou próximo de 0,3 nas últimas antecedências, quando são consideradas apenas as altas vazões.

Na análise considerando todos os dados o GEFS, o ECMWF-pf e o Super Ensemble mostraram desempenho muito similar, atingindo valores próximos de 0,8 nas últimas antecedências. Neste caso, este desempenho foi inclusive um pouco superior ao da previsão com chuva observada.

O CPTec-pf, o ECMWF-pf e o Super Ensemble apresentaram um desempenho similar nas análises de altas vazões, com coeficientes de correlação que variaram entre 0,7 (96h) a cerca de 0,1 (360h). Nesta análise o GEFS mostrou um desempenho superior aos demais EPS, com correlações sempre maiores que 0,2. E a previsão determinística mostrou um desempenho sempre pior que todas as outras fontes de dados usados, chegando a correlações próximas de zero nos seus últimos intervalos de tempo (240h).

### 7.3.6. CRPS Médio

Os resultados obtidos para o CRPS médio para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para cada um dos limiares de análise, são apresentados na Figura 165 e na Figura 166.

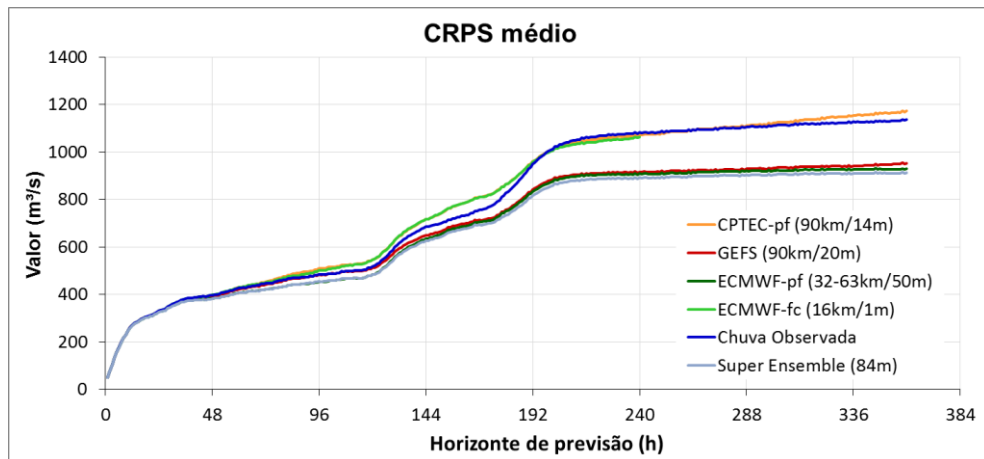


Figura 165. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando todos os dados.

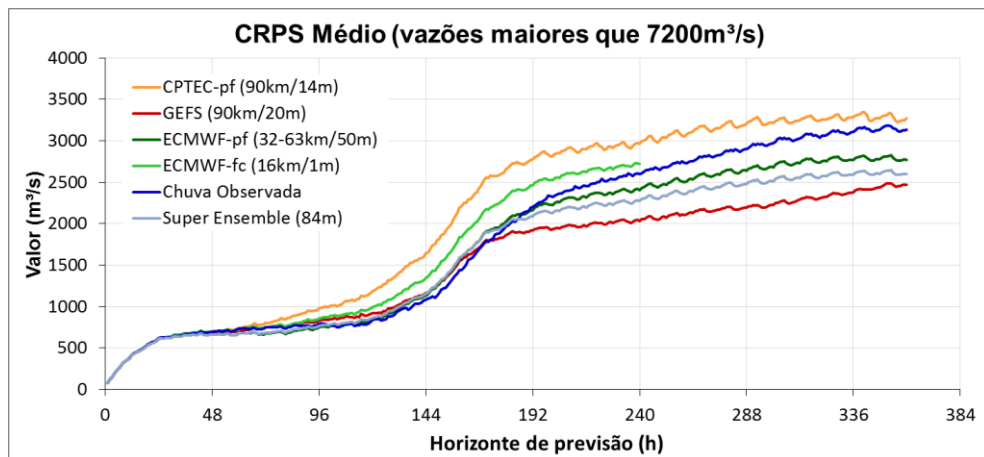


Figura 166. Resultados de CRPS médio na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins apenas vazões maiores que 7200m³/s.

Assim como nas demais métricas, nas análises de CRPS médio o aumento do horizonte de previsão também sugere um aumento nas incertezas. E como foi observado nas demais métricas de verificação na bacia do Tocantins, existe uma mudança no

comportamento dos erros a partir do horizonte 120h, possivelmente relacionado com a consideração das defluências dos reservatórios.

O CRPS médio para as previsões com chuva observada é equivalente ao EMA, pois esta é uma previsão determinística. Estes erros variaram entre 400m<sup>3</sup>/s (48h) a 1150m<sup>3</sup>/s (360h) na análise com todos os dados, e entre 600m<sup>3</sup>/s (48h) e 3200m<sup>3</sup>/s (360h) quando são consideradas apenas as altas vazões.

O CPTEC-pf apresentou um desempenho que pode ser considerado um pouco inferior aos demais EPS, chegando a valores de aproximadamente 1200m<sup>3</sup>/s (360h) para a análise com todos os dados, e 3200m<sup>3</sup>/s (360h) para a análise de altas vazões.

O GEFS apresentou o melhor desempenho geral em termos de CRPS médio, especialmente na análise considerando altas vazões onde os valores no máximo 2500m<sup>3</sup>/s na antecedência de 360h. Na análise com todos os dados os valores na antecedência final de 360h foram menores que 1000m<sup>3</sup>/s. Este desempenho foi inclusive melhor do que o desempenho da previsão com chuva observada.

O ECMWF-pf apresentou um desempenho muito similar ao GEFS na análise com todos os dados, e erros maiores na análise apenas com altas vazões. Nesse último caso, os erros chegaram a 2800m<sup>3</sup>/s (360h). Este desempenho também é melhor do que o desempenho da previsão com chuva observada.

Parte do desempenho inferior das previsões com chuva observada pode ser atribuída ao fato da medição da chuva observada na bacia não ter distribuição satisfatória.

Na análise do Super Ensemble, os valores apresentaram um desempenho de CRPS médio na mesma ordem de valores que o GEFS e o ECMWF-pf, ficando entre os dois na análise de altas vazões.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de CRPS são também equivalentes ao EMA. Na análise considerando todos os dados o erro variou entre 400m<sup>3</sup>/s na antecedência de 48h até cerca de 1100m<sup>3</sup>/s nas antecedências de 240h. Já na análise considerando apenas as maiores vazões o CRPS médio variou entre 800m<sup>3</sup>/s na antecedência de 48h até pouco menos de 1600<sup>3</sup>/s na antecedência de 240h.

Na comparação do desempenho entre a previsão determinística e os EPS pode-se dizer que a previsão determinística apresentou um desempenho inferior aos EPS do GEFS e do ECMWF-pf em termos de CRPS para todas as análises. Ou seja, a maior parte dos resultados, principalmente do GEFS e do ECMWF-pf, sugere uma vantagem na utilização das previsões

por ensemble. Para o CPTEC-pf a comparação com o determinístico não mostrou diferenças claras.

### 7.3.7. Rank Histogram

Os Rank Histograms obtidos com cada um dos EPS mais o Super Ensemble para cada um dos limiares de análise são apresentados na Figura 167 e na Figura 168.

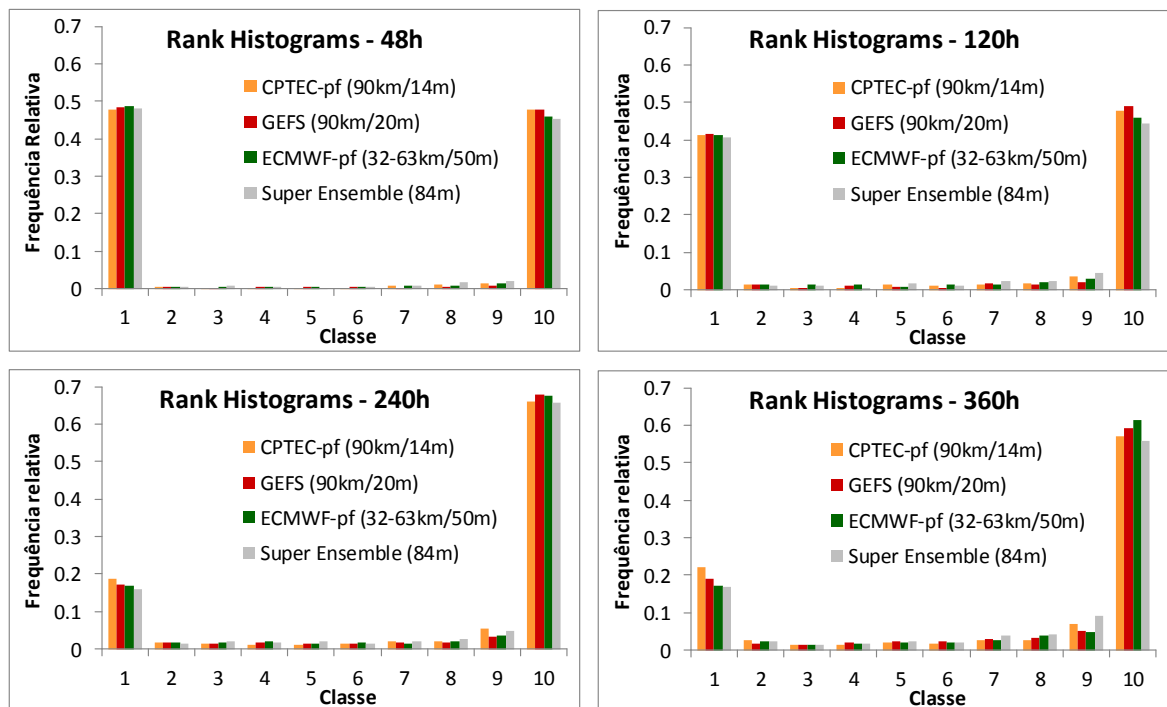
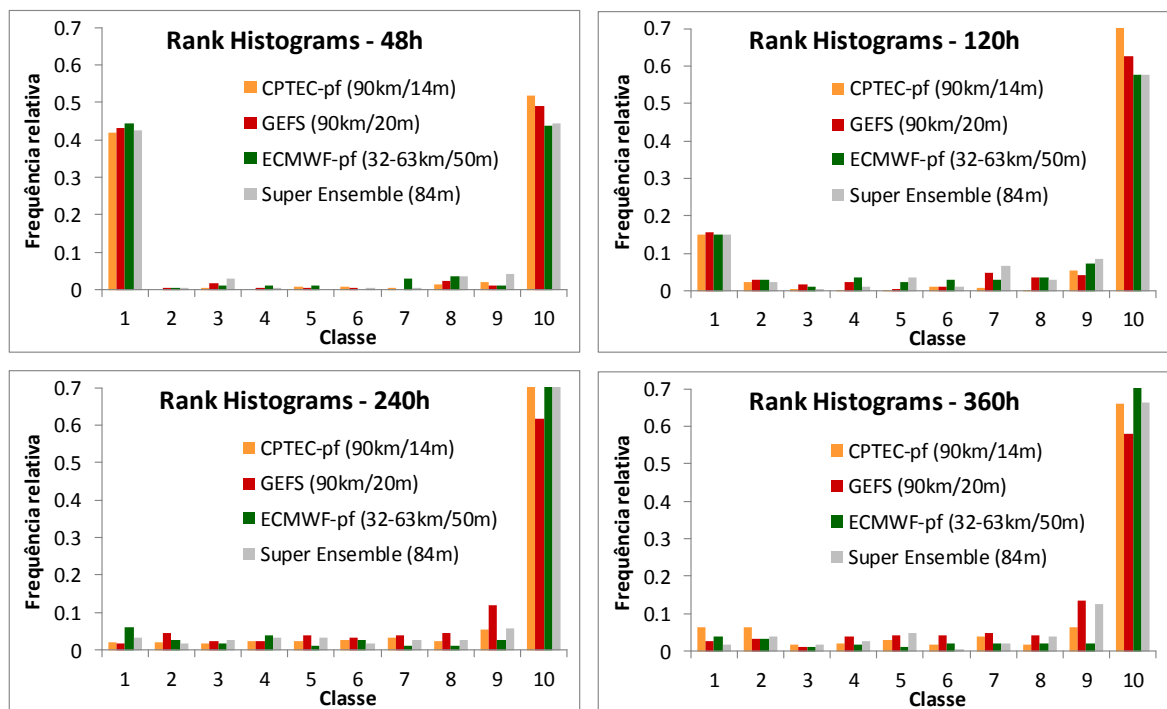


Figura 167. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Tocantins considerando todos os dados.



**Figura 168. Rank Histograms na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando apenas com vazões maiores que  $7200\text{m}^3/\text{s}$ .**

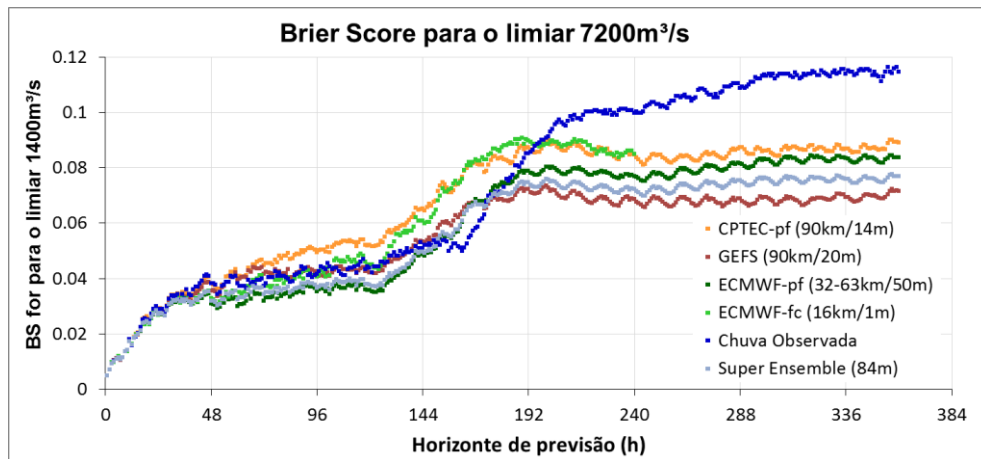
Em relação a análise com todos os dados, nos dois primeiros Rank Histograms (48h e 120h) correspondentes a análise com todo o período de dados disponíveis observa-se uma tendência geral para o formato de “U”, que é um indicativo de falta de espalhamento do conjunto, já que simboliza que as observações se concentram muito sempre acima ou abaixo dos resultados do conjunto. Nos outros dois horizontes de previsão (240h e 360h) os histogramas sugerem um formato de “U” porém com frequências muito maiores de observações na classe dez, indicando de viés negativo nos resultados (isto é, maior ocorrência das observações acima ou entre os membros superiores dos hidrogramas do ensemble).

Na segunda sequência de histogramas, que considera apenas as vazões acima do limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , na antecedência de 48h o formato geral é de “U”, indicando pouco espalhamento no conjunto. Já os histogramas para as demais antecedências novamente indicam um formato de “L invertido”, sugerindo uma grande frequência de observações acima ou entre os membros superiores do conjunto de previsões.

Este comportamento foi muito similar na comparação entre todos os EPS, onde não pode-se dizer que um viés mais pronunciado foi identificado em um ou outro modelo.

### 7.3.8. Brier Score

Os resultados obtidos para o Brier Score (BS) com cada um dos EPS, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, são apresentados na Figura 169.



**Figura 169. Resultados de BS na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ .**

Assim como para as outras métricas de erro, na análise de BS os erros aumentam com o aumento do horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. E nos primeiros intervalos de tempo, até cerca de 48h, os valores são muito similares entre os diferentes dados de chuva prevista devido ao fato do começo da previsão ser mais dependente das condições observadas e tempo de concentração da bacia.

O BS obtido para as previsões com chuva observada variou de 0,04 na antecedência 48h até cerca de 0,12 na antecedência de 360h.

O CPTEC-pf apresentou os valores de BS mais altos (pior desempenho) em comparação com os demais EPS. Os valores de BS variaram entre 0,04 (antecedência de 48h) até aproximadamente 0,09 (antecedência de 360h).

O GEFS apresentou os valores de BS mais baixos (melhor desempenho) em comparação aos demais EPS. Os valores de BS variaram entre 0,04 (antecedência de 48h) até aproximadamente 0,07 (antecedência de 360h).

O ECMWF-pf apresentou valores de BS situados entre o CPTEC-pf e o GEFS. Seus valores de BS variaram entre 0,04 (antecedência de 48h) até aproximadamente 0,08 (antecedência de 360h). Este resultado foi muito próximo ao da análise de Super Ensemble,

onde os valores apresentaram somente um BS ligeiramente menor que o ECMWF-pf em todos os horizontes de previsão.

Os resultados da previsão determinística (ECMWF-fc) em termos de BS foram inferiores aos resultados dos EPS em todos os horizontes de previsão. Os valores de BS para o ECMWF-fc variaram entre 0,04 nas antecedências iniciais da previsão até aproximadamente 0,11 nas antecedências finais.

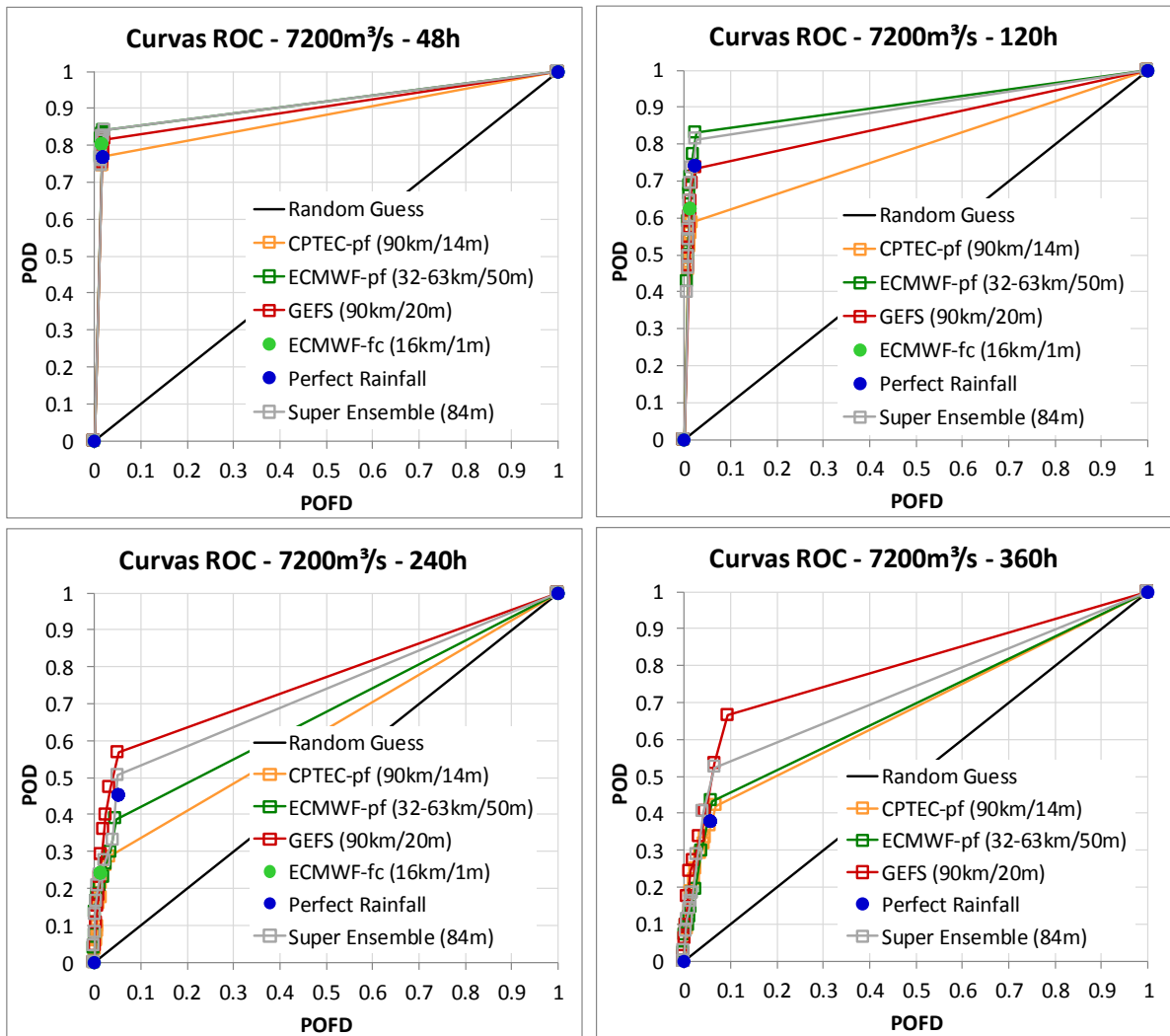
Na comparação do desempenho dos modelos de previsão de chuva com a previsão com chuva perfeita nota-se que os EPS também mostraram um desempenho superior ao das previsões com chuva perfeita. Novamente evidenciado que a falta de informação de chuva na bacia pode ser um problema importante a ser considerado nas previsões.

### 7.3.9. Diagramas ROC

O diagrama ROC é a segunda estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados para o rio Tocantins. Os diagramas ROC para cada um dos EPS usados, previsão determinística, e mais o Super Ensemble são apresentados na Figura 170.

Na antecedência de 48h a análise das curvas ROC para o limiar  $7200\text{m}^3/\text{s}$  é muito similar para todos os dados de chuva utilizados. Isto acontece por que nesta antecedência existe muita dependência das observações sobre os resultados, e pouca influência das previsões. Já para os maiores horizontes é possível verificar as diferenças entre os resultados.

O desempenho do CPTEC-pf para o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$  geralmente apresentou POFD muito similar aos demais EPS, porém com valores de POD geralmente menores considerando os diferentes percentis da previsão. Por exemplo, na antecedência de 240h considerando o maior percentil a POD foi de aproximadamente 0,3 e a POFD de aproximadamente 0,04.



**Figura 170. Resultados das curvas ROC com limiar de 7200m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins.**

O desempenho do GEFS para a antecedência de 240h e limiar de 7200m<sup>3</sup>/s, considerando os percentis mais altos da previsão, foi uma POD de aproximadamente 0,58 e POFD de aproximadamente 0,05. Já para antecedência de 360h foi uma POD de 0,6-0,7 e POFD de aproximadamente 0,1. Considerando estes resultados e os demais pontos da curva pode-se dizer que o desempenho geral do GEFS foi um dos melhores para as maiores antecedências, principalmente considerando os maiores percentis do conjunto, já que para mesmas taxas de alarme falso ele possui maiores taxas de alarmes verdadeiros.

O desempenho do ECMWF-pf foi geralmente o melhor entre os EPS em termos de POD (0,8-0,9) no horizonte de previsão de 120h, com POFD muito próxima de zero. Já nos horizontes maiores seu desempenho foi menor. Nos horizontes maiores o desempenho do



ECMWF-pf considerando os percentis mais altos da previsão foi uma POD de aproximadamente 0,3-0,4 e POFD de em torno de 0,05.

O Super Ensemble no caso das previsões para o limiar de 7200m<sup>3</sup>/s apresentou um desempenho situado entre os resultados do GEFS e do ECMWF-pf em termos de POD para uma dada POFD. Por exemplo, na curva para 240h a POD foi de aproximadamente 0,5 e a POFD foi de 0,05.

O desempenho da previsão determinística (ECMWF-fc) foi geralmente inferior aos percentis superiores do ECMWF-pf e do GEFS em todas as análises realizadas. Como exemplo, o desempenho do ECMWF-fc para a antecedência de 120h e limiar de 7200m<sup>3</sup>/s foi uma POD de aproximadamente 0,6 e POFD de 0,02. Para o horizonte de 240h o POD foi em torno de 0,3 para uma POFD em torno de 0,05.

O desempenho encontrado para as previsões com chuva observada foi geralmente inferior ao desempenho encontrado com os limiares superiores das previsões por ensemble. Por exemplo, nas análises com 120h de horizonte de previsão a POD ficou em torno de 0,75 para uma POFD de 0,02 e com 240h de horizonte a POD ficou em torno de 0,45 para uma POFD de 0,05. Novamente este desempenho serve para mostrar que a chuva observada na bacia e outros erros hidrológicos (por exemplo, limitações do modelo calibrado) ainda são importantes desafios a serem superados, pois este desempenho de POD não está próximo do que seria considerado “perfeito”, mesmo com o uso de observações.

### **7.3.10. Reliability Diagrams**

O Reliability Diagram mede o viés condicional tipo das previsões, que é a relação entre a distribuição condicional de observações em relação às probabilidades previstas. Ele é a terceira estatística para eventos discretos analisada nesta sequência de resultados. Os *Reliability Diagrams* para cada um dos EPS usados e o Super Ensemble, são apresentados na Figura 171. Estes diagramas foram construídos considerando 5 classes de probabilidade de detecção (0-20%; 20-40%; 40-60%; 60-80%; e 80-100%).

Como também aconteceram no caso do rio Doce, os diagramas para a antecedência de 48h apresentaram um comportamento errático nas análises, pois nesta antecedência as previsões são muito similares a uma previsão determinística (existe pouco espalhamento no conjunto). Com o maior número de resultados concentrados na primeira e na última classe de

análise, a estatística é afetada pelo baixo número de amostras nas classes centrais de probabilidades. Assim, estes resultados são mostrados apenas como referência, mas não são analisados.

Em relação a contagem de amostras, para todos os EPS, o número de amostras na classe mais baixa de probabilidade (0-0,2) foi sempre maior (entre 1000 e 2500) que para as demais classes (em geral entre 10 e 100).

Os diagramas gerados com o CPTEC-pf nas antecedências de 240h e 360h apresentaram comportamento relacionado com um viés condicional positivo nas previsões. Isto é, as probabilidades previstas para a ultrapassagem dos limiares foi maior que a frequência condicional observada correspondente. Por exemplo, na antecedência de 240h quando as previsões indicaram probabilidades em torno de 0,75 os eventos foram observados com frequências de 0,5. Já para a antecedência de 120h o CPTEC-pf mostrou um viés condicional negativo nas previsões com baixa probabilidade (parte da curva acima da linha de quarenta e cinco graus) e um viés condicional positivo nas previsões alta probabilidade (parte da curva abaixo da linha de quarenta e cinco graus).

Os diagramas gerados com os pontos do GEFS também apresentaram um comportamento geral relacionado um viés condicional negativo nas previsões com baixa probabilidade (parte da curva acima da linha de quarenta e cinco graus) e um viés condicional positivo nas previsões alta probabilidade (parte da curva abaixo da linha de quarenta e cinco graus). Apesar disso, suas previsões podem ser consideradas bem calibradas, com as suas curvas de calibração próximas da linha diagonal, principalmente nos maiores horizontes (240h e 360h).

O desempenho obtido para o ECMWF-pf foi similar aos demais modelos, novamente com resultados de viés condicional negativo nas previsões com baixa probabilidade e viés condicional positivo nas previsões alta probabilidade, embora o viés negativo seja predominante nos maiores horizontes de previsão. Como exemplo, para as previsões com horizonte de 240h as probabilidades de ocorrências de 0,7 foram observados com frequência relativa de 0,45.

Em relação ao Super Ensemble, o seu desempenho situou-se entre os demais EPS, e sua calibração também pode ser considerada boa, principalmente para os maiores horizontes de previsão, uma vez que seus resultados ficaram perto da linha de quarenta e cinco graus.

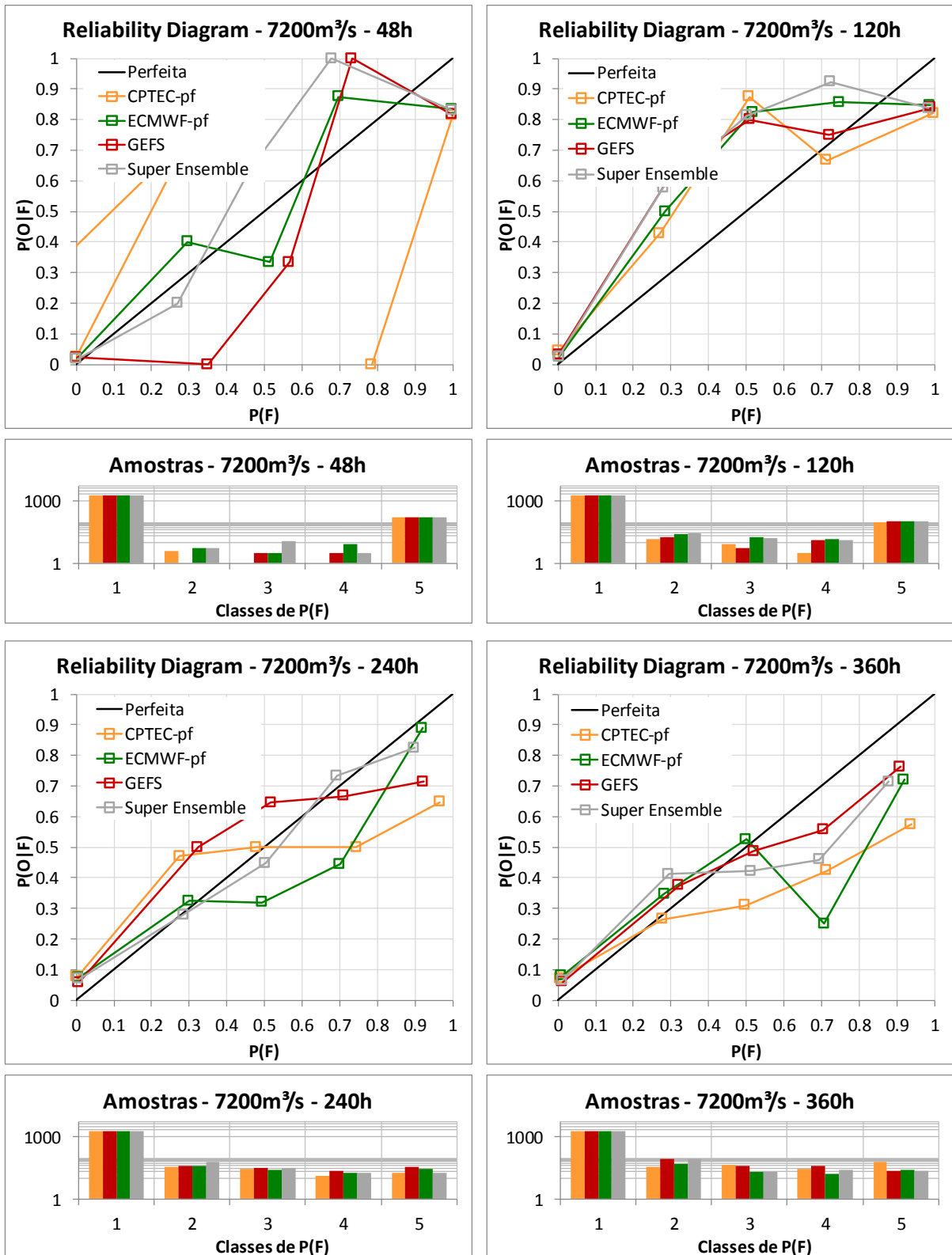
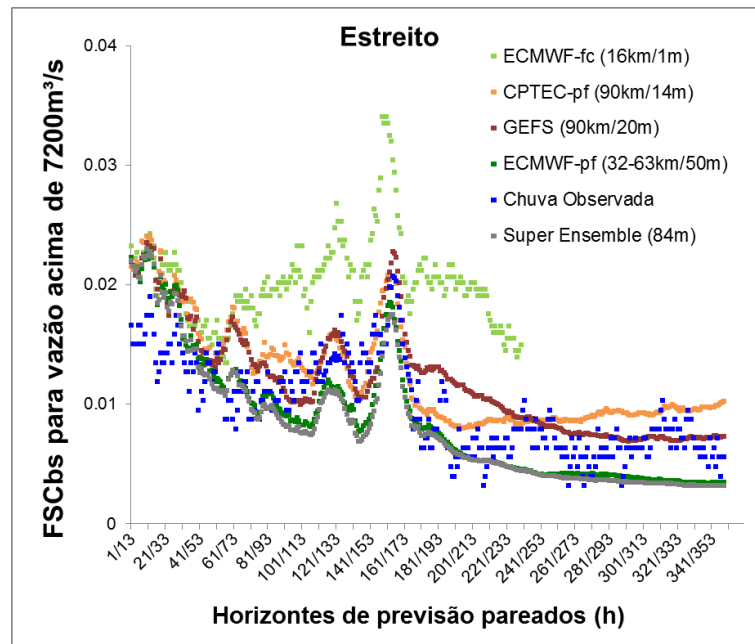


Figura 171. Reliability Diagram com limiar de 7200m<sup>3</sup>/s na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins.

### 7.3.11. Forecast Convergence Score (FCS)

Os resultados obtidos para o Forecast Convergence Score (FCS) para cada um dos EPS usados, previsão determinística, Super Ensemble, e mais previsão com chuva observada, para o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ , são apresentados na Figura 172.



**Figura 172. Resultados de FCS na análise de vazão para a bacia do Rio Tocantins considerando o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ .**

Nos resultados de FCS nota-se que até as antecedências de aproximadamente 60h, os resultados obtidos com as análises de FCS sugerem valores muito próximos entre os diferentes dados de chuva. E a partir destes horizontes os valores de FCS diferem. Outra característica importante destes resultados é a falta de continuidade dos resultados mostrados entre nas antecedências de 121h e 160h. Estas discontinuidades acontecem por causa do efeito da operação das UHEs existentes na bacia sobre as previsões.

As previsões determinísticas em geral apresentaram os valores mais elevados de FCS, indicando menor consistência entre si do que as previsões por conjunto. Os valores de FCS para a previsão determinística se situaram em torno ou foram maiores que 0,02 até as antecedências de cerca de 220h.

Entre os EPS, o CPTEC-pf e o GEFS apresentaram valores de FCS muito similares, onde em alguns horizontes os valores de um foram maiores e em outros momentos os valores

de outro. Eles indicaram valores entre 0,02 e 0,01 em horizontes de aproximadamente 200h, e valores menores que 0,01 horizontes maiores. Já o ECMWF-pf foi o EPS que apresentou menores valores de FCS (maior consistência entre previsões consecutivas) com valores menores do que 0,01 após os horizontes iniciais.

O Super Ensemble apresentou FCS ao longo das antecedências muito similares aos os resultados obtidos com o ECMWF-pf. E na comparação dos resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble com as previsões feitas utilizando chuva observada novamente nota-se que os resultados são similares. Ou seja, que os resultados do ECMWF-pf e do Super Ensemble apresentaram consistência similar a da previsão com “chuva perfeita”.

### **7.3.12. Resumo e discussão dos resultados de vazão para a bacia do Rio Tocantins**

Os principais resultados encontrados para as análises de vazão para o Rio Tocantins podem ser resumidos através dos seguintes tópicos:

- Os erros tendem a aumentar com o horizonte de previsão, na medida em que as incertezas aumentam. E até cerca de 96h de horizonte de previsão a previsão é mais dependente das condições observadas (vazão e chuva), do que da chuva prevista. Além disso, o comportamento dos erros é afetado pela consideração da operação das UHEs na bacia, demonstrando um impacto do efeito dos reservatórios sobre a qualidade das previsões.
- As análises visuais dos ensembles na bacia do Rio Tocantins mostraram desempenhos diferentes para os três EPS. O GEFS mostrou um desempenho muito bom para o evento de cheia de 2011/2012, que foi o mais importante da bacia. Mas ele demonstrou um desempenho não melhor que o CPTEC-pf e ao ECMWF-pf na cheia de menor proporção do ano seguinte. Além disso, na análise visual também se destacou que alguns resultados dependem de outros fatores além da chuva na bacia, como a operação dos reservatórios, e isso torna os resultados indiferentes em função do modelo.
- O Super Ensemble apresentou resultados visualmente que sugerem uma melhor cobertura das incertezas do que os EPS individualmente. E isto pode ser um ponto positivo para o caso aqui discutido, onde um modelo foi melhor em uma cheia, e outro modelo foi melhor em outra cheia.
- As previsões com chuva observada mostraram um desempenho ruim em um dos principais casos analisados. Isto provavelmente influenciou também seu desempenho nas

análises com as métricas. Atribui-se este desempenho ao fato de as chuvas que causaram a cheia possivelmente terem ocorrido em pontos “cegos” pelos postos telemétricos existentes nas bacias.

- Os erros médios absolutos do GEFS e do ECMWF-pf foram os menores na análise com todos os dados, e os do GEFS foram os menores na análise com o limiar de  $7200\text{m}^3/\text{s}$ . O CPTEC-pf foi o EPS com maior EMA em ambas análises, e o Super Ensemble seguiu a tendência do ECMWF-pf nas análises, dado que este é o EPS com mais membros. E a comparação com a previsão perfeita mostrou que foi possível obter resultados inclusive melhores que ela usando o GEFS e o ECMWF-pf nas análises.

- Os resultados de EMR mostraram um viés geralmente negativo nas previsões. Isto é, de subestimativa da vazão. Nas antecedências até cerca de 96h, provavelmente devido a presença das vazões substituídas nas UHEs, este viés é mais próximo de zero.

- O coeficiente de correlação mostrou valores similares entre os modelos quando considerados todos os dados. Na análise apenas das altas vazões o GEFS mostrou um desempenho melhor que os demais EPS.

- O CRPS médio indicou o GEFS, o ECMWF-pf, e o Super Ensemble com melhores resultados considerando todos os dados, e o GEFS na análise considerando o limiar. A previsão determinística apresentou desempenho pior que estes ensembles nesta análise. Já o CPTEC-pf nem sempre foi melhor que a previsão determinística.

- Nos Rank Histograms para as duas análises notam-se uma tendência geral de “U” nos horizontes de 48h e 120h, indicando falta de espalhamento. Já nos maiores horizontes a tendência de “L invertido” foi pronunciada, indicando um viés negativo nas previsões do conjunto para os maiores horizontes.

- As análises de BS indicaram também a seguinte ordem de desempenho geral entre os EPS: GEFS, ECMWF-pf, CPTEC-pf. E a previsão determinística apresentou um desempenho inferior aos EPS, indicando benefício no uso dos ensembles em termos desta estatística em comparação com a previsão determinística. Na comparação com o Super Ensemble, não foi detectado benefício no uso da combinação de dados, onde o desempenho do Super Ensemble foi geralmente inferior ao do GEFS. Também, o desempenho da previsão por conjunto foi superior ao da previsão com chuva observada.

- A análise das curvas ROC mostrou um desempenho dos EPS onde para baixas POFD é possível obter PODs altas nas antecedências de 48h e 120h. Para os horizontes de 240h e 360h o GEFS foi o único EPS que manteve um desempenho consideravelmente mais

elevado considerando os limiares superiores de suas previsões. Todavia, o desempenho das porções superiores dos EPS sempre se mostrou melhor do que a previsão determinística em termos do *trade-off* entre POD e POFD. E também os resultados foram em geral melhores que as próprias previsões com chuva observada.

- Na análise dos Reliability Diagrams os resultados sugeriram uma calibração com viés condicional positivo para eventos previstos com menor probabilidade, e um viés condicional positivo para eventos previstos com maior probabilidade. Este foi um formato muito comum em todos os EPS. Mas em geral a curva do GEFS mostrou-se mais próxima da linha diagonal.

- A análise de consistência das previsões através do FCS sugeriu que as previsões por conjunto sempre foram mais consistentes entre si do que a previsão determinística de referência. Além disso, a consistência obtida com o ECMWF-pf e o Super Ensemble foi a menor entre todas.

Com estes resultados tem-se um entendimento sobre o desempenho geral dos EPS, modelo determinístico, e Super Ensemble para a previsão de vazões na bacia do Rio Tocantins.

Esta bacia possui duas peculiaridades em comparação com as outras duas bacias estudadas. A primeira delas é a presença da cascata de reservatórios de usinas de grande porte na bacia, que adicionam incertezas adicionais às previsões de vazão, dadas pelo desconhecimento da operação. A segunda peculiaridade é o efeito mais pronunciado da deficiência na cobertura hidrometeorológica, que apesar de também ser um problema nas demais bacias, aqui se mostrou ela mostrou um impacto grande sobre os resultados na medida que uma grande cheia (de 2011/2012) não foi devidamente detectada.

E o impacto destas duas peculiaridades aparece nas análises dos resultados, sendo destacados pela mudança na tendência dos erros quando as previsões deixam de sofrer efeito da operação das usinas, ou nos resultados das métricas obtidos com as previsões usando chuva observada.

Em relação à medida de tendência central das previsões feitas com os diferentes modelos meteorológicos, foi verificado um viés negativo geral nas previsões, principalmente para horizontes de previsão maiores que cerca de 240h, onde os erros atingiram erros relativamente elevados, e viés de negativo de até -50%, com correlações próximas de zero.

Este comportamento dos erros também apareceu quando considerado todo o conjunto, na forma do CRPS.

Em termos de distribuição do conjunto (dada pelo Rank Histogram), nota-se também o viés negativo nos resultados do conjunto para as altas vazões e as altas antecedências, com muitos diagramas em forma de “L invertido”.

A calibração das previsões dos EPS também mostrou imperfeições, inclusive com comportamento dependente da probabilidade das previsões, onde os eventos previstos com menor probabilidade mostraram viés condicional negativo, e os previstos com maior probabilidade mostraram viés positivo. De qualquer forma, isto sugere que a medida do espalhamento do conjunto nem sempre pode ser associada com a incerteza das previsões.

Dentre todos os EPS, o que se destacou com estatísticas mais robustas foi o GEFS, com os menores erros e a melhor função de calibração verificada.

As previsões do ECMWF-pf ainda apresentaram bom desempenho para os menores horizontes de previsão em termos de curvas ROC quando considerados os seus resultados em comparação com os demais EPS.

Contudo, nas demais métricas de qualidade o ECMWF-pf e do CPTEC apresentaram seus erros relacionados com viés nas previsões. Onde os erros do CPTEC-pf foram geralmente maiores.

Apesar das fraquezas na qualidade das previsões probabilísticas, elas na maioria dos casos se sobressaíram sobre as previsões determinísticas, indicando o benefício no uso de previsões por conjunto tanto no quesito de erros quanto para a detecção de limiares de cheias. Principalmente considerando as previsões do GEFS e do ECMWF-pf.

Finalmente, na análise de composição do Super Ensemble verificou-se que para esta bacia o uso do Super Ensemble não gerou benefícios adicionais em termos de métricas, pois seu resultado foi em geral muito similar ao do ECMWF-pf (EPS com mais membros) ou intermediário entre o GEFS e o ECMWF-pf. Todavia, o resultado do Super Ensemble também nunca foi o pior entre os modelos testados, e a composição mostrou em alguns casos que é possível cobrir possíveis deficiências de um dos modelos com resultado de outro.



### 7.3.13. Comparação dos resultados de chuva e vazão para a bacia do rio Tocantins

Os resultados das análises de chuva média para a bacia do Tocantins dados pelas métricas EMA, EMR, CRPS, BS, Diagrama ROC, e Coeficiente de Correlação indicaram que geralmente o ECMWF-pf apresentava menores erros para todos os dados, e que os três EPS apresentavam erros similares para as análises com limiares. Com o CPTEC-pf se destacando um pouco de forma negativa em ambos os casos. Também, os resultados sempre foram concordantes ao indicar que os ensembles possuem melhor desempenho que a previsão determinística de referência, e que o Super Ensemble é superior aos EPS individualmente.

Contudo, nas análises de vazão este não foi o padrão encontrado. Para as análises com todos os dados todos o GEFS, o ECMWF-pf, e o Super Ensemble apresentaram sempre resultados muito similares em termos de qualidade, como os melhores. E nas análises com limiar os resultados de vazão indicaram o melhor desempenho para o GEFS, seguido do ECMWF-pf, da previsão determinística ECMWF-fc, e então do CPTEC-pf. E o Super Ensemble se situou entre o GEFS e o ECMWF-pf.

Assim como nas outras bacias, também existem diferenças dadas pelas análises de climatologia do coeficiente de variação, que mostram geralmente valores próximos da unidade para a chuva, incluindo alguns valores maiores em épocas menos chuvosas, obtidos pelos cálculos usando números pequenos. Já nas previsões de vazão os coeficientes de variação possuem um formato de “U” bem marcado, indicando que as grandes incertezas se concentram nos períodos úmidos, e geralmente os valores se situam abaixo de um. Nas análises de vazão também as diferenças entre os modelos são mais evidentes, especialmente nos maiores horizontes de previsão.

Em relação ao Rank Histogram, as diferenças também são mais evidentes. As análises de chuva sempre indicam um grande viés negativo. Isto é parcialmente observado nos resultados de vazão, somado ao formato de “U”, indicando também pouco espalhamento nas previsões de vazão.

Já para as análises dos *reliability diagrams*, enquanto que as análises de chuva mostraram um viés condicional tipo I positivo, as de vazão nem sempre foram explícitas sobre isto.

Estas discrepâncias ente os resultados de chuva e vazão na bacia do Tocantins, maiores do que as encontradas em outras bacias possuem várias explicações. A primeira delas

é dada pelos intervalos de tempo iniciais da previsão de vazão, onde existe o efeito combinado de assimilação de dados, correção de saídas, influência das observações, e o conhecimento das defluências das usinas de montante até 3 dias de horizonte de previsão. Os resultados de vazão são muito afetados por estes fatores até cerca de 120h de horizonte.

Outro fator importante é que a chuva média observada na bacia do Tocantins não é perfeita, conforme foi discutido anteriormente existem poucos dados disponíveis. Com isso, os resultados são afetados. Trazendo alguma injustiça para a comparação.

Finalmente, um terceiro ponto a ser considerado é a grande extensão da bacia do Tocantins, que usa diversas células do modelo meteorológico no cálculo da chuva média. Neste caso, talvez o cálculo e o uso da informação de chuva média exclua fenômenos mais localizados que deveriam ser analisados em menor escala.

Ou seja, as análises de chuva para o Tocantins, ao serem comparadas com as de vazão, podem estar indicando que para esta grande escala computar as chuvas médias podem não ser a melhor estratégia de avaliação, como também pode ser um indicador de que a insuficiência de dados não permite trabalhar com a chuva para estas grandes áreas. De qualquer forma, a não ser que outras análises mais detalhadas espacialmente e com mais dados disponíveis sejam conduzidas (um passo adiante do que o mostrado aqui), ela mostra que a avaliação dos resultados de vazão é fundamental para a situação, mesmo para a definição de características gerais do desempenho dos modelos.

#### **7.4. Análise comparativa dos resultados para as três bacias de estudo de caso**

Neste trabalho foram usados como estudo de caso três bacias hidrográficas de grande escala. A bacia do alto São Francisco é a que possui melhor quantidade e distribuição espacial de dados observados. A bacia do rio Doce apresenta área um pouco maior que a bacia do Alto São Francisco e disponibilidade de dados um pouco inferior. Já a bacia do Rio Tocantins é a maior de todas, com área cerca de cinco vezes maior do que as duas demais. Todas elas estão localizadas em região de clima tropical, com sazonalidade bem marcada entre estação seca e estação úmida.

A partir das análises individuais de cada uma das bacias hidrográficas é possível traçar um perfil comparativo dos resultados, visando evidenciar diferenças e similaridades.

Na análise de sensibilidade a vieses na chuva realizada para as três bacias, notou-se que em todas as bacias a modelagem hidrológica tende a amplificar as incertezas na previsão

na medida em que os horizontes de previsão evoluem e os erros nos estados do modelo hidrológico vão se acumulando. Ou seja, a modelagem hidrológica aumenta as incertezas na previsão. Este efeito foi mais expressivo em todas as bacias para vieses maiores do que +/- 10%.

Em todos os casos os impactos causados na vazão não foram linearmente proporcionais ao erro adicionado à chuva, sendo estes também uma função de como a modelagem da bacia evoluiu ao longo da previsão. Para a bacia do Tocantins, que é maior, e a que possui mais regiões de solos profundos, seus estados se alteram mais vagarosamente e os impactos do viés em termos de correlação e erros médios foram também mais lentos. Já para as demais bacias os impactos dos vieses rapidamente fizeram mais efeito.

Esta observação também tem uma consideração adicional, a de que uma vez errados os estados de uma bacia mais rápida ela também poderá voltar para uma condição mais correta mais rapidamente caso exista algum tipo de compensação na chuva prevista. Apesar de este fenômeno ser incomum.

Outra consideração sobre esta análise é a de a correlação entre dados de chuva previstos e observados em uma bacia de grande escala pode fazer um papel importante na previsão de vazão, pois ela mantém a boa coerência entre os estados da modelagem hidrológica ao longo da previsão. Talvez por este motivo foi verificado na análises de chuva prevista para o Alto São Francisco (por exemplo) que o modelo CPTEC-pf não possuía diferenças tão grandes em comparação aos demais modelos em termos de erros médios e CRPS, mas se destacava negativamente na métrica de correlação na análise de chuva. E já na análise de vazão ele se destacou como tendo os maiores erros de forma mais eloquente. Ou seja, a chuva mal correlacionada com o que aconteceu impactava mais o modelo hidrológico em certo ponto fazendo os erros na vazão crescerem mais.

Finalmente uma consideração adicional disto é a de que a correção de viés que pode ser realizada nos EPS pode ser mais complicada em modelos que possuem também problemas de correlação, do que em modelos que simplesmente possuem viés, que pode ser corrigido simplesmente através de fatores aditivos ou multiplicativos baseados em resultados de métricas como aqui apresentadas.

Voltando o olhar novamente para as análises dos EPS, no quesito precipitação média prevista, todos os resultados mostraram que os sistemas de previsão sofrem com insuficiência de dados, especialmente o sistemas de previsão do rio Tocantins. Já a análise dos resultados das previsões médias de precipitação para todas as bacias, apesar da ressalva sobre os dados

observadas, mostrou geralmente que o desempenho dos modelos ECMWF-pf e GEFS é superior ao da previsão determinística, especialmente quando consideradas as métricas que usam todo o conjunto para o seu cálculo, não apenas a medida de tendência central do ensemble. O CPTEC-pf neste caso não foi tão adequado em termos de desempenho estatístico. E a previsão do Super Ensemble normalmente foi igual ou melhor do que o melhor EPS no quesito chuva.

Quando os dados de chuva foram usados para forçar o modelo hidrológico e gerar as previsões por ensemble de vazão notou-se que as características gerais dos ensembles, como tendências de subestimativas em eventos maiores e ordem de desempenho dos EPS, foram mantidas para as bacias do Rio Alto São Francisco e do Rio Doce, que são menores (55.000km<sup>2</sup> e 65.000km<sup>2</sup>) em comparação com a do Rio Tocantins (350.000km<sup>2</sup>). Com isso, para as duas bacias menores afirmou-se que a análise da chuva média é útil para a identificação geral de características gerais do desempenho dos EPS. Já para a bacia do Tocantins a análise da chuva mostrou-se insuficiente para descrever algo sobre o encontrado nos resultados de vazão.

Nas análises de vazão afluente prevista para as usinas, os resultados para três bacias foram concordantes sobre o fato de as previsões por ensemble do ECMWF-pf e do GEFS serem superiores em comparação com as previsões determinísticas de referência do ECMWF-fc. Já o CPTEC-pf não apresentou o seu melhor desempenho nas bacias testadas, algumas vezes sendo inferior a todos os demais modelos.

Para a bacia do Alto São Francisco os resultados usando o ECMWF-pf mostraram os melhores valores estatísticos, seguido do GEFS. Enquanto que os resultados usando o GEFS foram na maioria dos casos os melhores para as bacias dos rios Doce e Tocantins, em algumas momentos superados pelo ECMWF-pf. E em todas as bacias os resultados do Super Ensemble indicaram que esta alternativa se situa como a melhor, ou entre os melhores desempenhos.

Nas análises também foi verificado que todos os modelos sofrem algum tipo de viés nos resultados, principalmente nos maiores eventos, que são justamente os eventos de maior interesse. No caso da bacia do Alto São Francisco ele é menos importante para o ECMWF-pf, mas já no caso da bacia do Doce ele parece ser mais marcante. Ou seja, para um mesmo modelo foram encontrados diferentes comportamentos relacionados ao viés, mesmo as bacias sendo próximas. Isto tem como implicação maior a confirmação da exigência de uma análise específica por bacia (ou, por grande região) dos resultados de modelos meteorológicos que

forçam modelos hidrológicos para a previsão de vazão, pois os resultados não são transportáveis facilmente de uma bacia para outra.

Apesar de todas estas diferenças citadas entre as previsões, para as três bacias testadas os resultados estatísticos das previsões são geramente mais distintos a partir de horizontes de cerca de quatro a cinco dias. Ou seja, para horizontes de previsão até esta faixa o desempenho dos modelos é mais comparável, e isto sugere que caso este horizonte seja suficiente para um sistema, o uso de um ou outro EPS seria relativamente indiferente.

Finalmente, ainda sobre a vazão, os resultados da bacia do Tocantins sugerem um desafio adicional, que é o relacionado com a consideração de usinas à montante para a previsão de vazão e análise de desempenho de sistemas. Esta dificuldade não foi encontrada nas duas demais bacias, mas ela é uma realidade que pode ser encontrada em várias outras bacias brasileiras, como a bacia do Paraná ou a própria bacia do São Francisco em áreas mais a jusante. Neste caso, mostrou-se aqui como o conhecimento ou não desta informação pode afetar a qualidade de previsões, onde os erros cresceram muito assim que esta informação passava pelo sistema.

## **7.5. Discussão sobre a operacionalização dos sistemas previsão por ensemble**

Com o desenvolvimento deste trabalho mostrou-se a plena possibilidade de operacionalização de uma cadeia de procedimentos que inclui o processamento de dados hidrológicos observados e dados de modelos meteorológicos, alimentação e múltiplas rodadas de um modelo hidrológico, e processamento da grande quantidade de dados de saída. Estes são procedimentos necessários para a realização de previsões hidrológicas por conjunto de médio prazo em bacias de grande escala.

Com isto, mostra-se que o desafio técnico de operacionalização destas previsões é perfeitamente superável. Contudo, é importante citar que algumas limitações existem no uso destes tipos sistemas operacionais, que eventualmente podem se tornar gargalos para sua implantação.

A primeira limitação seria que o tempo para rodar uma previsão por ensemble é diretamente proporcional ao número de membros. Nos estudos de caso desta pesquisa o tempo de execução de uma previsão única (incluindo processamento dos dados de entrada) variou entre 6 e 12 segundos usando computadores de mesa com unidade de processamento Intel i7, 8GB de memória RAM, e HD com 5400rpm. Ou seja, nestes termos pode-ser esperar

que uma rodada de um Super Ensemble como o usado aqui com 84 membros possa demorar até 16 minutos. Este tempo é para uma bacia. Somado a isto também deve ser incluído o tempo de aquisição de dados, que depende de como eles são disponibilizados e fatores como a velocidade de conexão. E caso o processo precise ser repetido para múltiplas bacias, ou áreas maiores ainda do que aqui usadas (por exemplo, para toda a bacia do Rio Paraná, que possui mais de 800.000km<sup>2</sup>, ou até para todas as usinas do SIN), ou o uso de um modelo hidrológico mais complexo baseado em propagação de vazão hidrodinâmica (por exemplo), pode ser necessário um aumento na capacidade de processamento utilizada.

Além disso, em alguns centros operacionais de previsão hidrológica exista a cultura de incorporação de alterações no sistema operacional após uma primeira rodada da previsão, visando compatibilizar mais os resultados com o que é esperado pelo hidrólogo responsável e que possui experiência empírica sobre o funcionamento da bacia hidrográfica. Isto é por vezes chamado de “adicionar conhecimento empírico na previsão” (Alfieri et al., 2012; Blöschl, 2008), e geralmente tende a melhorar os resultados. E isto significa também mais rodadas do sistema de previsão até que o resultado satisfaça o previsor. Assim, um sistema de previsão por ensemble que demore mais tempo diminui o tempo disponível para esta atividade.

Outro aspecto importante é a interpretação dos resultados das previsões por ensemble. Como ela possui mais informação e exige análise de aspectos como o espalhamento, que não existem na previsão determinística, ela tende a necessitar mais tempo para ser completamente interpretada, e também mais conhecimento especializado técnico sobre o tema. Se a interpretação for auxiliada pelo uso de diagramas, como um diagrama de excedência, deve também ser computado o tempo necessário para a rodada de pós-processadores.

E a adoção de sistemas de previsão por ensemble neste caso exige uma mudança de paradigma em escala bem abrangente, incluindo não apenas os responsáveis pela geração da previsão e operadores de usinas, mas também outros usuários, que não raras vezes incluem pessoas com diferentes formações técnicas e com pouco conhecimento em hidrologia.

Ainda, um caminho a ser seguido com o uso de previsões por ensemble é a sua aplicação em modelos estocásticos de otimização. Algumas pesquisas recentes (Schwanenberg *et al.*, 2015; Boucher *et al.*, 2012; Zhao *et al.*, 2013) tem demonstrado esta possibilidade. Esta abordagem certamente é promissora, pois um modelo de otimização tende a traduzir a previsão com vários membros que são sofisticados de serem interpretados em uma única decisão a ser tomada. Neste caso, em um sistema operacional também se deve levar em conta o tempo necessário para a rodada de um modelo de otimização.

Ainda sobre a interpretação de resultados das previsões e o uso de modelos de otimização, acredita-se que ela é certamente dependente de resultados de análises como aqui apresentadas. Por exemplo, na UHE Aimorés, existe um grande interesse no uso das previsões para acionar o gatilho do processo de limpeza de sedimentos do reservatório baseado em um limiar detectado com uma dada antecedência. Para este caso, o reservatório possui pequena capacidade de armazenamento de água, é limitado por várias restrições hidráulicas, e o procedimento inclui também intensa interação humana onde os operadores devem comunicar uma série de *stakeholders* sobre o início dos procedimentos. Aqui, o principal fator a ser considerado é o valor das taxas de alarmes verdadeiros e falsos do sistema de previsão dentro da antecedência considerada, e quais seriam as características de uma dada previsão por conjunto (por exemplo, número de membros acima do limiar) que seriam necessárias para dar início ao procedimento. Assim o “*setup*” de um modelo de otimização, ou até mesmo de um sistema otimizado de operação mais simples baseado em tabelas e diagramas, é dependente do conhecimento do desempenho das previsões para a definição dos parâmetros dos equacionamentos usados e do *trade-off* entre custos e benefícios das incertezas.

O mesmo raciocínio é válido para as outras usinas avaliadas, dadas as particularidades de cada uma.

Apesar das limitações citadas para o uso de previsões por conjunto, como os relacionados com tempo de execução, aquisição de dados, e interpretação de resultados, acredita-se que estes sejam desafios superáveis. Os tempos de processamento encontrados não são exacerbados, e na medida em que a tecnologia de computadores evolui estes devem se tornar problemas cada vez menores. Já a interpretação e o uso de previsões de vazão por conjunto significam uma mudança de paradigma que está em andamento, onde as incertezas e deixam de serem unicamente fontes de erros e se transformam em fonte de conhecimento aproveitável na interpretação de previsões. E os resultados apresentados nesta Tese demonstram que o aproveitamento deste conhecimento se traduz em benefícios quantificáveis estatisticamente. Também, o desenvolvimento de modelos de otimização operacionais baseados em *ensembles* tende a facilitar a aplicabilidade de sistemas de previsão por conjunto para sistemas complexos, como UHEs.

Finalmente, apesar de uma análise de custo estar fora dos objetivos deste trabalho, outras pesquisas recentes (Teisberg e Weiher, 2009; Rogers e Tsirkunov, 2011; Pappenberger et al., 2015) tem ilustrado que os benefícios de sistemas de previsão excedem seus custos de desenvolvimento e manutenção.

## 8. Conclusões

O objetivo principal desta Tese foi investigar o uso de previsões de afluência por conjunto de curto e médio prazo para reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras. Os aspectos investigados estão relacionados com o desempenho e factibilidade do uso de diferentes modelos meteorológicos para a previsão, benefício da consideração da incerteza meteorológica através de uso combinado de sistemas de previsão usando um super ensemble, adequação das previsões disponíveis para os diferentes fins a que elas podem ser destinadas, verificação da propagação das incertezas através da modelagem da bacia de grande escala, e comparação do benefício do uso das previsões por conjunto com uma previsão determinística de alta resolução em termos de qualidade e consistência.

Para cumprir com estes objetivos foram propostos ensaios de previsão de vazão em três bacias hidrográficas nas quais foram implementados modelos operacionais de previsão de vazão baseados no modelo hidrológico MGB-IPH. Nas três bacias analisadas existe o interesse no resultado de previsões para a operação de reservatórios, e também para alerta ou controle de enchentes. Os sistemas foram rodados para a execução de previsões retroativas (*hindcastings*), e os seus resultados foram avaliados e discutidos visando responder as perguntas científicas propostas.

Estas questões e as respostas, encontradas no desenvolvimento da Tese, são apresentadas a seguir.

### 8.1. Respostas das questões levantadas

- Quais adaptações são necessárias para o acoplamento entre sistemas de previsão meteorológica por conjunto a um modelo hidrológico de grande escala, na forma de um sistema de previsão hidrológica por ensemble de curto e médio prazo? Seria o esforço empreendido para o desenvolvimento de um sistema e a necessidade computacional para a geração de previsões hidrológicas por conjunto uma barreira que pode dificultar a sua aplicação?

Acredita-se que as adaptações necessárias para o desenvolvimento de um sistema de previsão hidrológica por ensemble baseado na incerteza meteorológica, como os montados neste trabalho, consistem majoritariamente na implantação de um sistema adequado para o



gerenciamento de dados, tanto de entrada quanto de saída, do modelo hidrológico. O sistema deve permitir manejar a grande quantidade de informação usada nas previsões por conjunto. E deve permitir a execução do modelo hidrológico múltiplas vezes consecutivas e/ou simultâneas.

Acredita-se que o desenvolvimento deste tipo de sistema de gerenciamento de dados constitui apenas uma etapa adicional no desenvolvimento de um sistema de previsão, e que não deve ser encarado com uma limitação.

Em relação ao tempo necessário para a realização das simulações por conjunto, usando os sistemas aplicados nesta pesquisa, ele não seja um limitante para o uso operacional dos ensembles, desde que as previsões meteorológicas por conjunto já estejam disponíveis. O tempo necessário para a rodada dos modelos hidrológicos em um computador de mesa, que é da ordem de segundos para uma previsão, é muito menor do que o tempo necessário para a rodada dos modelos meteorológicos utilizados como entrada nas previsões hidrológicas, que geralmente é da ordem de minutos ou horas usando supercomputadores. Assim, acredita-se que o conflito que muitas vezes existe na meteorologia sobre o custo-benefício da rodada de previsões por conjunto em termos de tempo, energia, e recursos computacionais não é aplicável nos sistemas hidrológicos de previsão por conjunto do tipo testados.

Todavia, com o aumento da complexidade dos sistemas de previsão hidrológica por conjunto estes fatores podem se tornar mais importantes.

- Como é o desempenho dos diferentes modelos meteorológicos disponibilizados pelos centros CPTEC/INPE, NCEP/NOAA e ECMWF aplicados na previsão de vazão nas bacias hidrográficas estudadas? Existem diferenças relevantes em seus desempenhos para previsão hidrológica que podem ser relacionadas diretamente com o número de membros do conjunto, resolução espacial do modelo, ou método de geração de condições iniciais?

Para os três locais testados, até um horizonte de previsão de cerca de 5 dias (120h) todos os três HEPS mostraram um desempenho similar, onde os erros existem mas são pequenos se comparadas às magnitudes dos erros em maiores horizontes de previsão, ou até ao erro obtido usando chuva observada. Assim, para estas bacias testadas, acredita-se que o uso de um EPS ou outro no sistema de previsão não faria uma diferença muito grande se o horizonte desejado fosse de até 5 dias. Acima deste horizonte, maiores

diferenças foram verificadas entre os modelos meteorológicos usados para forçar o modelo hidrológico.

Para a bacia do Alto São Francisco verificou-se um desempenho geral na seguinte ordem para os EPS: ECMWF-pf, GEFS, CTEC-pf. Tanto em termos de erros para todos os dados, quando para a detecção de eventos extremos. Somente para os últimos horizontes de previsão o ECMWF-pf em alguns casos não foi o EPS com melhores resultados. Contudo, em algumas estatísticas ele também foi melhor que a própria previsão com chuva observada.

Para a bacia do Rio Doce o desempenho do GEFS foi em geral superior aos demais EPS. O ECMWF-pf apresentou um viés negativo expressivo nesta bacia, e o CPTEC-pf apresentou erros diversos dependentes do horizonte de previsão.

Para a bacia do Rio Tocantins, a maior bacia testada, o GEFS e o ECMWF-pf apresentaram geralmente os melhores resultados, com maior destaque para o GEFS.

A partir desta verificação, é possível dizer que existem diferenças no desempenho dos modelos para diferentes regiões testadas, até mesmo para bacias relativamente próximas como a bacia do Rio Doce e a do Rio São Francisco.

Também, é possível afirmar que estas diferenças não foram dependentes de um maior número de membros no modelo meteorológico, pois o ECMWF-pf, que possui mais membros (50), não foi o modelo com melhor desempenho em todas bacias. E o número de membros do CPTEC-pf (14), apesar de ser o menor, é relativamente próximo dos 20 membros do GEFS, que apresentou os melhores resultados na bacia do Rio Doce e no Tocantins.

Em relação à resolução espacial, os resultados também não apontam para o benefício de um modelo específico neste caso. Como exemplo, o ECMWF-pf é o modelo com maior resolução espacial, mas não necessariamente apresentou sempre os melhores resultados na bacia do Rio Doce e do Tocantins.

Este resultado obtido com relação ao fato da resolução espacial não significar um benefício nos resultados pode estar relacionado com a grande escala das bacias hidrográficas, que pode funcionar generalizando a distribuição espacial da chuva que atinge a bacia. Possivelmente para bacias menores os resultados sejam mais dependentes da resolução espacial, pois ela pode ser mais determinante em casos de detecção ou não de um grande volume de água precipitado.

Outras causas para as diferenças entre os modelos podem ser: física do modelo meteorológico, método de geração das condições iniciais, métodos e dados usados na inicialização do modelo, parametrização adotada para a representação de certos processos meteorológicos, número de camadas verticais, entre outros.

O foco deste trabalho não foi identificar precisamente quais são as causas que fazem um modelo melhor ou pior em cada caso. Mas sim afirmar que não é possível transportar os resultados obtidos para uma bacia diretamente para outra, sem a realização de estudos de *hindcasting* para a vazão. Pois existem diferenças significativas entre os modelos para bacias que estão geograficamente próximas e em uma mesma região climática.

Esta afirmação é reforçada pelos resultados encontrados na comparação de resultados de chuva e vazão, que mostrou que diferenças pequenas nos erros encontrados nas análises de chuva podem se traduzir em diferenças maiores nos resultados de vazão.

- Como é o desempenho de previsões hidrológicas por conjunto em comparação com previsões hidrológicas determinísticas em bacias hidrográficas tropicais de grande escala, considerando as incertezas meteorológicas no horizonte de previsão, em termos de métricas de qualidade e consistência?

Para as três bacias testadas o desempenho das previsões por conjunto em comparação com a previsão determinística em termos de estatísticas, tanto de análise de erros totais, como de análise de eventos discretos (ocorrência de limiares de cheia), apontaram para um benefício do uso de previsões por ensemble. Isto é válido especialmente para as previsões do ECMWF-pf e do GEFS, que apresentaram, na maioria dos casos, melhores resultados que a previsão determinística. Enquanto a previsão do CPTEC-pf apresentou, em alguns casos, desempenho que não permite afirmar sua superioridade absoluta em relação a previsão determinística de referência usada.

Os benefícios foram verificados tanto em termos da média do conjunto, como em termos do uso das previsões para a detecção de eventos de cheia dados pela ocorrência de limiares. Neste último caso, o desempenho do uso de percentis superiores das previsões por conjunto não só se destacou por ser melhor que a previsão determinística, mas também por ser melhor que a própria previsão com chuva observada, em alguns casos. Este último resultado é um tanto inesperado, e pode estar relacionado à baixa densidade de postos pluviométricos telemétricos nas bacias analisadas.

Pode-se dizer que as previsões por conjunto tem o benefício de informar um sinal (indicação dada por alguns membros) para a possível ocorrência de eventos extremos, mesmo com um pequeno número de membros, em casos onde a previsão determinística não indica este tipo de informação. Assim, ela permite a tomada de decisão ponderada pela incerteza quantificada, o que não é possível no caso da previsão determinística.

- Seriam adequadas as previsões por conjunto para auxiliar na antecipação da ocorrência de cheias e na redução de risco de violação de restrições operativas de reservatórios? O que precisa ser alterado na estrutura de interpretação das previsões por conjunto em comparação com as determinísticas neste caso?

Para auxiliar na antecipação da ocorrência de cheias e na redução de risco de violação de restrições operativas de reservatórios é importante que as previsões emitam corretamente avisos sobre a ocorrência de limiares de cheia.

Para as três bacias testadas os resultados indicaram que é possível obter taxas de detecção dos limiares de interesse nas bacias testadas na ordem de 0,8 a 0,9 para taxas de alarmes falsos menores que 0,1 quando são usados os percentis superiores das previsões por conjunto em horizontes de previsão de até 240h (10dias). Isto significa que de 80% a 90% dos eventos que realmente ocorreram foram corretamente previstos, enquanto que apenas em 10% dos casos em que o evento foi previsto ele acabou não ocorrendo. Estas taxas de acerto advêm principalmente dos percentis mais altos do conjunto

Assim, as previsões mostraram-se adequadas para auxiliar na antecipação da ocorrência de eventos de interesse em aplicações onde estas taxas de acerto são aceitáveis para a tomada de decisão. E acredita-se que estas taxas obtidas possuam uma boa aceitação, por que são próximas do desempenho usando observações no horizonte de previsão.

Adicionalmente, acredita-se que melhores desempenhos para estes fins podem ser obtidos se forem utilizadas nas previsões técnicas de remoção de viés, correção de espalhamento (roupagem do conjunto), e ajustes de sua calibração. O estudo destes benefícios vai além desta pesquisa, mas é uma das sugestões de trabalhos futuros derivados.

- Seriam adequadas as previsões por conjunto em termos de erros médios e de abrangência das observações dentro de seus espalhamentos, visando seu uso em procedimentos de operação de reservatórios? O que precisa ser alterado na estrutura de interpretação das previsões por conjunto em comparação com as determinísticas neste caso?

Para o uso de previsões no gerenciamento de longo termo de reservatórios, é importante que o viés das previsões não seja elevado e que a correlação das previsões seja próxima da unidade, o que indicaria que o volume de água afluente aos reservatórios nas previsões é próximo ao volume real observado, e que o comportamento geral das vazões é condizente com o hidrograma observado.

Além disso, para o uso de previsões probabilísticas em técnicas de otimização estocásticas, como as mostradas por Raso et al (2013) e por Schwanenberg *et al.* (2015), é importante que o espalhamento do conjunto seja capaz de compreender a maior parte das observações, indicando que todas as incertezas estão compreendidas na previsão, e que estão sendo levadas em conta na tomada de decisão sobre cenários futuros.

Finalmente, uma vez que as previsões tenham qualidade, é importante que elas também sejam consistentes entre si, pois isso evita que em um determinado instante medidas operativas de mitigação tenham que ser tomadas quando uma decisão contrária é seguida devido a previsões anteriores.

Neste sentido, as previsões para as três bacias testadas na antecedência de até 120h (5 dias) apresentaram erros médios relativos dentro da faixa de 10%, e correlações próximas da correlação obtida com chuva perfeita para todos os modelos. Então, até este horizonte de previsão, acredita-se que todas as previsões de vazão apresentam um desempenho geral satisfatório visando a previsão da afluência de volumes afluentes a reservatórios.

Em maiores horizontes de previsão o HEPS alimentado com o ECMWF-pf mostrou estatísticas muito próximas às previsões com chuva observada na bacia de Três Marias, sugerindo que ele é quase tão adequado quanto as previsões com chuva perfeita para fins de operação do reservatório.

Já na bacia do Rio Doce, as previsões do GEFS apresentaram bom desempenho nos maiores horizontes de previsão, sugerindo que o HEPS alimentado com este modelo é o mais adequado para fins de operação do reservatório. A mesma consideração pode ser feita sobre a bacia do Rio Tocantins.

Os modelos que não apresentaram o melhor desempenho nas bacias geralmente apresentaram algum tipo de viés, como o ECMWF-pf e o ECMWF-fc, que apresentaram um viés negativo nos seus resultados na bacia do Rio Doce. Ou erros de correlação, como o CPTEC-pf que apresentou problemas relacionados também com correlação entre chuvas observadas e previstas nos maiores horizontes de previsão em todas as bacias.

Em termos de espalhamento, no entanto, os histogramas das previsões por conjunto sugeriram que existe uma tenência de subespalhamento nos dados. Conclui-se disto que as previsões por conjunto possuem o benefício de informar as incertezas no futuro, mas que todas as incertezas ainda não estão completamente amostradas dentro do espalhamento, existindo muitos casos onde todos os membros do conjunto se posicionam acima ou abaixo da observação.

Todavia, comparando o uso de todas as informações que compõem o ensemble com a informação única dada pelo modelo determinístico, na maioria dos casos as métricas de qualidade indicam que há vantagem em usar o ensemble. O mesmo pode ser dito da análise de consistência entre si das previsões por ensemble, que se mostraram muito mais consistentes em termos de decisões consecutivas do que a previsão determinística. Estes dois resultados são importantes indicadores de que em uma operação contínua calcada em decisões ponderadas baseadas nos ensembles seria mais adequada do que uma operação baseada apenas na previsão determinística.

Neste último caso, acredita-se que o uso de previsões por conjunto, em comparação com previsões determinísticas para a operação de reservatórios, pode ser comparado fazendo uma analogia a um carro sendo dirigido por uma autoestrada. A previsão por ensemble possivelmente sempre sugeriria tomadas de decisão mais ponderadas, mantendo o carro mais dentro dos limites da estrada devido ao peso dado pelos múltiplos membros e a maior consistência das decisões consecutivas. Já no caso da previsão determinística, como acontecem mais mudanças sequenciais e todo o peso das decisões é dado por um único prognóstico, possivelmente ocorreriam mais momentos em que o carro sairia da estrada ou precisaria trocar de um lado para outro do trecho em um curto intervalo de tempo. O que, eventualmente, poderia ocorrer em uma situação perigosa, como uma curva, onde a manobra poderia resultar em um problema sério.

Outro benefício do uso dos Ensembles é que ele permite a adaptação enquanto os eventos vão ocorrendo, e as trajetórias sugeridas por alguns dos membros vão se confirmando.

Assim, acredita-se que as previsões por conjunto são adequadas para a operação dos reservatórios, pelo menos em comparação com a previsão determinística testada. E a principal mudança na estrutura de interpretação das previsões por conjunto em comparação com as determinísticas neste caso decorre da necessidade de um maior investimento na interpretação dos resultados para a tomada de decisão. Para isto, podem ser usados pós-processadores, métodos de otimização, ou uma análise técnica detalhada dos resultados baseada em critérios pré-definidos para a operação.

Adicionalmente, pode-se esperar que os problemas com viés e falta de espalhamento verificados possam ser resolvidos com a aplicação de técnicas de correção de viés e de correção do espalhamento do conjunto. Estas técnicas poderiam ser aplicadas aos dados de chuva, ou nas saídas dos dados de vazão diretamente, devendo ser pesquisadas qual seria a melhor estratégia a ser adotada. Com estas correções talvez o resultado do CPTEC-pf, por exemplo, que não apresentou desempenho muito bom nos maiores horizontes de previsão em nenhuma das bacias, possa melhorar substancialmente. Novamente, o estudo mais detalhado destes benefícios vai além desta pesquisa específica, mas é também um dos trabalhos futuros que podem ser derivados.

- É possível obter melhores resultados com a combinação de dados dos diferentes modelos meteorológicos por conjunto na forma de um conjunto maior, que neste caso consideraria também as incertezas relacionadas com a estrutura dos modelos meteorológicos?

O uso do Super Ensemble nem sempre apresentou os melhores resultados em termos de estatísticas para a verificação dos resultados das previsões. Contudo, seus resultados sempre se situaram próximos dos melhores desempenhos verificados, e em alguns casos efetivamente mostraram o melhor desempenho.

Acredita-se que isto aconteça por que a consideração da incerteza na formulação dos modelos meteorológicos é considerada no Super Ensemble, e assim permite compensar algumas deficiências individuais de cada um dos modelos.

Uma análise visual do Super Ensemble conhecendo o desempenho dos modelos individualmente na bacia permite fazer inferências sobre o prognóstico sugerido por cada um deles, e assim tomar decisões com base na faixa de resultados que é considerada mais confiável.

Especialmente nos horizontes de previsão iniciais, em algumas métricas o Super Ensemble se destacou, provavelmente por que nestes intervalos de tempo ele possui uma medida de incerteza (dada pela incerteza de estrutura dos modelos) que os demais individualmente não possuem.

Além disso, o uso de um Super Ensemble tem a vantagem de ser operacionalmente mais robusto, pois se um modelo falha na execução das previsões, os outros ainda estão disponíveis para o prognóstico.

Assim, conclui-se que o uso do Super Ensemble nem sempre significa os melhores resultados estatísticos, mas que os seus resultados sempre se situam perto dos melhores, e sua robustez simboliza vantagens que fazem dele uma opção segura para um sistema de previsão de vazões.

- Como o desempenho e as incertezas verificadas na previsão de chuva nas grandes bacias hidrográficas se propagam através do modelo hidrológico? É possível generalizar o desempenho observado na chuva média da bacia como sendo também o esperado na vazão? São necessárias efetivamente análises de vazão para a verificação do desempenho esperado? Ou as análises de chuva somente são suficientes?

Os testes realizados sugerem que as incertezas na previsão aumentam quando a informação “passa” por dentro do modelo hidrológico. No caso específico das bacias de grande escala deste estudo, este efeito de amplificação das incertezas parece estar relacionado com a condição da bacia hidrográfica, traduzida nos estados do modelo hidrológico, que uma vez incorretos tendem a afetar os passos de tempo subsequentes. Estes estados seriam: o volume de água propagado nos rios e os volumes de água nas diferentes camadas do solo. Assim, uma chuva errada em um horizonte inicial ou intermediário de uma previsão pode afetar bastante todas as previsões hidrológicas subsequentes.

Desta forma, acredita-se que não seja possível generalizar o desempenho observado na chuva média da bacia como sendo também o esperado na vazão. A análise de chuva permite sim identificar tendências gerais que são também verificadas nas previsões de vazão, como subestimativa de grandes eventos, mas o comportamento da evolução das



previsões e de algumas características específicas de cada caso não pode ser reproduzido se a modelagem hidrológica não for inserida.

- A consideração apenas da incerteza na previsão meteorológica é suficiente para um bom desempenho no curto e médio prazo? Outras incertezas nas previsões podem ser fontes de erro relevantes para serem consideradas neste tipo de aplicação?

Com base nos resultados obtidos, que mostram erros nas previsões já nos intervalos de tempo iniciais, e problemas de espalhamento das previsões, acredita-se que a consideração da incerteza apenas na previsão meteorológica não é suficiente para um desempenho totalmente satisfatório a curto e médio prazo.

Os erros computados já nos intervalos de tempo iniciais mostram que o modelo hidrológico já no início da previsão contém imperfeições, e estas poderiam ser traduzidas na previsão se fossem consideradas questões como: qual a incerteza nos parâmetros calibrados? E qual a incerteza nas condições iniciais usadas?

Também, os resultados obtidos com os dados de chuva observada, principalmente na bacia do rio Tocantins, mostram que a chuva observada nas bacias hidrográficas não pode ser considerada adequada, porque a densidade de postos telemétricos pela área da bacia é extremamente baixa. Esta chuva é usada na simulação hidrológica até o momento da previsão. Isto permite afirmar que aí reside uma incerteza considerável, e que a exploração de métodos que mapeiam esta incerteza, como o uso de um Ensemble Kalman Filter ou um Particle Filtering, poderia melhorar os resultados gerados.

- Quais são as implicações dos resultados no contexto de iniciativas científicas internacionais como o HEPEX e o TIGGE?

Dentro do contexto da iniciativa do HEPEX, cuja missão é “*demonstrar o valor agregado de previsões hidrológicas por conjunto para o gerenciamento de emergências e para a tomada de decisão em setores de recursos hídricos que tem consequências importantes para economia, saúde pública e segurança*” este trabalho se enquadra como uma das primeiras avaliações de resultados de previsão de vazão por conjunto em grande escala no território da América Latina, e uma das primeiras avaliações que inclui

comparação entre EPS em bacias de grande escala e busca entender como as incertezas se propagam nestas situações. Os resultados contribuem para o conhecimento organizado pela iniciativa, e de fato mostram benefícios em termos de qualidade e consistência no uso das previsões por conjunto em comparação com previsões determinísticas nesta região onde o conhecimento pode ser considerado até o momento incipiente.

Dentro do contexto da iniciativa do TIGGE, esta pesquisa apresenta uma das primeiras aplicações da base de dados do TIGGE para a previsão hidrológica por conjunto na América Latina, incluindo a comparação entre os modelos e o seu uso conjunto. Estas comparações reforçam a importância da base de dados, cuja existência permitiu a obtenção dos resultados aqui mostrados.

## 8.2. Recomendações

O desenvolvimento desta pesquisa também permitiu verificar carências e possibilidades sobre onde poderiam ser investidos recursos e pesquisas para melhorar o desempenho de previsões no que tange a disponibilidade de informações e processamento das entradas e saídas dos modelos.

Durante a realização deste trabalho foi verificado um impacto da carência de informação de chuva com transmissão de dados em tempo real para a previsão de vazão nas grandes bacias hidrográficas testadas. Uma medida mais correta do volume e distribuição espacial das chuvas observadas pode impactar positivamente uma previsão de vazão, ainda mais quando se tratam de grandes bacias, cujas condições observadas no início da previsão afetam os estados do modelo durante um longo período de tempo no horizonte da previsão. Assim, acredita-se que o investimento de recursos em técnicas de melhor estimativa de chuva em tempo real para a aplicação na previsão de vazões é oportuno. Estes investimentos podem ser baseados no uso de informação de radares meteorológicos, chuva obtida com sensoriamento remoto, uso de informação do ruído de antenas de celular para a estimativa de chuva, aumento da rede telemétrica, e uso combinado destas informações.

Os trabalhos de Fan *et al.* (2015b), Quiroz e Collischonn (2014), Rozante *et al.* (2010), Vila *et al.* (2009), Wu *et al.* (2014), apresentam algumas iniciativas de uso combinado de informações de satélite com dados pluviométricos, onde resultados promissores tem sido

encontrados. Estas iniciativas podem ser mais amplamente testadas e trazidas para a prática operacional também.

Outra questão levantada na análise final dos resultados deste trabalho é a relacionada com a investigação de técnicas de pré e pós-processamento de previsões de chuva e vazão. O investimento neste tipo de técnica é promissor, pois tende a permitir uma melhora na qualidade de resultados. Todavia, também é importante ter em mente que a sua aplicação em sistemas operacionais depende da disponibilidade de muitas previsões do passado com a mesma configuração usada para fazer a previsão atual. E nem sempre isto é disponível, pois os sistemas (modelos meteorológicos, hidrológicos, e dados disponíveis) evoluem ao longo do tempo. E muitas vezes são necessários que sejam despendidos recursos energéticos e computacionais para a realização de um grande número de previsões retroativas com o modelo mais atual, e assim uma base de dados estar disponível.

Também sobre os resultados, uma análise que pode ser realizada é a relacionada com os volumes afluentes aos reservatórios propriamente ditos. Neste trabalho as avaliações realizadas foram baseadas em limiares de cheias. Contudo, em uma avaliação de previsões pode-se fazer uma avaliação baseada em volumes totais afluentes.

Outro caminho de pesquisa que merece destaque é o relacionado com o aprimoramento de técnicas de assimilação de dados. E técnicas que permitem a consideração de incertezas nos dados e nos modelos podem se despontar neste ambiente de incerteza que é a previsão baseada em pouca informação observada.

Um quarto grande caminho que pode ser seguido no uso de previsões por conjunto é o de aprimorar o uso de previsões por conjunto dentro de sistemas de otimização de operação de reservatórios. Como comentado anteriormente, trabalhos como Zhao et al. (2011), Boucher et al. (2012), Zhao e Zhao (2014) e Schwanenberg et al. (2015) já mostram resultados promissores neste sentido. Contudo, ainda existem muitos casos e metodologias a serem avaliadas.

Na medida em que resultados se consolidem, outras perguntas relacionados com a relação *homem versus sistema* também tendem a aparecer. A prática de “adicionar conhecimento” à previsão é muito comum (Blöschl, 2008), e dentro de uma cadeia de otimização de operação, que começa com uma entrada de chuva e termina com uma decisão operativa não se sabe exatamente qual seria a dimensão de um operador, previsor, ou hidrólogo, por exemplo.

---

Assim, acredita-se que todas estas áreas citadas sejam direções interessantes para o investimento de recursos e pesquisa, e que elas apresentam-se como um passo natural adiante do que foi apresentado neste trabalho.

### **8.3. Considerações finais**

Acredita-se que os resultados apresentados nesta Tese possuem uma implicação mais geral, além da relacionada com a aplicação direta das tecnologias aqui avaliadas. Esta implicação é a de que foi mostrado que as incertezas, quando consideradas (mesmo que somente as meteorológicas representadas pelos EPS), tenderam a melhorar a qualidade e a persistência de previsões hidrológicas. E isto sugere uma mudança de pensamento benéfica para a prática operacional brasileira, na simples consideração de que os melhores resultados talvez não estejam dentro de uma melhor rodada ou de um melhor modelo determinístico, mas sim com o uso combinado do maior número de informações disponíveis, que ajudam a quantificar quão incerto pode estar o diagnóstico sugerido. A ideia principal aqui é que considerar as incertezas meteorológicas foi melhor do que ignorá-las, e que isto pode passar a ser incorporado aos poucos nos procedimentos atuais existentes.

A principal fonte de incertezas nas previsões de curto e médio prazo é a modelagem meteorológica, e um movimento de busca por melhorias em sistemas de previsão para reservatórios pode começar com o simples uso (mesmo que qualitativo) de informações de múltiplas fontes de previsões meteorológicas, ao invés de uma única considerada a melhor, até a geração de ensembles como os avaliados aqui. E no futuro o mesmo pode ser testado com modelos hidrológicos. E os conjuntos de previsões assim gerados podem ser analisados nos mesmos termos aqui apresentados para a verificação de sua qualidade.

---

## 9. Referências Bibliográficas

- ABEBE, A.J.; PRICE, R.K. Managing uncertainty in hydrological models using complementary models. **Hydrological Sciences**, v. 48, n. 5, p. 679-692, 2003.
- ADDOR, N.; JAUN, S.; FUNDEL, F.; ZAPPA, M. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios, **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 2327-2347, 2011, doi:10.5194/hess-15-2327-2011.
- AHRENS, B. AND JAUN, S. On evaluation of ensemble precipitation forecasts with observation-based ensembles, **Adv. Geosci.**, 10, 139-144, doi:10.5194/adgeo-10-139-2007, 2007.
- ALFIERI, L.; BUREK, P.; DUTRA, E.; KRZEMINSKI, B.; MURARO, D.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning, **Hydrology and Earth System Sciences.**, v. 17, p. 1161-1175, 2013, doi:10.5194/hess-17-1161-2013, 2013
- ALFIERI, L.; PAPPENBERGER, F.; WETTERHALL, F.; HAIDEN, T.; RICHARDSON, D.; SALAMON, P. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe, **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 913-922, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.035>, 2014.
- ALFIERI, L.; SALAMON, P.; PAPPENBERGER, F.; WETTERHALL, F.; THIELEN, J. Operational early warning systems for water-related hazards in Europe. **Environmental Science & Policy**, v. 21, p. 35-49, 2012.
- ANDREOLLI, I. ; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ; HAAS, R. ; REGINA, J. V. M. . Previsão de vazão afluente a um reservatório utilizando previsão quantitativa de chuva. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 55-70, 2006.
- ANDREOLLI, I.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Análise da rede de postos de chuva na previsão em tempo real na bacia do Rio Uruguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 5-14, 2004.
- ARNAUD, P.; LAVABRE, J. Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. **Water Resources Research**, v. 38, p. 6, 2002. DOI:10.1029/2001WR000474
- BACCHI, B.; RANZI, R. Hydrological and meteorological aspects of floods in the Alps:an overview. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 7, n. 6, p.784-798, 2003.
- BAO, H.-J; ZHAO, L.-N., HE, Y; LI, Z.-J.; WETTERHALL, F.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; MANFUL, D. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. **Adv. Geosci.**, v. 29, p. 61–67, 2011.

- BARTHOLMES, J. C.; THIELEN, J.; RAMOS M. H.; GENTILINI, S. The European Flood Alert System EFAS—Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 2, p. 141–15, 2009.
- BARTHOLMES, J.; TODINI, E. Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 9, p. 333–346, 2005.
- BATES, P. D., HORRITT M. S., FEWTRELL T. J. (2010), A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling, *J. Hydrol.*, 387, 33–45, doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.027.
- BERGH VAN DEN, J.; ROULIN, E. Hydrological ensemble prediction and verification for the Meuse and Scheldt basins. **Atmosph. Sci. Lett.**, v. 11, p. 64–71, 2010.
- BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. Rain-fall-based real-time flood forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 131, p. 313–339, 1992.
- BLÖSCHL, G. Flood warning – on the value of local information. **International Journal of River Basin Management**, v. 6, p. 41–50., 2008
- BOUCHER, M.-A.; ANCTIL, F.; PERREAULT, L.; TREMBLAY, D. A comparison between ensemble and deterministic hydrological forecasts in an operational context. **Adv. Geosci.**, v. 29, p. 85–94, 2011. doi:10.5194/adgeo-29-85-2011.
- BOUCHER, M.-A.; TREMBLAY, D.; DELORME, L.; PERREAULT, L.; ANCTIL, F., Hydroeconomic assessment of hydrological forecasting systems. **J. Hydrol.**, v. 416–417, p. 133–144, 2012.
- BOUGEAULT, P.; TOTH, Z.; BISHOP C.; BROWN, B.; BURRIDGE, D.; CHEN, D.; EBERT, E.; FUENTES, M.; HAMILL, T.; MYLNE, K.; NICOLAU, J.; PACCAGNELLA, T.; PARK, Y.-Y.; PARSONS, D.; RAOULT, B.; SCHUSTER, D.; SILVA DIAS, P.; SWINBANK, R.; TAKEUCHI, Y.; TENNANT, W.; WILSON, L.; WORLEY, S. The THORPEX Interactive Grand Global Ensemble (TIGGE). **Bull. Amer. Met. Soc.**, v. 91, p. 1059–1072, 2010.
- BOURDIN, D.R.; STULL, R.B., Bias-Corrected Short-Range Member-to-Member Ensemble Forecasts of Reservoir Inflow. **Journal of Hydrology**, v. 502, p. 77–88, 2013, ISSN 0022-1694, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.028>.
- BOWLER, N. E. Comparison of error breeding, singular vectors, random perturbations and ensemble Kalman filter perturbation strategies on a simple model. **Tellus**, v. 58A, p. 538–548, 2006.
- BRADLEY, A.A.; SCHWARTZ, S.S. Summary verification measures and their interpretation for ensemble forecasts. **Monthly Weather Review**, v. 139, n. 9, p. 3075–3089, 2011.
- BRAVO, J. M.; PEDROLLO, O. C.; COLLISCHONN, W.; PAZ, A. R.; UVO, C. B. Previsões de curto prazo de vazão afluente ao reservatório de Furnas utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, p. 77–88, 2008.

- BRAVO, J.; PAZ, A.; COLLISCHONN, W.; UVO, C.; PEDROLLO, O.; CHOU, S. Incorporating Forecasts of Rainfall in Two Hydrologic Models Used for Medium-Range Streamflow Forecasting. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 5, p. 435–445, 2009.
- BREMICKER, M.; HOMAGK, P.; LUDWIG, K. Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. **Wasserwirtschaft**, v. 7-8, 2006.
- BROWN, J.D., DEMARGNE, J., SEO, D.-J., LIU, Y. The ensemble verification system (EVS): a software tool for verifying ensemble forecasts of hydrometeorological and hydrologic variables at discrete locations. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 7, p. 854–872, 2010.
- BROWN, J.D., DEMARGNE, J.. HEPEX Science and Challenges: Verification of Ensemble Forecasts (2/4). 2013. **HEPEX**. Disponível em: <http://hepex.irstea.fr/hepex-science-and-challenges-verification-of-ensemble-forecasts-24/>. Último acesso em 17 de Junho de 2014.
- BRUN, G.W.; TUCCI C.E.M. Previsão em tempo real do volume afluente ao reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 73-80, 2001.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.C.D.; KAYSER, R. Manual do PrePro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH - Versão 4.1, **Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico, FINEP/ANA/IPH-UFRGS**, Porto Alegre-RS, 2011,19p.
- BUIZZA, R. Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF ensemble prediction system. **Mon. Wea. Rev.**, v. 125, p. 99-119, 1997.
- BUIZZA, R., HOUTEKAMER, P. L.; TOTH, Z.; PELLERIN, P.; WEI, M.; ZHU, Y. A comparison of the ECMWF, MSC and NCEP global ensemble prediction systems. **Mon. Wea. Rev.** v. 133, p. 1076-1097, 2005:
- BUIZZA, R.. The value of probabilistic prediction. **Atmos. Sci. Lett.**, v. 9, p. 36–42, 2008.
- BUIZZA, R.; BIDLOT, J-R.; WEDI N.; FUENTES, M.; HAMRUD, M.; HOLT, G.; VITART, F. The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 133, p. 681–695, 2007.
- BUIZZA, R.; HOLLINGSWORTH, A.; LALAURETTE F.; GHELLI, A. Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF Ensemble Prediction System. **Weather and Forecasting**, v. 14, p. 168–189, 1999.
- BUIZZA, R.; PALMER ,T.N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation. **J. Atmos. Sci.**, v. 52, p. 1434–1456, 1995.
- BUIZZA, R.; PALMER, T.N. Impact of Ensemble Size on Ensemble Prediction. **Mon. Wea. Rev.**, v. 126, p. 2503–2518, 1998.

- BUSTAMANTE, J.; CHOU, S. C. Impacto dos Erros dos diferentes Membros de um SREP de Física sobre os Resultados de um Ensemble Médio. In: XV Congr. Bras. de Meteorologia, 2008, Sao Paulo. **Anais do XV Congr. Bras. de Meteorologia**, 2008.
- CALVETTI, L. **Previsão hidrometeorológica probabilística na Bacia do Alto Iguaçu-PR com os modelos WRF e TopModel**. PhD thesis. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de São Paulo, 2011, 141p.
- CALVETTI, L.; PEREIRA FILHO, A. J.; BENETI, C.; NEUNDORF, R. . Previsão de Vazão utilizando Previsões de Precipitação por Conjuntos (Ensemble). In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves - RS. **Anais XX SBRH**, 2013.
- CALVETTI, L.; PEREIRA FILHO, A. J.; Ensemble Hydrometeorological Forecasts Using WRF Hourly QPF and TopModel for a Middle Watershed. **Advances in Meteorology**, v. 2014, p. 1-12, 2014.
- CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R.F.C.; MÜLLER, I.I. ; ANDRIOLO, M.V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F. Previsão de vazões na Bacia do Rio Iguaçu baseada no Modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n. 3, p. 57-68, 2007.
- CASTILHO, A. S.; DAVIS, E.G. Previsão hidrológica de vazões para as cidades de Resplendor, Colatina e Linhares utilizando o método das diferenças. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH: Curitiba. 2003.
- CASTILHO, A. S.; OLIVEIRA, L. M. Previsão hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares utilizando modelo linear de propagação. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH: Aracaju, 2001.
- CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. N.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J. P.; MANZI, A. O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L. P.; DALMEIDA, C. Global Climatological features in a Simulation Using the CPTEC/COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n.21, p. 2965-2988, 2002.
- CHIANG, Y. M., HSU, K. L., CHANG, F. J., HONG, Y. AND SOROOSHIAN, S. Merging multiple precipitation sources for flash flood forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 183-196, 2007.
- CHOU, S. C.; CATALDI, M.; OSORIO, C.; GUILHON, L. G.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. Análise das previsões de precipitação obtidas com a utilização do modelo Eta como insumo para modelos de previsão semanal de vazão natural. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 1, 2007.
- CLARK, MP.; RUPPDE, W. R.A.; ZHENGX, I. R. P.; SLATER, A. G. Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. **Adv Water Res**, v. 31, p.1309–1324, 2008.
- CLOKE, H.L.; PAPPENBERGER, F. Ensemble flood forecasting: A review. **Journal of Hydrology**, v.375, n. 3–4, p.613–626, 2009.



- COLLIER, C.G; KRZYSZTOFOWICZ, R). Quantitative precipitation forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 239, p.1–2, 2000.
- COLLISCHONN W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Editora ABRH, 2013, 570p.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. . Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, 2001.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ; CLARKE, R. T. ; CHOU, S. C. ; GUILHON, L. G. ; CATALDI, M. ; ALLASIA, D. G. . Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 344, p. 112-122, 2007.
- COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ; CLARKE, R. T. ; DELGADO, M. C. ; SILVA, B. C. ; COLLISCHONN, B. ; ALLASIA, D. G. ; PAZ, A. R. . Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 43-56, 2007.
- COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2001, 277p.
- COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; FAN, F.; MOREIRA, D.S. ; SILVA DIAS, P.L. ; BUARQUE, D. ; BRAVO, J. M. Short-term Ensemble Flood Forecasting Experiments in Brazil. **Geophysical Research Abstracts**, v. 15, p. 11910, 2013.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 305, p. 87-98, 2005.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M.. Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 1: Ajuste e Verificação do Modelo Hidrológico Distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.4, p.43-59, 2005.
- CORDERO, A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L Previsão de cheia em tempo atual, com um Modelo Armax, para a cidade de Rio do Sul-SC. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011.
- COSTA, F. S.; RAUPP, I. P.; DAMAZIO, J. M. ; OLIVEIRA, P. D. ; GUILHON, L. G. F. The Methodologies for the Flood Control Planning Using Hydropower Reservoirs in Brazil. In: **6th International Conference on Flood Management, 2014**, São Paulo. ICMF6. São Paulo: ABRH, 2014.
- COUTINHO, M. M. **Previsão por conjuntos utilizando perturbações baseadas em componentes principais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1999. 136p
- CRANSTON, M.D., MAXEY, R., TAVENDALE, A C.W., BUCHANAN, P., MOTION, A., COLE, S., ROBSON, A., MOORE, R.J. AND MINETT, A. Countrywide flood

- forecasting in Scotland: challenges for hydrometeorological model uncertainty and prediction, **Weather Radar and Hydrology**, IAHS Publ., v. 351, 2011.
- CUI, B.; TOTH, Z.; ZHU, Y.; HOU, D: Bias correction for global ensemble forecast. **Wea. Forecasting**, v. 27, p. 396-410, 2012.
- CUNNINGHAM, C. A.; BONATTI, J. P. Local and remote responses to opposite Ross Sea ice anomalies: a numerical experiment with the CPTEC/INPE AGCM. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-22, 2011.
- CUO L., PAGANO T.C., WANG, Q.J. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, p. 713–728, 2011.
- DALE, M.; WICKS, J.; MYLNE, K.; PAPPENBERGER, F.; LAEGER, S.; TAYLOR, S. **Probabilistic flood forecasting and decision making: an innovative risk-based approach**. **Nat. Hazard**. ISSN:1573-0840, Springer Netherlands, 2012.
- DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011, doi:10.1002/qj.828.
- DEMARGNE, J., BROWN, J., LIU, Y., SEO, D.-J., WU, L., TOTH, Z. AND ZHU, Y. (2010), Diagnostic verification of hydrometeorological and hydrologic ensembles. *Atmosph. Sci. Lett.*, 11: 114–122. doi: 10.1002/asl.261
- DEMARGNE, J.; WU, L.; REGONDA, S. K.; BROWN, J. D.; LEE, H.; HE, M.; SEO, D.-J.; HARTMAN, R.; HERR, H.D.; FRESCH, M.; SCHAAKE, J.; ZHU, Y. The science of NOAA's operational Hydrologic Ensemble Forecast Service. **Bulletin of the American Meteorological Society**, *in press*, 2014.
- DEMERRITT, D.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F., THIELEN, J.; BARTHOLMES, J. & RAMOS, M.-H. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. **Environmental Hazards**, v. 7, p.115–127, 2007.
- DEMIREL, M. C., BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. Effect of different uncertainty sources on the skill of 10 day ensemble low flow forecasts for two hydrological models, **Water Resour. Res.**, v. 49, p. 4035–4053, 2013, doi:10.1002/wrcr.20294.
- DIETRICH, J.; SCHUMANN, A.H.; REDETZKY, M.; WALTHER, J.; DENHARD, M.; WANG, Y.; PFUTZNER, B.; BUTTNER, U. Assessing uncertainties in flood forecasts for decision making: prototype of an operational flood management system integrating ensemble predictions. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 9, p.1529–1540, 2009.
- DU, J.; MULLEN, S.L.; SANDERS, F. Short-Range Ensemble Forecasting of Quantitative Precipitation. **Mon. Wea. Rev.**, v. 125, p. 2427–2459, 1997.

- DUMEDAH G., COULIBALY, P. Evaluating forecasting capabilities for data assimilation methods: Ensemble Kalman Filter, Particle Filter, and Evolutionary-based assimilation. **Advances in Water Resources**, *in press*, 2013c, doi:10.1016/j.advwatres.2013.07.007.
- DUMEDAH, G.; COULIBALY, P. Examining the differences in streamflow estimation for gauged and ungauged watersheds using the Evolutionary Data Assimilation. **Journal of Hydroinformatics**, *in press*, 2013b, doi:10.2166/hydro.2013.193.
- DUMEDAH, G.; COULIBALY, P. Integration of evolutionary algorithm into Ensemble Kalman Filter, and Particle Filter for hydrologic data assimilation. **Journal of Hydroinformatics**, *in press*, 2013a, doi:10.2166/hydro.2013.088..
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. 2013. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2013**, ano base 2012. 31 pg. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2013\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf). Último acesso em 15 de Junho de 2014.
- FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. ; QUIROZ, K. ; SORRIBAS, M. V. ; BUARQUE, D. C. ; SIQUEIRA, V. A.. Flood Forecasting on the Tocantins River Using Ensemble Rainfall Forecasts and Real-Time Satellite Rainfall Estimates. **IFCM-6 proceedings**. São Paulo, Brasil, 2014a.
- FAN, F. M. ; COLLISCHONN, W. ; QUIROZ, K. ; SORRIBAS, M. V. ; BUARQUE, D. C. ; SIQUEIRA, V. A.. Flood Forecasting on the Tocantins River Using Ensemble Rainfall Forecasts and Real-Time Satellite Rainfall Estimates. **Journal of Flood Risk Management**. *In press*. 2015b.
- FAN, F. M., PONTES, P. R. M., BELTRAME, L. F. S., COLLISCHONN W., BUARQUE, D. C. Operational Flood Forecasting System to the Uruguay River Basin Using the Hydrological Model MGB-IPH. **IFCM-6 proceedings**. São Paulo, Brasil, 2014b.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. ; BUARQUE, D. C.; TUCCI, C. E. M.; BOTELHO, L. C. M. Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Previsão Hidrológica Distribuída para a Região da Uhe Três Marias. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves - RS. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.
- FAN, F. M. ; MELLER, A. ; COLLISCHONN, W. . Incorporação de filtro numérico de separação de escoamento na assimilação de dados para previsão de vazões utilizando modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2015a (*in press*).
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. .Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 243-254, 2014d.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; MELLER, A.; BOTELHO, L. C. M. Ensemble streamflow forecasting experiments in a tropical basin: The São Francisco river case study. **Journal of Hydrology** (Amsterdam), v. SI, p. 10.1016/j.jhydr, 2014c.

- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; QUIROZ, K.; SORRIBAS, M. V.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A. Ensemble flood forecasting on the Tocantins River - Brazil. **Geophysical Research Abstracts**, v. 16, p. 1818-1818, 2014a.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; BELTRAME, L. F. S. Sistema de Previsão de Vazões para as Bacias dos Rios Taquari-Antas e Pelotas. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, João Pessoa PB. **Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2012.
- FAN, M.F. **Acoplamento entre Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica: Integração do Modelo MGB-IPH**. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011, 179 p.
- FERRO C.A.T.; RICHARDSON D.S.; A.P. WEIGEL. On the effect of ensemble size on the ranked probability and multi-category Brier scores. **Met. Apps**, v. 15, p. 19-24, 2008.
- FRALEY, C.; RAFTERY, A.E. Calibrating Multimodel Forecast Ensembles with Exchangeable and Missing Members Using Bayesian Model Averaging. **Monthly Weather Review**, v. 138, p.190-202, 2010.
- SILVESTRO F.; REBORA N., Impact of precipitation forecast uncertainties and initial soil moisture conditions on a probabilistic flood forecasting chain, **Journal of Hydrology**, v. 519, Part A, p. 1052-1067, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.042>, 2014.
- FRANZ, K. J., HOGUE, T.S. Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: borrowing measures from the forecast verification community. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 8, p.3085–3131, 2011.
- FUNDEL, F.; WALSER, A.; LINIGER, M. A.; FREI, C.; APPENZELLER, C. Calibrated precipitation forecasts for a limited-area ensemble forecast system using reforecasts. **Mon. Wea. Rev.** v. 138, p. 176–189, 2009, doi:10.1175/2009MWR2977.1
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and ensemble forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 249, p.1, 2001.
- GNEITING, T.; RAFTERY, A. E.; WESTVELD III, A. H.; GOLDMAN, T. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. **Mon Wea. Rev.**, v. 133, p. 1098-1118, 2005.
- GOLDING, B. W. Long lead time flood warnings: reality or fantasy? **Met. Apps**, v. 16, p. 3–12, 2009doi: 10.1002/met.123.
- GOMES, L. F. C.; MOMNTENEGRO, S. M. G. L.; VALENÇA, M. J. S. . Modelo Baseado na Técnica de Redes Neurais para Previsão de Vazões na Bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 1, 2010.
- GOUWELEEUW, B. T.; THIELEN, J.; FRANCHELLO, G.; DE ROO, A. P. J.; BUIZZA, R. Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.9, p.365–380, 2005.

- GUILHON, L.G.F.; ROCHA, V.F.; MOREIRA, J.C. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 13-20, 2007.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. On the utility of operational precipitation forecasts to serve as input for streamflow forecasting. **Journal of Hydrology**, v. 293, p. 270-288, 2004.
- HAGEDORN, R., BUIZZA, R., HAMILL, T. M., LEUTBECHER, M. AND PALMER, T. N., Comparing TIGGE multimodel forecasts with reforecast-calibrated ECMWF ensemble forecasts. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, 138: 1814–1827. doi: 10.1002/qj.1895, 2012.
- HAMILL, T. M., WHITAKER, J. S.; WEI X.; Ensemble Reforecasting: Improving Medium-Range Forecast Skill Using Retrospective Forecasts. **Mon. Wea. Rev.**, v. 132, p. 1434-1447, 2004.
- HAMILL, T. M.; BATES G. T.; WHITAKER, J. S.; MURRAY, D. R.; FIORINO, M.; GALARNEAU, T. J.; Y. ZHU, JR.; LAPENTA. W, NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set. **Bull Amer. Meteor. Soc.**, v. 94, p. 1553-1565, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00014.1>
- HAMILL, T. M.; SNYDER, C.; MORSS, R. E. A comparison of probabilistic forecasts from bred, singular-vector, and perturbed observation ensembles. **Mon. Wea. Rev.**, v. 128, p. 1835-1851, 2000:
- HAMILL, T., HAGEDORN, R., WHITAKER, J. Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. part II: precipitation. **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 7, p. 2620–2632, 2008
- HE, M.; HOGUE, T.S.; MARGULIS, S.A.; FRANZ, K.J. An integrated uncertainty and ensemble-based data assimilation approach for improved operational streamflow predictions. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, p. 815–831, 2012.
- HE, Y., WETTERHALL, F., BAO, H., CLOKE, H., LI, Z., PAPPENBERGER, F., HU, Y., MANFUL, D.; HUANG, Y. Ensemble forecasting using TIGGE for the July–September 2008 floods in the Upper Huai catchment: a case study. **Atmosph. Sci. Lett.**, v. 11, p. 132–138, doi: 10.1002/asl.270, 2010.
- HE, Y., WETTERHALL, F., CLOKE, H. L., PAPPENBERGER, F., WILSON, M., FREER, J.; MCGREGOR, G. Tracking the uncertainty in flood alerts driven by grand ensemble weather predictions. **Met. Apps**, v. 16, p. 91–101, doi: 10.1002/met.132, 2009.
- HERSBACH, H. Decomposition of the continuous ranked probability score for ensemble prediction systems. **Weather and Forecasting**, v. 15, p. 559–570, 2000.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas**. 1992. 155p.
- JAUN, S.; AHRENS, B. Evaluation of a probabilistic hydrometeorological forecast system, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 1031-1043, 2009, doi:10.5194/hess-13-1031-2009.

- JAVELLE, P., DEMARGNE, J., DEFRANCE, D., PANSU, J.; ARNAUD, P. Evaluating flash flood warnings at ungauged locations using post-event surveys: a case study with the AIGA warning system. **Hydrological Sciences Journal**, *in press*, 2013.
- JAVELLE, P.; FOUCHIER, C. ; ARNAUD, P. ; LAVABRE, J.. Flash flood warning at ungauged locations using radar rainfall and antecedent soil moisture estimations. **Journal of Hydrology**, v. 394, n. 1-2, p. 267-274, 2010.
- JOHNSON, C.; SWINBANK, R: Medium-range multimodel ensemble combination and calibration. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 135, p. 777–794, 2009.
- JOLLIFFE, I.T.; STEPHENSON, D.B. (Eds.). **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science**, second ed. 2012
- KOMMA, J.; RESZLER, C.; BLOSCHL, G. & HAIDEN, T.,. Ensemble prediction of floods–catchment non-linearity and forecast probabilities. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 7, p.431–444, 2007.
- KOUWEN, N.; SOULIS, E.D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON; R.A. Grouped Response Units for Distributed Hydrologic Modeling. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 119, n.3, p.289-305, 1993.
- KRZYSZTOFOWICZ, R. The case for probabilistic forecasting in hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 249, n. 1-4, p. 2–9, 2001.
- KUCHEMENT, L.S.; GELFAN, A.N. Long-term probabilistic forecasting of snowmelt flood characteristics and the forecast uncertainty. In: Boegh *et al.* (ed) Quantification and reduction of predictive uncertainty for sustainable water resources management, **IAHS Publs.**, v. 313, p. 213-221, 2007.
- KUCHMENT L.S.; GELFAN A.N. A study of effectiveness of the ensemble long-term forecasts of spring floods issued with physically-based models of river runoff formation. **Russian Meteorology and Hydrology**, v. 34, p. 100-109, 2009.
- KUCHMENT, L.S.; DEMIDOV, V.N.; MOTOVILOV, Y.G. A physically-based model of the formation of snowmelt and rainfall runoff. In: Morris, E.M. (Ed.), *Modeling Snowmelt-Induced Processes*. Budapest, **IAHS Publ.**, v. 155, p. 27–36, 1986.
- KUCHMENT, L.S.; GELFAN A.N. Assessment of extreme flood characteristics based on a dynamic-stochastic model of runoff generation and the probable maximum discharge. **Journal of Flood Risk Management**, v. 4, p. 115–127, 2011.
- KYRILLOS, D.S, **Otimização da Programação da Operação Diária em Situação Normal de Cheias e em Situação de Emergência em Reservatórios de Sistemas Hidroelétricos**, Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006
- LEUTBECHER, M.; PALMER, T.N. Ensemble forecasting. **Journal of Computational Physics**, v. 227, p. 3515-3539, 2008:

- LINDSTRÖM, G.; JOHANSSON, B.; PERSSON, M.; GARDELIN, M.; BERGSTRÖM, S. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 201, p. 272–288, 1997:
- LIU, Y.; BROWN, J. D.; DEMARGNE, J.; SEO, D-J: A wavelet-based approach to assessing timing errors in hydrologic predictions. **J. Hydrol.**, v. 39, n. 3-4, p. 210-224, 2011.
- LIU, Y.; GUPTA, H.V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data 488 assimilation framework. **Water Resour. Res.**, v. 43, W07401, 2007, doi: 10.1029/2006WR005756.
- LIU, Y.; WEERTS, A. H.; CLARK, M.; HENDRICKS FRANSSEN, H.-J.; KUMAR, S.; MORADKHANI, H.; SEO, D.-J.; SCHWANENBERG, D.; SMITH, P.; VAN DIJK, A. I. J. M.; VAN VELZEN, N.; HE, M.; LEE, H.; NOH, S. J.; RAKOVEC, O.; RESTREPO, P. Advancing data assimilation in operational hydrologic forecasting: progresses, challenges, and emerging opportunities. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 16, p. 3863-3887, 2012, doi: 10.5194/hess-16-3863-2012.
- LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. **Tellus**, v. 17, p. 321-333, 1965.
- LORENZ, E. N. Deterministic non-periodic flow. **J. Atmos. Sci.**, v. 20, p. 130-141, 1963.
- LORENZ, E. N. The predictability of a flow which contains many scales of motion. **Tellus**, v. 21A, p. 289–307, 1969.
- LUDWIG, K.; BREMICKER, M. **The Water Balance Model LARSIM - Design, Content and Applications. Freiburger Schriften zur Hydrologie**, Band 22, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg, 2006.
- MAXEY, R.; CRANSTON, M.; TAVENDALE, A.; BUCHANAN, P. The use of deterministic and probabilistic forecasting in countrywide flood guidance in Scotland. **British Hydrological Society**, 2012, doi: 10.7558/bhs.2012.ns33
- MCCOLLOR, D.; STULL, R. Hydrometeorological Short-Range Ensemble Forecasts in Complex Terrain. Part II: Economic Evaluation. **Weather and Forecasting**, v. 23, p. 557-574, 2008, doi: 10.1175/2007WAF2007064.1
- MEISSNER, D; RADEMACHER. S. Die verkehrsbezogene Wasserstandsvorhersage für die Bundeswasserstraße Rhein - Verlängerung des Vorhersagezeitraums und Steigerung der Vorhersagequalität. **Korrespondenz Wasserwirtschaft**, v. 09, p.10, 2010:
- MELLER, A. **Previsão de cheias por conjunto em curto prazo**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012. 224p.
- MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; SILVA DIAS, P.; MOREIRA, D. . Previsão de Cheias por Conjunto em Curto Prazo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, *in press*, 2014.

- MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. Experiments with EOF-Based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE Ensemble Prediction System. **Monthly Weather Review**, v. 137, p. 1438–1459, 2009.
- MENDONÇA, A. M.; BONATTI, J. P. O sistema de previsão de tempo global por ensemble do CPTEC. **Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz de Iguçu-PR. 2002
- MOLTENI, F., BUIZZA, R., PALMER, T.N., PETROLIAGIS, T. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, v. 122, p. 73–119, 1996.
- MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. Forecasting for flood warning. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 33, n. 1–2, p. 203–217, 2005.
- MÜLLER, W.; APPENZELLER, A., C.; DOBLAS-REYES, F. J.; LINIGER, M. A. A Debaised Ranked Probability Skill Score to Evaluate Probabilistic Ensemble Forecasts with Small Ensemble Sizes. **J. Climate**, v. 18, p. 1513–1523. 2005, doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3361.1>
- MURPHY, A. H. What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. **Wea. Forecasting**, v. 8, p. 281–293, 1993
- MURPHY A. H. A new decomposition of the Brier Score: formulation and interpretation. **Monthly Weather Review**, v 114, p. 2671 – 2673, 1986.
- O'CONNELL; P. E.; CLARKE, R. T. Adaptive hydrological forecasting - a review. **Hydrol. Sci. Bull**, v. 26, n. 2, p.179-205, 1981.
- OLIVEIRA, P. D.; GUILHON, L. G.; COSTA, F. S. ; RAUPP, I. P.; DAMAZIO, J. M. . The operation of Flood Control in Large Hydroelectric Power Systems - The Brazilian Experience. In: **6th International Conference on Flood Management**, 2014, São Paulo. ICMF6, 2014.
- OLSSON, J.; LINDSTROM, G. Evaluation and calibration of operational hydrological ensemble forecasts in Sweden. **J. Hydrol.**, v. 350, p.14-24, 2008.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio São Francisco (Ciclo 2012-2013)**. ONS RE 3/166/2012, 158 pg., 2012a.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Parnaíba (Ciclo 2013-2014)**. ONS RE 3/137/2013, 85 pg., 2013a.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Paraná até Porto São José (Ciclo 2012-2013)**. ONS RE 3/170/2012, 210 pg., 2012b.



- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Paraíba do Sul (Ciclo 2013-2014)**. ONS RE 3/0131/2013, 50 pg., 2012c.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Paraíba do Sul (Ciclo 2013-2014)**. ONS RE 3/0131/2013, 50 pg., 2013b.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Paraíba do Sul (Ciclo 2012-2013)**. ONS RE 3/171/2012, 50 pg., 2012d.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Jequitinhonha (Ciclo 2013-2014)**. ONS RE 3/135/2013, 63 pg., 2013c.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Jacuí (Ciclo 2011-2012)**. ONS RE 3/217/2011, 40 pg., 2011b.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Diretrizes para as Regras de Operação de Controle de Cheias – Bacia do Rio Iguaçu (Ciclo 2013-2014)**. ONS RE 3/0064/2014, 48 pg., 2014.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidrelétricos (Revisão 1 de 2012)**. ONS RE 3/0105/2012, 154 pg., 2012e.
- ONS – Operador Nacional do Sistema. **Procedimentos de Rede Submódulo 9.5: Previsão de Vazões e Geração de Cenários de Afluências**. Vol. 2, 9 pg., 2011a.
- PAGANO, T.; WOOD, A.; RAMOS, M.; CLOKE, H.; PAPPENBERGER, F.; CLARK, M.; CRANSTON, M.; KAVETSKI, D.; MATHEVET T; SOROOSHIAN, S.; VERKADE J.: Challenges of Operational River Forecasting. **J. Hydrometeor.** doi:10.1175/JHMD-13-0188.1, *in press*, 2014
- PAGANO, T. C. Evaluation of Mekong River commission operational flood forecasts, 2000–2012, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 18, 2645-2656, doi:10.5194/hess-18-2645-2014, 2014
- PAIVA, L. F. G.; ACIOLI, G. C. L. Previsão de vazões com o Modelo Cpins – cálculo e previsão de vazões naturais e incrementais a sobradinho. **Anais do I Workshop de Previsão de Vazões**. Rio De Janeiro. ONS, 2007.
- PAIVA, R. C. D. ; PAIVA, R. C. D. ; COLLISCHONN, W. ; BONNET, M.-P. ; de Gonçalves, L. G. G. ; CALMANT, S.; GETIRANA, A. ; SANTOS DA SILVA, J. . Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions (Online)**, v. 10, p. 2879-2925, 2013.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; DE GONÇALVES, L. G. G. On the sources of hydrological prediction uncertainty in the Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.16, p. 3127-3137, 2012.

- PAIVA, R.C.D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2009, 168p.
- PAPPENBERGER F.; BROWN, J. D. HP today: on the pursuit of (im) perfection in flood forecasting. **Hydrological Processes HEPS Special Issue**, v. 27, p. 162–163, 2013
- PAPPENBERGER, F., BOGNER, K., WETTERHALL, F., HE, Y., CLOKE, H. L., AND THIELEN, J.: Forecast convergence score: a forecaster's approach to analysing hydro-meteorological forecast systems, **Adv. Geosci.**, v. 29, p. 27-32, 2011, doi:10.5194/adgeo-29-27-2011.
- PAPPENBERGER, F. CLOKE, H. L., PARKER, D. J., WETTERHALL, F., RICHARDSON D. S., THIELEN J. The monetary benefit of early flood warnings in Europe, **Environmental Science & Policy**, Volume 51, August 2015, Pages 278-291, ISSN 1462-9011, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.016>.
- PAPPENBERGER, F., STEPHENS, L., VAN ANDEL, S.J., VERKADE, J.S., RAMOS, M.H., ALFIERI, L., BROWN, J.D., ZAPPA, M., RICCIARDI, G., WOOD, A., PAGANO, T., MARTY, R., COLLISCHONN, W., LE LAY, M., BROCHERO, D., CRANSTON, M., MEISSNER, D., 2013. **Operational HEPS systems around the globe**. Disponível em: <http://hepex.irstea.fr/operational-heps-systems-around-the-globe/#comment-791>. Último acesso em 15 de Junho de 2014.
- PAPPENBERGER, F.; BARTHOLMES, J.; THIELEN, J.; CLOKE, H. L.; BUIZZA, R.; DE ROO, A. New dimensions in early flood warning across the globe using grand-ensemble weather predictions, **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, 2008, doi:10.1029/2008GL033837.
- PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.J.; HUNTER, N.M.; BATES, P.D.; GOUWEELEEUW, B.T.; THIELEN, J.; DE ROO; A.P.J. Cascading model uncertainty from medium range weather forecasts (10 days) through a rainfall-runoff model to flood inundation predictions within the European Flood Forecasting System (EFFS). **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.35, p.381-393, 2005.
- PAPPENBERGER, F.; CLOKE, H. L.; PERSSON, A.; DEMERITT, D.. HESS Opinions "On forecast (in)consistency in a hydro-meteorological chain: curse or blessing?", **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 8, p. 1225-1245, 2011, doi:10.5194/hessd-8-1225-2011.
- PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J.; DEL MEDICO, M. The impact of weather forecast improvements on large scale hydrology: analysing a decade of forecasts of the European Flood Alert System. **Hydrol. Process.**, v. 25, p.1091–1113, 2011.
- PARK, Y.-Y., BUIZZA, R; LEUTBECHER, M.: TIGGE: Preliminary results on comparing and combining ensembles. **Quart. J. Roy. Met. Soc.** V. 134, p. 2029-2050, 2008
- PAZ AR, COLLISCHONN W, TUCCI C, CLARKE R, ALLASIA D. Data Assimilation in a Large-scale Distributed Hydrological Model for Medium Range Flow Forecasts. IAHS Press, Wallingford, UK, **IAHS Publication**, n. 313, p. 471–478, 2007.

- PEDROLLO, M.; GERMANO, A. O.; RODRIGUES, E.; MADUELL, J. C. Alerta hidrológico da Bacia do Rio Caí: concepção e implantação do sistema. In: Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos,, Maceió. **Anais... Maceió: ABRH**, 2011.
- PEÑA, M.; H. VAN DEN DOOL: Consolidation of multimodel forecasts by ridge regression: Application to Pacific sea surface temperature. **J. Climate**, v. 21, p. 6521–6538, 2008.
- PIETRONIRO, A.; FORTIN, V.; KOUWEN, N.; NEAL, C.; TURCOTTE, R.; DAVISON, B.; VERSEGHY, D.; SOULIS, E.D.; CALDWELL, R.; EVORA, N.; PELLERIN, P. Using the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 11, p. 1279–1294, 2007.
- PINHEIRO, A. Modelos de previsão de cheias. In: Frank e Pinheiro (2003): **Enchentes na bacia do rio Itajaí: 20 anos de experiências**. EDIFURB. Blumenau, 2003
- PRICE, D.; HUDSON, K.; BOYCE, G.; SCHELLEKENS, J.; MOORE, R. J.; CLARK, P.; HARRISON, T.; CONNOLLY, E.; PILLING, C. Operational use of a grid-based model for flood forecasting. **Water Management**, v. 165, WM2, 2012.
- QUIROZ J.K.; COLLISCHONN. W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por Satélite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (in press)**, 2014.
- QUIROZ, J. K.; COLLISCHONN, W. Método de combinação de dados de precipitação estimados por satélite e medidos em pluviômetros para a modelagem hidrológica. Em: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Bento Gonçalves-RS, Brazil, Novembro, 22pg, 2013
- RAMOS DA SILVA, R.; SILVA DIAS, P. L. ; MOREIRA, D. S. ; SOUZA, E. B. Modelo OLAM (Ocean-Land\_Atmosphere-Model): Descrição, Aplicações, e Perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia (Impresso)**, v. 24, p. 144-157, 2009.
- RAMOS, M.H.; MATHEVET, T.; THIELEN, J.; PAPPENBERGER, F. Communicating uncertainty in hydro-meteorological forecasts: mission impossible? **Meteorological Applications**, v. 17, p. 223-235, 2010.
- RAMOS, M.H.; VAN ANDEL, S.J.; PAPPENBERGER, F. Do probabilistic forecasts lead to better decisions? **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 9, n. 17, p. 2219-2232, 2013, doi:10.5194/hess-17-2219-2013.
- RANDRIANASOLO, A., RAMOS, M. H., AND ANDRÉASSIAN, V.: Hydrological ensemble forecasting at ungauged basins: using neighbour catchments for model setup and updating, **Adv. Geosci.**, v. 29, p. 1-11, doi:10.5194/adgeo-29-1-2011, 2011.
- RASO L, VAN DE GIESEN N, STIVE P, SCHWANENBERG D, VAN OVERLOOP PJ. **Tree Structure Generation from Ensemble Forecasts for Real Time Control**, Hydrol. Process. 27, 75–82, 2013.

- REFSGAARD, J.C. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. **Nordic Hydrology**, v.28, p.65-84., 1997.
- REGONDA S. K.; SEO D.; LAWRENCE B.; BROWN, J. D.; DEMARGNE J. Short-term ensemble streamflow forecasting using operationally-produced single-valued streamflow forecasts – A Hydrologic Model Output Statistics (HMOS) approach. **Journal of Hydrology**, v. 497, p. 80-96, 2013.
- REIS, D. S. Jr ; NASCIMENTO, L. S. V. ; MARTINS, Eduardo Sávio Passos Rodrigues . AVALIAÇÃO DO ENSEMBLE DA PREVISÃO CLIMÁTICA DE CHUVA NO ESTADO DO CEARÁ COM BASE EM MODELOS NUMÉRICOS DE CLIMA. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007..
- RENNER, M., WERNER, M.G.F.; RADEMACHER, S.; SPROKKEREEF E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 463-475, 2009.
- RENNER, M.; WERNER, M.; RADEMACHER, S.; SPROKKEREEF, E. Verification of ensemble flow forecasts for the River Rhine. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 463–475, 2009, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.059.
- RICHARDSON D. S. Measures of skill and value of ensemble prediction systems, their interrelationship and the effect of ensemble size. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 2473–2489, 2001.
- ROGERS, D., TSIRKUNOV, V. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction – Costs and Benefits of Early Warning Systems**. United Nations, 2011.
- ROSSA, A.; LIECHTI, K.; ZAPPA, M.; BRUEN, M.; GERMANN, U.; HAASE, G.; KEIL, C.; KRAHE, P. The COST 731 action: a review on uncertainty propagation in advanced hydrometeorological forecast systems. **Atmos. Res.**, v.100, p.150–167, 2011.
- ROTACH, M. W.; ARPAGAU, M.; DORNINGER, M.; HEGG, C.; MONTANI, A.; RANZI, R. Uncertainty propagation for flood forecasting in the Alps: different views and impacts from MAP D-PHASE. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, p.2439–2448, 2012.
- ROULIN, E. Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 11, p.725–737, 2007, doi:10.5194/hess-11-725-2007.
- ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; DE GONCALVES, L. G. G.; VILA, D. A. “Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America”. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885- 894, 2010.
- SCHAAKE, J. Hydrologic Ensemble Prediction: Past, Present and Opportunities for the Future. In: **CHR-Workshop – Expert Consultation Ensemble Predictions and Uncertainties in Flood Forecasting**. Bern, Switzerland, 2006.

- SCHAAKE, J.; DEMARGNE, J.; HARTMAN, R.; MULLUSKY, M.; WELLES, E.; WU, L., HERR, H.; FAN, X.; SEO, D.J. Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v. 4, p. 655-717, 2007.
- SCHAAKE, J.; FRANZ, K.; BRADLEY, A.; BUIZZA, R. The Hydrologic Ensemble Prediction EXperiment (HEPEX). **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 3, p.3321–3332, 2006.
- SCHELLEKENS, J.; WEERTS, A.H.; MOORE, R.J.; PIERCE, C.E.; HILDON, S. The use of MOGREPS ensemble rainfall forecasts in operational flood forecasting systems across england and wales. **Advances in Geosciences**, v. 29, p. 77–84, 2011.
- SCHERRER, S. C.; APPENZELLER, C.; ECKERT, P.; CATTANI, D. Analysis of the spread-skill relations using the ECMWF en-semble prediction system over Europe. **Wea. Forecasting**, v. 19, p. 552 – 565, 2004.
- SCHWANENBERG, D.; FAN, F. M.; NAUMANN, S.; KUWAJIMA, J. I.; MONTERO, R. A., ASSIS DOS REIS, A. Short-Term Reservoir Optimization for Flood Mitigation under Meteorological and Hydrological Forecast Uncertainty. **Water Resources Management**, v. 29, ed. 5, p. 1635-1651, <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0899-1>, 2015.
- SENE, K. **Hydrometeorology: Forecasting and Applications**. Publisher: Springer, 1 edition ,2010, 366 p.
- SERBAN, P.; ASKEW, A.J. Hydrological Forecasting and Updating Procedures. In: Hydrology for the Water Management of Large River Basins. **IAHS Publ.**, v. 201, p.57-369, 1991.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; DELGADO, M. C. . Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 31-42, 2007.
- SOLMAN, S. A.; SANCHEZ, E.; SAMUELSSON, P.; ROCHA, R. P.; LI, L.; MARENGO, J.; PESSACG, N. L.; REMEDIO, A. R. C. ; CHOU, S. C.; BERBERY, H.; TREUT, H.; CASTRO, M.; JACOB, D. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: model performance and uncertainties. **Climate Dynamics** , v. 41, p. 1139-1157, 2013.
- SOLOMON, S.I.; BASSO, E.; OSORIO, C.; MELO DE MORAES, H.; SERRANO, A. Flood forecasting for Tucuruí hydroelectrical plant, Brazil. **Water Resources Bulletin**, v. 22, n. 2, 209-217, 1986.
- SRIKANTHAN, R.; ELLIOTT, J. F.; ADAMS, G. A. **A Review of Real-Time Flood Forecasting Methods**. A report as part of Project D4: Development of a real-time flood forecasting model. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology-CRC. April 1994.
- STANSKI, H., WILSON, L., BURROWS, W. **Survey of common verification methods in meteorology**. World Meteorological Organization Geneva, 1989.

- SU, F.; GAO H., HUFFMAN G. J. AND LETTENMAIER D. P. Potential Utility of the Real-Time TMPA-RT Precipitation Estimates in Streamflow Prediction. **Journal of Hydrometeorology**, v. 12, p. 444–455. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010JHM1353.1>, 2011.
- TACHINI, M. O. **Alerta de cheias e a ação da defesa civil**. In: Frank e Pinheiro (2003): Enchentes na bacia do rio Itajaí: 20 anos de experiências. EDIFURB. Blumenau. 2003.
- TEISBERG, T.J., WEIHER, R.F. **Background Paper on the Benefits and Costs of Early Warning Systems for Major Natural Hazards**. World Bank, Washington, DC, 2009
- THIELEN, J.; ANNUNZIATO, A.; ANDREDAKIS, I.; MCCORMICK, N.; KALAS, M.; KECHAGIOGLOU, X.; KUCERA, J.; MURARO, D.; PROBST, P. ; SALAMON, P.; THIEMIG, V.. Balkans' worst floods for more than 100 years. 2014. **HEPEX**. Disponível em: <http://hepex.irstea.fr/balkans-worst-floods-for-more-than-100-years/>. Último acesso em 17 de Junho de 2014.
- THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M.-H.; DE ROO, A. The European flood alert system – Part 1: concept and development. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 2, p.125–140, 2009.
- THIEMIG, V.; PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J.; GADAIN, H.; DE ROO, A.; BODIS, K.; DEL MEDICO, M.; MUTHUSI, F. Ensemble flood forecasting in Africa: a feasibility study in the Juba–Shabelle river basin. **Atmosph. Sci. Lett.**, v. 11, p. 123–131, 2010, doi: 10.1002/asl.266 .
- THIEMIG, V.; BISSELINK, B.; PAPPENBERGER, F.; THIELEN, J. A pan-African Flood Forecasting System, **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 11, p. 5559-5597, 2014, doi:10.5194/hessd-11-5559-2014.
- TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, 175(1-4), 339-382. doi: 10.1016/S0022-1694(96)80016-3. 1996.
- ZHAO, T.; ZHAO, J. Joint and respective effects of long- and short-term forecast uncertainties on reservoir operations, **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 83-94, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.063>. 2014.
- TOTH, Z.; KALNAY E. Ensemble Forecasting at NCEP and the Breeding Method. **Mon. Wea. Rev.**, v. 125, p. 3297–3319, 1997.
- TOTH, Z.; KALNAY, E. Ensemble forecasting at NMC: the generation of perturbations. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 74, p. 2317-2330, 1993:
- TOTH, Z; TALAGRAND, O.; CANDILLE, G.; ZHU, Y. Probability and ensembleforecasts. **Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science**; In I. T. Jolliffeand D. B. Stephenson, Eds., John Wiley and Sons, p. 137–163. 2003:
- TUCCI, C.E. M.; COLLISCHONN, W.; CLARKE, R. T.; PAZ, A. R.; ALLASIA, D. Short- and long-term flow forecasting in the Rio Grande watershed (Brazil). **Atmospheric Science Letters**, v. 9, p. 53-56, 2008.

- TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Previsão de Vazão. In: **Clima e Recursos Hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, p.281-348. 2003.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Segunda Edição. ABRH: Porto Alegre. 2005. 678 pg.
- VAN ANDEL S.J.; PRICE R.; LOBBRECHT A.; VAN KRUININGEN F.; MUREAU R.; CORDERO W. Framework for Anticipatory Water Management. **J. Water Resour. Plann. Managem.**, v. 140, n. 4, p. 533–542, 2012, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000254
- VAN DER KNIJFF JM; YOUNIS, J.; DE ROO, A.P.J. LISFLOOD: A GIS-based distributed model for river-basin scalewater balance and flood simulation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 24, n. 2, p. 189-212, 2010.
- VELÁZQUEZ, J.A.; ANCTIL, F.; RAMOS, M.H.; PERRIN, C. Can a multi-model approach improve hydrological ensemble forecasting? A study on 29 French catchments using 16 hydrological model structures. **Adv. Geosci.**, v. 29, p.33–42, 2011.
- VELÁZQUEZ, J. A.; ANCTIL, F.; PERRIN, C. Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 14, p. 2303-2317, 2010, doi:10.5194/hess-14-2303-2010.
- VELÁZQUEZ, J. A.; PETIT, T. ; LAVOIE, A. ; BOUCHER, M.-A. ; TURCOTTE, R. ; FORTIN, V. ; ANCTIL, F. An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 2221-2231, 2009. doi:10.5194/hess-13-2221-2009.
- VERBUNT, M.; WALSER, A.; GURTZ, J.; MONTANI, A.; SCHÄR, C. Probabilistic flood forecasting with limited-area ensemble prediction system: selected case studies. **Journal of Hydrometeorology**, v.8, p.897-909, 2007.
- VERKADE, J. S.; WERNER, M. G. F. Estimating the benefits of single value and probability forecasting for flood warning. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 15, p. 3751-3765, 2011. doi:10.5194/hess-15-3751-2011.
- VILA, D. A.; DE GONCALVES, L. G. G.; TOLL, D. L.; ROZANTE, J. R. Statistical Evaluation of Combined Daily Gauge Observations and Rainfall Satellite Estimates over Continental South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 10, p. 533, 2009.
- VIVIROLI D, ZAPPA M, GURTZ J.; WEINGARTNER R. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. **Environmental Modelling & Software**, v. 24, n.10, p. 1209–1222, 2009,doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001.
- VIVONI, E. R.; ENTEKHABI, D.; BRAS, R. L.; IVANOV, V. Y.; VAN HORNE, M. P.; GRASSOTTI, C.; HOFFMAN, R. N. Extending the predictability of hydrometeorological flood events using radar rainfall nowcasting. **J. Hydrometeorol.**, v.7, n.4, p. 660–677, 2006.

- VRUGT, J.A.; GUPTA, H.V.; NUALLÁIN, B.Ó.; BOUTEN, W. Real-time data assimilation for operational ensemble streamflow forecasting. **J Hydrometeorol**, v. 7, p. 548–65, 2006, <http://dx.doi.org/10.1175/JHM504.1>.
- WANG LI, M. Q. J.; BENNETT, J. C.; ROBERTSON, D. E: A strategy to overcome adverse effects of autoregressive updating of streamflow forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 19, p. 1-15, 2015, doi:10.5194/hess-19-1-2015..
- WEI, M., TOTH, Z.; WOBUS, R.; ZHU, Y. Initial perturbations based on the Ensemble Transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system. **Tellus**, v. 60A, p. 62-79, 2008.
- WEI, M., TOTH, Z.; WOBUS, R.; ZHU, Y; Bishop, C.H.; Wang, X. Ensemble Transform Kalman Filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP. **Tellus**, v. 58A, p. 28-44, 2006:
- WEI, M.; TOTH, Z. A new measure of ensemble performance: Perturbations versus Error Correlation Analysis (PECA). **Mon. Wea. Rev.**, v. 131, p. 1549-1565, 2003.
- WEIGEL A.P.; LINIGER M.A.; C. APPENZELLER. Generalization of the discrete Brier and ranked probability skill scores for weighted multi-model ensemble forecasts. **Mon. Wea. Rev.** 135, 2778-2785. 2007a.
- WEIGEL A.P.; LINIGER M.A.; C. APPENZELLER. The discrete Brier and ranked probability skill scores. **Mon. Wea. Rev.** 135, 118-124. 2007b.
- WERNER, M.; SCHELLEKENS J.; GIJSBERS, P.; VAN DIJK, M.; VAN DEN AKKER, O. ; HEYNERT, K. The Delft-FEWS Flow Forecasting System. **Environmental Modelling & Software**, 40, p. 65–77, 2013., doi:10.1016/j.envsoft.2012.07.010.
- WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Academic Press, 2a ed., 2006, 627p.
- WU, H.; ADLER,R. F.; TIAN, Y.; HUFFMAN, J. G.; LI, H.; J. WANG J. Real-time global flood estimation using satellite-based precipitation and a coupled land surface and routing model, **Water Resour. Res.**, 50,doi:10.1002/2013WR014710. 2014.
- WU, L.; SEO, D.-J.; DEMARGNE, J.; BROWN, J.D.; CONG, S.; SCHAAKE, J. Generation of ensemble precipitation forecast from single-valued quantitative precipitation forecast via meta-Gaussian distribution models. **Journal of Hydrology**, v. 399, n. 3-4, p. 281-298, 2011.
- XUAN, Y.; CLUCKIE, I.D.; WANG, Y. Uncertainty analysis of hydrological ensemble forecasts in a distributed model utilising short-range rainfall prediction. **Hydrology and Earth Systems Sciences**, v. 13, p.293–303, 2009.
- YOUNIS, J.; RAMOS, M.-H.; THIELEN, J. EFAS forecasts for the March–April 2006 flood in the Czech part of the Elbe River Basin – a case study. **Atmospheric Science Letters**, v. 9, p.88–94, 2008.



- ZAMBON, R. C.; BARROS, M. T. L.; YEH, W. W-G. . Brazilian Hydrothermal System Operation: Interconnected Large System or Isolated Subsystems?. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2014**, 2014a, Portland. World Environmental and Water Resources Congress 2014. Reston : American Society of Civil Engineers. p. 1926. 2014.
- ZAMBON, R. C. ; BARROS, M. T. L.; GIMENES, M.; BOZZINI, P. L.; YEH, W. W-G. . Flood control and energy production on the Brazilian Hydrothermal System. In: **6th International Conference on Flood Management 2014**, São Paulo. 6th International Conference on Flood Management, 2014b.
- ZAMBON, Renato Carlos ; BARROS, Mario Thadeu Leme de ; LOPES, João Eduardo Gonçalves ; BARBOSA, Paulo Sergio Franco ; FRANCATO, Alberto Luiz ; YEH, William W-G. . Optimization of Large-Scale Hydrothermal System Operation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 138, p. 135-143, 2012.
- ZAPPA, M.; ROTACH, M.W.; ARPAGAU, M.; DOMINGER, M.; HEGG, C.; MONTANI, A.; RANZI, R.; AMENT, F.; GERMANN, U.; GROSSI, G.; JAUN, S.; ROSSA, A.; VOGT, S.; WALSER, A.; WEHRHAN, J. & WUNRAM, C. MAP D-PHASE: real-time demonstration of hydrological ensemble prediction systems. *Atmos. Sci. Let.*, 9, p.80–87, 2008
- ZHANG, Z., KRISHNAMURTI, T.N. A perturbation method for hurricane ensemble predictions. *Mon. Wea. Rev.*, v. 127, p. 447-469, 1999.
- ZHAO, T.; D. YANG; X. CAI; J. ZHAO; H. Wang. Identifying effective forecast horizon for real-time reservoir operation under a limited inflow forecast, *Water Resour. Res.*, v. 48, W01540, 2012, doi:10.1029/2011WR010623.
- ZHAO, T.; XIMING, C.; DAWEN, Y. Effect of streamflow forecast uncertainty on real-time reservoir operation. *Advances in Water Resources*, v. 34, n. 4, p. 495-504, 2011.

## ANEXO A

### OUTRAS FORMAS DE APRESENTAÇÃO DE PREVISÕES POR ENSEMBLE

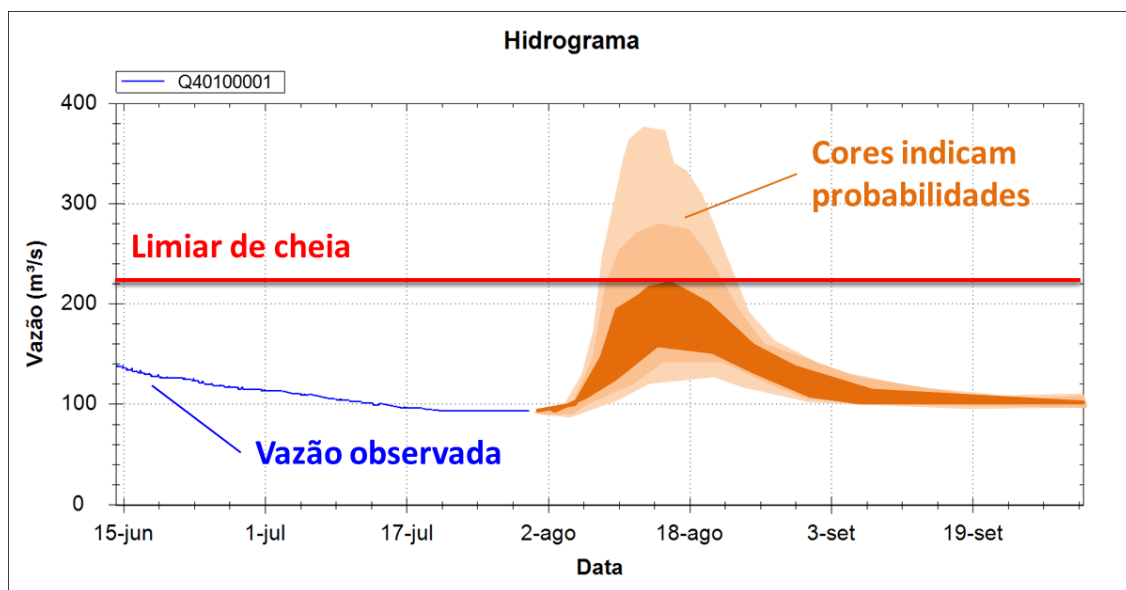
## ANEXO A – OUTRAS FORMAS DE APRESENTAÇÃO DE PREVISÕES POR ENSEMBLE

O diagrama de espaguete é uma forma muito comum de apresentar resultados e possui a vantagem de permitir que os usuários visualizem todos os membros da previsão e a partir desta inspeção tomem suas próprias conclusões sobre eventos mais prováveis e distribuição das incertezas.

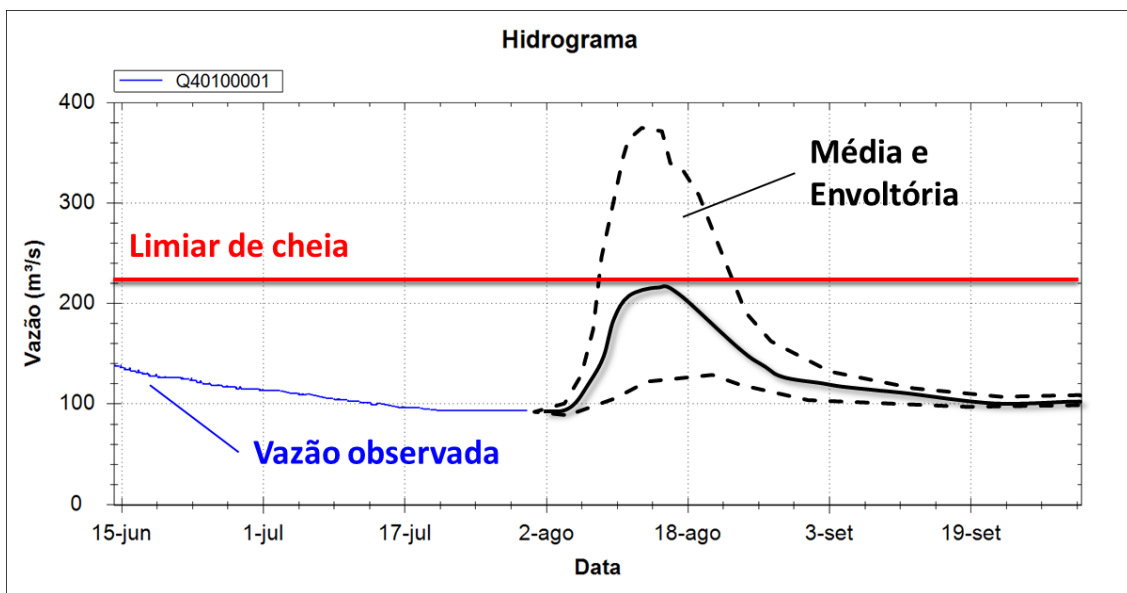
Contudo, ele também possui algumas desvantagens, como a dificuldade de interpretação de resultados quando o número de membros é muito elevado, ou o tempo necessário para uma análise mais detalhada do comportamento dos membros.

Assim, também são comuns na apresentação de resultados de previsões hidrológicas por conjunto outras variadas formas de gráficos, como o uso de percentis das trajetórias previstas, o uso de escalas de cores para indicar probabilidades, ou a apresentação de uma medida de tendência central acompanhada das envoltórias superior e inferior do conjunto.

Na Figura 1 é apresentado um exemplo esquemático de como seria a apresentação de uma previsão com cores indicando probabilidades, dadas pela maior concentração de membros. E na Figura 2 é apresentado um exemplo esquemático de como seria uma previsão que mostra a média e a envoltória do conjunto.

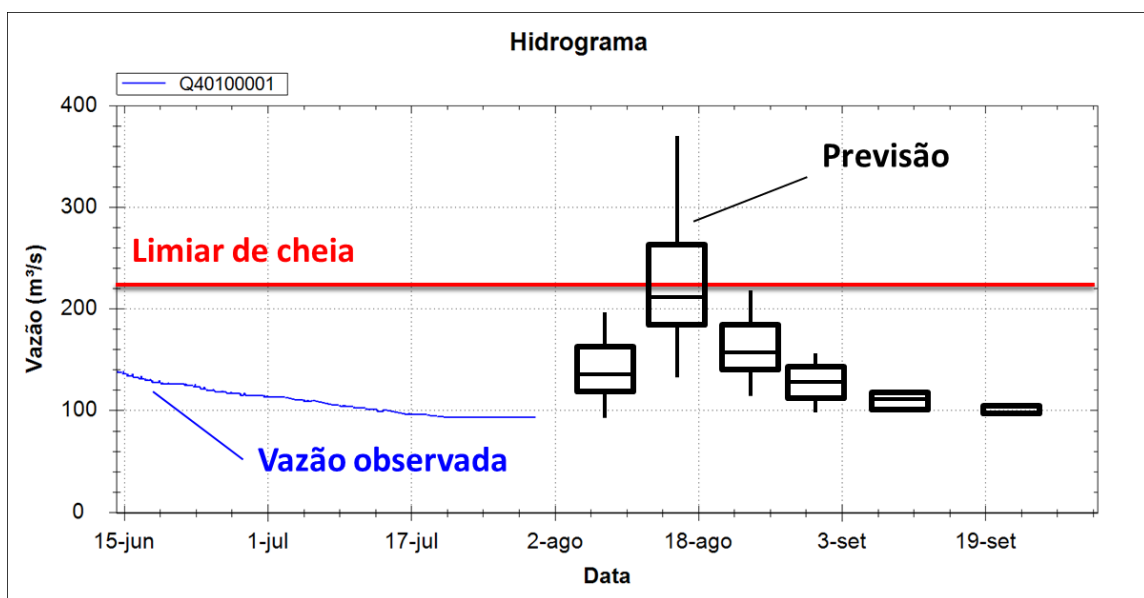


**Figura 1. Exemplo esquemático de como seria a apresentação de uma previsão com cores indicando probabilidades, onde cores mais escuras simbolizam a trajetória mais provável.**



**Figura 2. Exemplo esquemático de uma previsão que mostra a média e a envoltória do conjunto.**

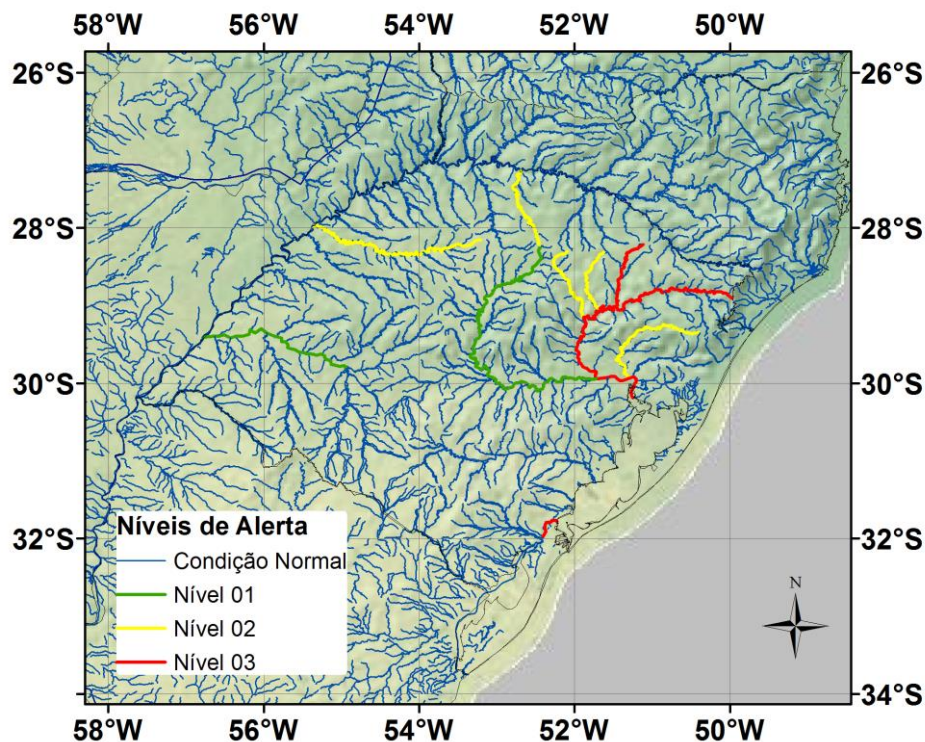
Outra maneira de apresentar previsões por conjunto é através da utilização de diagramas de “caixa e bigodes”, como o exemplo apresentado na Figura 3. Neste tipo de diagrama geralmente os limites da “caixa” são dados pelos quartis 25% e 75% dos membros da previsão, a linha no centro corresponde à mediana (percentil 50%) dos membros, e os “bigodes”, que são as linhas fora da caixa, representam os valores máximos e mínimos (envoltória da previsão).



**Figura 3. Exemplo esquemático de um diagrama de “caixa e bigodes”.**

Para apresentar espacialmente os resultados de uma previsão por conjunto para múltiplos rios de uma bacia hidrográfica, por exemplo, pode-se adotar o uso de mapas que indiquem a probabilidade de excedência de limiares. Neste tipo de mapa, cada trecho de rio é apresentado com uma cor que representa a probabilidade que, ao longo do horizonte da previsão mais recente, ocorra uma vazão superior a um limite determinado. Este mapa permite avaliar em um grande contexto, de forma rápida, as regiões que possivelmente serão afetadas por cheias (Ramos et al., 2007; Meller, 2012).

Na Figura 4 é apresentado um mapa hipotético de probabilidade de excedência de limiar onde a cor azul representa que nenhum membro do conjunto supera o limiar; a cor verde que 10% dos membros do conjunto superam o limiar, a cor amarela que 40% dos membros do conjunto superam o limiar e a cor vermelha que 70% dos membros do conjunto superam o limiar.



**Figura 4. Exemplo hipotético de um mapa de probabilidade de excedência de limiar de inundação para a região hidrográfica do estado do Rio Grande do Sul, no Brasil.**

Outra forma de apresentar resultados de previsões por ensemble, especialmente quando o interesse do uso das previsões é a verificação da excedência de limiares de cheia, é através de um diagrama de excedência.

O diagrama de excedência, também chamado de diagrama de persistência, consiste em uma matriz onde uma sequência de previsões é apresentada nas linhas, e os respectivos horizontes de previsão são apresentados nas colunas. No caso de previsões por ensemble a informação de cada uma das células da matriz do diagrama contém o número de membros que ultrapassa o limiar adotado, ou a probabilidade de excedência do limiar calculado assumindo que todos os membros são equiprováveis.

Cores também são normalmente utilizadas para destacar a excedência, com uma escala, por exemplo, que vai de verde (menor probabilidade de excedência), amarela (probabilidade intermediária de excedência), até vermelha (alta probabilidade de excedência).

A Figura 5 apresenta um exemplo de diagrama de excedência onde os números dentro das células indicam a porcentagem de membros que excedem o limiar de cheia definido. As cores também indicam a porcentagem e excedência.

		Horizontes de Previsão																										
		23/01/2013	24/01/2013	25/01/2013	26/01/2013	27/01/2013	28/01/2013	29/01/2013	30/01/2013	31/01/2013	01/02/2013	02/02/2013	03/02/2013	04/02/2013	05/02/2013	06/02/2013	07/02/2013	08/02/2013	09/02/2013	10/02/2013	11/02/2013	12/02/2013	13/02/2013	14/02/2013	15/02/2013	16/02/2013	17/02/2013	18/02/2013
Previsão	23/01/2013	0	0	0	55	73	100	100	9.1	9.1	9.1	0	0	0	0	0	0											
	24/01/2013		0	18	100	100	100	100	9.1	27	9.1	0	0	0	0	0	0	0										
	25/01/2013			0	91	100	100	100	36	36	18	0	0	0	0	0	0	0	0									
	26/01/2013				100	100	100	100	9.1	45	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
	27/01/2013					100	100	100	0	73	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
	28/01/2013						100	100	0	91	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
	29/01/2013							100	0	100	100	27	9.1	9.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	30/01/2013								0	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	31/01/2013										100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	01/02/2013											100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	02/02/2013												100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	03/02/2013													100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 5. Exemplo de diagrama de excedência.**

O diagrama de excedência é utilizado operacionalmente no EFAS (European Flood Alert System), e pode ser encontrado nos trabalhos de Younis et al. (2008) e Thielen et al. (2009).

Ele é muito útil na previsão de vazões por que auxilia o entendimento da persistência das previsões e assim apoia a tomada de decisão. Além disso, para algum evento de interesse ocorrido no passado, é possível plotar o diagrama de excedência das

previsões em comparação com o diagrama de excedência observado e verificar como foi o comportamento do sistema de previsão para o evento.

Da mesma forma, também é possível computar um diagrama de excedência para previsões determinísticas (probabilidades serão sempre 0% ou 100%), e comparar o desempenho entre previsões determinísticas e previsões probabilísticas para dados eventos.

Assim, o diagrama de excedência também é considerado uma forma de avaliação de um sistema de previsão, especialmente para eventos específicos.

## ANEXO B

# DETALHAMENTO DAS MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES



## ANEXO B – DETALHAMENTO DAS MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES

### **Erro Médio Absoluto (EMA)**

O Erro Médio Absoluto-EMA mede a diferença absoluta entre previsões e observações correspondentes para cada um dos horizontes de previsão.

No caso de previsões de vazão por ensemble, o conjunto de previsões deve ser resumido em uma única previsão determinística, onde comumente é utilizada a média aritmética do conjunto. Mas podem ser usadas outras medidas de tendência central como moda e mediana.

Quanto mais próximo o valor de EMA estiver de zero, melhores são os resultados das previsões, pois menores são as diferenças entre previsões e observações. A Equação 1 apresenta a formulação matemática do EMA.

$$EMA_h = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Q_{p_{h,n}} - Q_{o_{h,n}}| \quad (1)$$

em que  $N$  é o número total de previsões;  $n$  é uma dada previsão avaliada;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $Q_{p_{h,n}}$  é o valor previsto da vazão na previsão  $n$  com horizonte  $h$ ;  $Q_{o_{h,n}}$  é o valor observado da vazão correspondente a previsão  $n$  com horizonte  $h$ ; e  $EMA_h$  é o erro médio absoluto do horizonte  $h$ . A equação deve ser aplicada para cada um dos horizontes de previsão.

O resultado típico de uma análise de EMA para um sistema de previsão consiste em um gráfico que mostra o valor do erro para cada um dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado na Figura 1. Com ele é possível, então, fazer inferências sobre a magnitude dos erros e sobre o desempenho do modelo em diferentes horizontes de previsão.

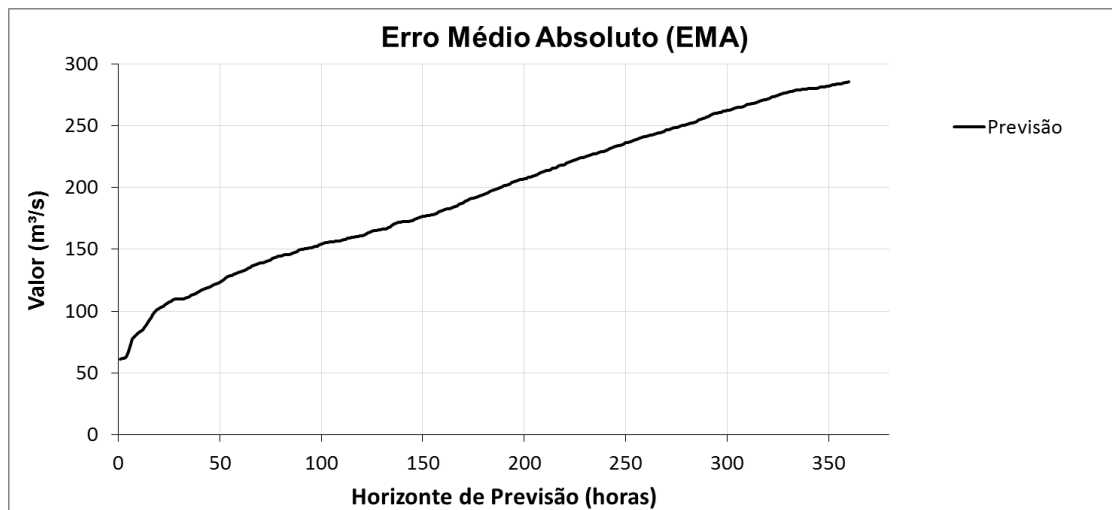


Figura 1. Exemplo do resultado típico de uma análise de EMA.

## Erro Médio Relativo (EMR)

O Erro Médio Relativo-EMR mede a diferença média entre previsões e observações correspondentes para cada um dos horizontes de previsão, dividida pelo valor da vazão observada.

As suas diferenças em relação ao EMA são que no cálculo do EMR não é utilizado o módulo das diferenças, e que os valores da métrica são sempre em função da vazão observada. Ou seja, erros positivos e negativos podem acabar se compensando no cálculo e os resultados na verdade representam uma proporção do erro em função da observação.

Apesar da desvantagem de os erros com diferentes sinais se compensarem, o benefício na utilização do EMR é que ele permite computar um viés geral das previsões, uma vez que se verifica se o erro é majoritariamente positivo ou negativo nos resultados.

No caso de previsões de vazão por ensemble, para calcular o EMR o conjunto de previsões também deve ser sumarizado em uma única previsão determinística, como a média.

Quanto mais próximos os valores de EMR estiverem de zero, melhores são considerados os resultados das previsões, pois menores são as diferenças entre previsões e observações. Valores positivos ou negativos correspondem aos diferentes erros nas previsões. A Equação 2 apresenta a formulação matemática do EMR.

$$EMR_h = \frac{\sum_{n=1}^N (Q_{p_{h,n}} - Q_{o_{h,n}})}{\sum_{n=1}^N (Q_{o_{h,n}})} \quad (2)$$

em que  $N$  é o número total de previsões;  $n$  é uma dada previsão avaliada;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $Q_{p_{h,n}}$  é o valor previsto da vazão na previsão  $n$  com horizonte  $h$ ;  $Q_{o_{h,n}}$  é o valor observado da vazão correspondente a previsão  $n$  com horizonte  $h$ ; e  $EMR_h$  é o erro médio relativo do horizonte  $h$ . A equação deve ser aplicada para cada um dos horizontes de previsão.

O resultado típico de uma análise de EMR para um sistema de previsão consiste em um gráfico que mostra o valor do erro para cada um dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado na Figura 2. Neste caso, a previsão avaliada tem um viés positivo, pois os erros são todos maiores que zero.

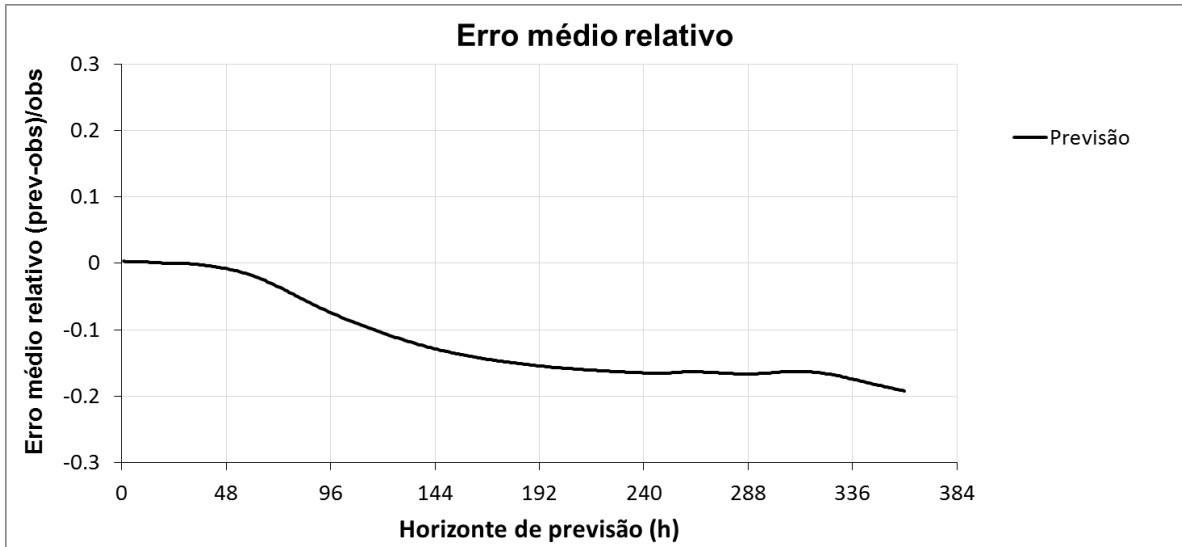


Figura 2. Exemplo do resultado típico de uma análise de EMR.

## Coeficiente de Correlação (r)

O coeficiente de correlação (r) mede o grau de associação linear ente os valores observados e os valores previstos. Estes resultados são úteis para verificar se problemas como se períodos chuvosos deslocados ou invertidos não estão afetando os resultados.

No caso de previsões de vazão por ensemble, também é necessário sumarizar o conjunto em uma única previsão determinística para calcular o coeficiente de correlação.

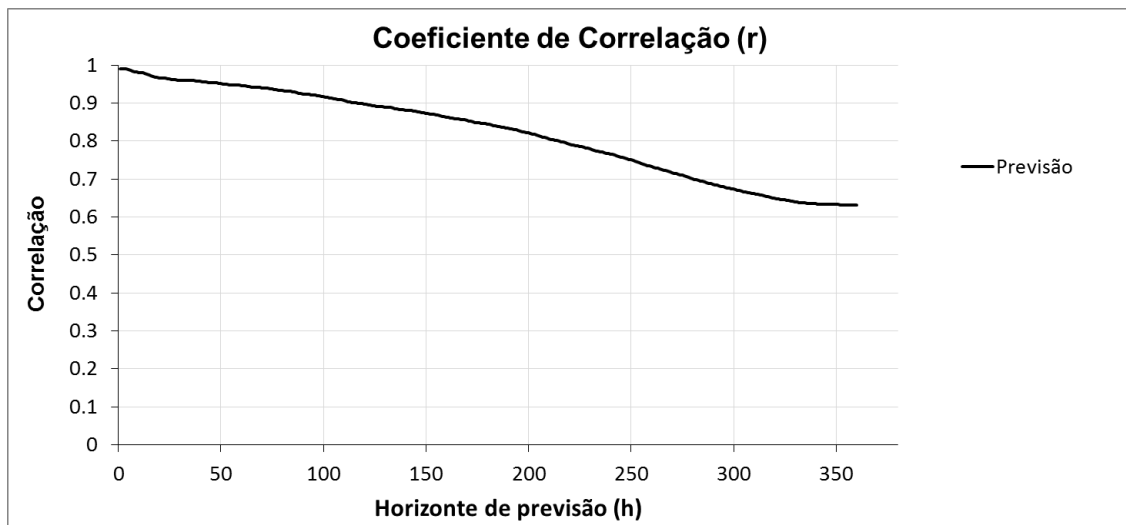
O valor de r para uma perfeita associação linear é um. Zero indica que não existe associação linear e valores negativos indicam que existe uma associação linear inversamente proporcional. A Equação 3 apresenta a fórmula matemática do coeficiente de correlação.

$$r_h = \frac{\sum_{n=1}^N (Q_{p_{h,n}} - \overline{Q_{p_h}})(Q_{o_{h,n}} - \overline{Q_{o_h}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (Q_{p_{h,n}} - \overline{Q_{p_h}})^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^N (Q_{o_{h,n}} - \overline{Q_{o_h}})^2}} \quad (3)$$

em que  $N$  é o número total de previsões;  $n$  é uma dada previsão avaliada;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $Q_{p_{h,n}}$  é o valor previsto da vazão na previsão  $n$  com horizonte  $h$ ;  $Q_{o_{h,n}}$  é o valor observado da vazão correspondente a previsão  $n$  com horizonte  $h$ ; e  $r_h$  é

o coeficiente de correlação do horizonte  $h$ . A equação deve ser aplicada para cada um dos horizontes de previsão.

O resultado de uma análise de correlação para um sistema de previsão consiste em um gráfico que mostra o valor do coeficiente de correlação para cada um dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado na Figura 3. Com ele é possível verificar desempenho do modelo em diferentes horizontes de previsão em termos de associação linear dos resultados com as observações.



**Figura 3. Exemplo do resultado típico de uma análise de correlação.**

## **Brier Score (BS)**

O Brier Score (BS) é a primeira métrica dentre as utilizadas que considera a distribuição das previsões por conjunto. Também, é a primeira métrica apresentada para a avaliação de eventos discretos.

O BS mede o erro médio quadrático da probabilidade de uma previsão para a ocorrência de um evento discreto, como a excedência de um limiar de vazão que define uma cheia.

O BS é calculado computando a probabilidade em que o evento é previsto e a sua diferença entre e a real ocorrência, esta última dada por um código binário zero (quando o evento não ocorre) e um (quando o evento ocorre). As unidades de erro são dadas em probabilidades.

No caso de previsões por conjunto, a probabilidade de ocorrência do evento discreto é normalmente calculada considerando que todos os membros do conjunto são

equiprováveis, e então se verifica qual é a percentagem destes que indica a ultrapassagem do limiar de cheia, por exemplo.

Já no caso de previsões determinísticas as probabilidades utilizadas são sempre 100% ou 0%, já que a previsão determinística só indica um futuro possível: ocorrência ou não ocorrência.

Uma previsão perfeita que sempre acerta a ocorrência ou a não ocorrência do limiar definido sempre terá um BS igual à zero. A fórmula matemática para o BS é apresentada na Equação 4:

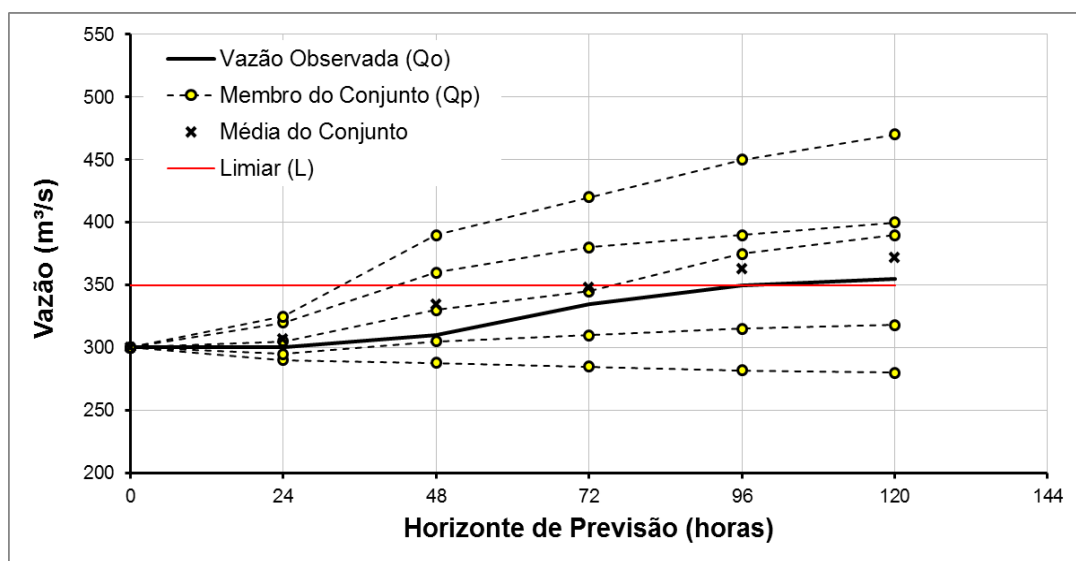
$$BS_h(L) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (F_{Qp_{h,n}}(L) - 1(L \geq Qo_{h,n}))^2 \quad (4)$$

em que  $N$  é o número total de previsões emitidas (não é o número de membros no conjunto, mas sim o número de previsões emitidas avaliadas);  $n$  é uma dada previsão avaliada. Dentro de  $n$  podem estar incluídas várias previsões por ensemble;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $L$  é um dado limiar de ocorrência de uma cheia sendo analisado;  $F_{Qp_{h,n}}$  é a probabilidade de excedência da cheia calculado através da previsão ou do conjunto de previsões (no caso de previsões por ensemble) com horizonte  $h$ ;  $Qo_{h,n}$  é o valor observado da vazão correspondente a previsão emitida  $n$  com horizonte  $h$ ;  $1()$  é uma função que tem valor 1 quando o evento determinado internamente ocorre, e zero quando o evento não ocorre; e  $BS_h(L)$  é o Brier Score calculado para o horizonte  $h$ . A equação deve ser aplicada para cada um dos horizontes de previsão.

Para entender melhor como calcular o BS, podemos considerar o exemplo de uma previsão dada pela Tabela 1 e Figura 4. É mostrada uma única previsão de vazão ( $n$ ) por conjunto, com 5 membros, onde cada membro da previsão ( $Qp$ ) é apresentado na figura com linhas pontilhadas e marcadores amarelos. A média do conjunto é também mostrada, com marcadores em formato de “x”. Já a vazão observada ( $Qo$ ) é apresentada com uma linha contínua preta, e o limiar ( $L$ ) que determina a ocorrência de uma cheia neste local é mostrado como uma linha vermelha.

**Tabela 1. Dados da previsão por conjunto exemplo apresentada na Figura 4.**

	Exemplo de previsão por conjunto (vazões em m <sup>3</sup> /s)					
<b>Tempo (horas)</b>	0	24	48	72	96	120
<b>Observação (Qo)</b>	300	300	310	335	350	355
<b>Membro 01 (Qp)</b>	300	290	288	285	282	280
<b>Membro 02 (Qp)</b>	300	295	305	310	315	318
<b>Membro 03 (Qp)</b>	300	305	330	345	375	390
<b>Membro 04 (Qp)</b>	300	320	360	380	390	400
<b>Membro 05 (Qp)</b>	300	325	390	420	450	470
<b>Média do Cojnto</b>	300	307	335	348	362	372
<b>Limiar (L)</b>	350	350	350	350	350	350



**Figura 4. Exemplo simplificado de uma previsão ( $n=1$ ) por conjunto, com 5 membros, antecedência de 120h e com 5 horizontes de previsão ( $h=5$ ).**

A previsão do exemplo é bem simplificada, ela é emitida no intervalo de tempo 0 (zero) e possui antecedência de 120h. Ao total, ela possui 5 horizontes de previsão ( $h=5$ ), com resultados a cada 24 horas. O espalhamento do conjunto aumenta com o horizonte de previsão, representando o aumento da incerteza com o tempo.

Utilizando o horizonte de previsão de 96h desta previsão para exemplificar o cálculo do BS, primeiro determinamos o número de membros que é igual ou maior que o limiar de cheia (nesse caso três, ou 0,6 dos membros). Depois, verificamos se a observação é maior ou igual ao limiar. Nesse caso a observação é igual ao limiar, então a probabilidade de ocorrência segundo a observação tem valor de 1.

Finalmente, para obter o valor de BS para esta previsão, neste horizonte, calculamos a diferença entre 0,6 e 1 (resultando em 0,4), e elevamos este resultado ao

quadrado. O resultado final é 0,16. Ou seja, o BS da previsão por conjunto para esta previsão, neste horizonte, é 0,16.

Para uma análise de várias sequências de previsões (N previsões) este mesmo procedimento é executado repetidas vezes, e a média dos valores de BS calculados é o resultado final. Isto é feito para todos os horizontes de forma que os resultados finais de BS são computados para cada horizonte.

O resultado de uma análise de *Brier Score* para um sistema de previsão consiste em um gráfico que mostra o valor de BS para cada um dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado na Figura 5.

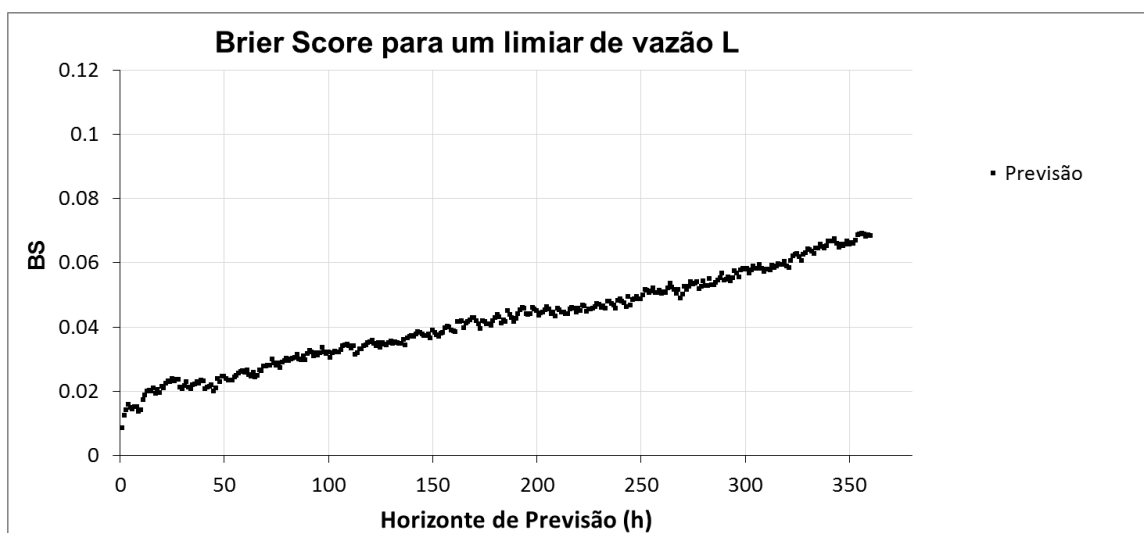


Figura 5. Exemplo do resultado típico de uma análise de BS.



## Mean Continuous Ranked Probability Score (CRPS médio)

O chamado *Continuous Ranked Probability Score* (CRPS) é uma estatística que resume a qualidade de uma previsão probabilística contínua em um único número, através da comparação da integral dos quadrados das diferenças entre a função de probabilidades acumuladas das previsões e respectivas observações.

O valor médio de CRPS entre todos os pares de observação-previsão leva ao valor médio de CRPS, onde valores mais baixos correspondem a melhores resultados. Matematicamente, o valor do CRPS é dado pela Equação 5:

$$CRPS_{h,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_p(Qp_{h,n}) - F_0(Qp_{h,n})]^2 dQp_{h,n} \quad (5)$$

em que  $F_p$  é o valor da função de probabilidades acumuladas da previsão,  $F_0$  é o valor da função de probabilidades acumuladas da observação dada por uma função que assume probabilidade igual a um para valores de  $Qp_{h,n}$  maiores ou iguais à observação, e zero para valores de  $Qp_{h,n}$  menores que os valores observados. Na prática o valor do CRPS é calculado como uma média através dos  $N$  pares de previsões e observações, que levam ao valor utilizado de CRPS médio. Esta média é dada pela Equação 6:

$$\overline{CRPS}_h = 1/n \sum_{n=1}^N CRPS_{h,n} \quad (6)$$

O valor numérico do CRPS médio não é diretamente interpretável em termos de erro na previsão por si só, mas pode ser utilizado para fins comparativos entre duas previsões por conjunto ou entre previsões por conjunto e determinísticas. Este último caso se deve a uma propriedade muito interessante do CRPS médio, que é o fato dos seus valores serem exatamente iguais ao Erro Médio Absoluto (EMA) para previsões determinísticas.

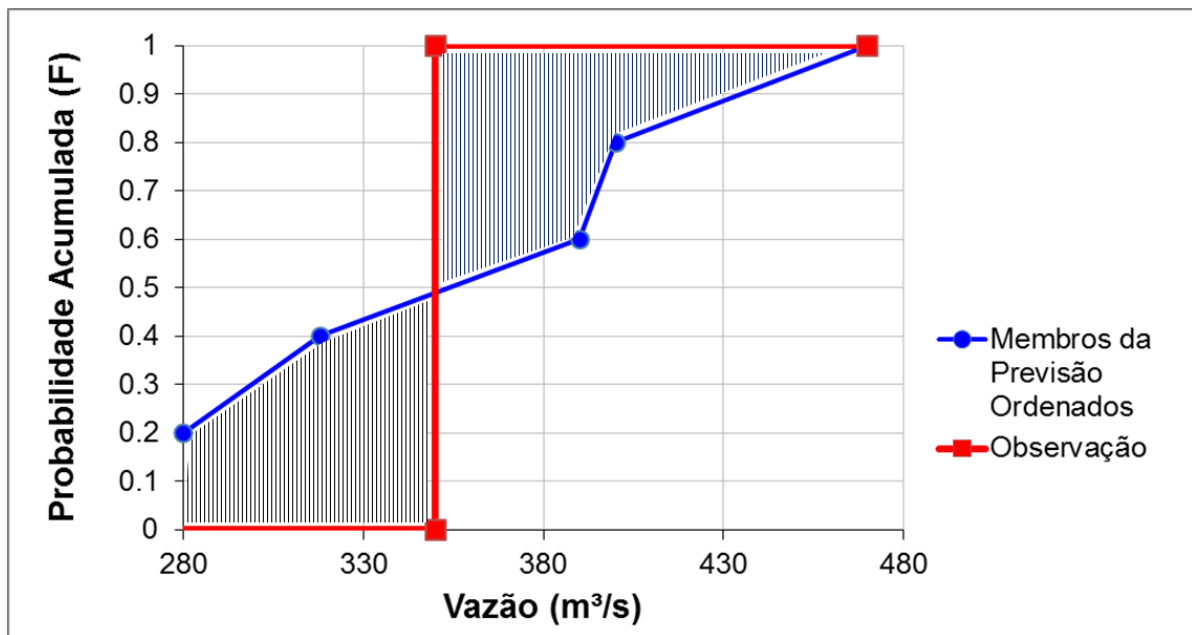
Isto acontece por que a função acumulada de probabilidades de uma previsão determinística é sempre igual a 1 (ocorrência de um único valor de vazão).

Para entender melhor como calcular o CRPS, podemos considerar o mesmo exemplo utilizado na introdução ao BS, de uma previsão por conjunto simples dada pela Tabela 1 e Figura 4.

Para calcular o CRPS do horizonte 120h desta previsão, por exemplo, o que precisamos fazer primeiro é obter a sua função de probabilidade acumulada. Isto é feito empiricamente pegando os valores de cada um dos membros e ordenando eles de forma

crecente. Considerando todos os membros como equiprováveis é possível computar a probabilidade de cada valor ser igualado ou superado.

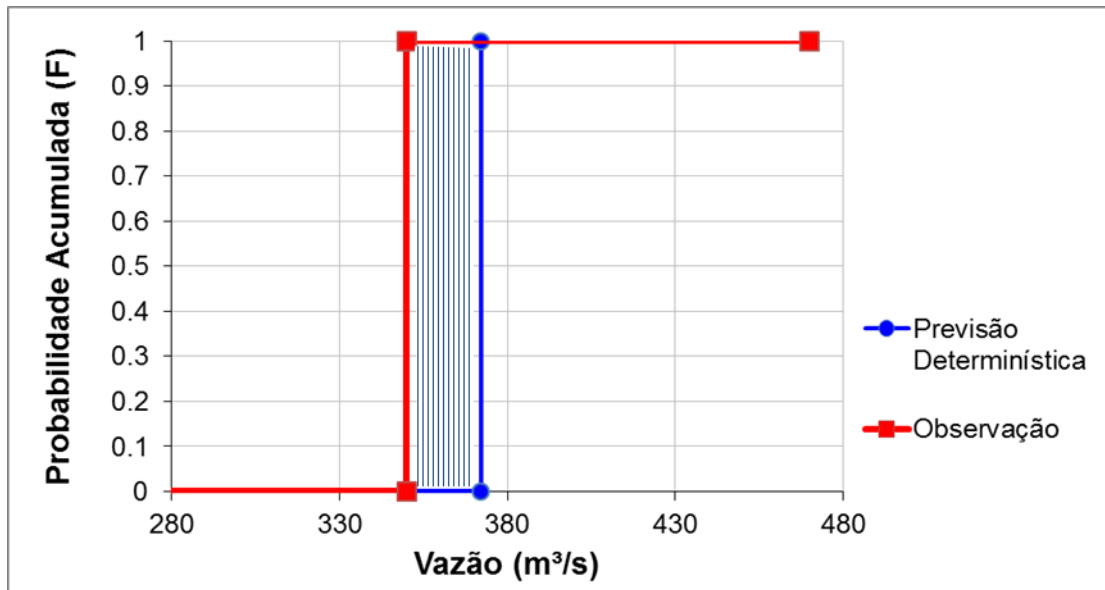
Comparando a diferença entre esta curva de probabilidades acumuladas da previsão por com a curva de probabilidades acumuladas da observação, que só possui um valor único horizontal, é possível calcular o CRPS. Esta comparação é mostrada na Figura 6 em um gráfico onde no eixo das ordenadas estão as probabilidades e no eixo das abcissas os valores das vazões, para o horizonte 120 da previsão exemplo.



**Figura 6. Comparação entre a curva de probabilidades acumuladas da previsão por conjunto com a curva de probabilidades acumuladas da observação, que só possui um valor único horizontal.**

É importante notar que o CRPS não é exatamente a área entre as duas curvas, por que o termo de diferença entre as probabilidades (diferença vertical entre os gráficos) é elevado ao quadrado.

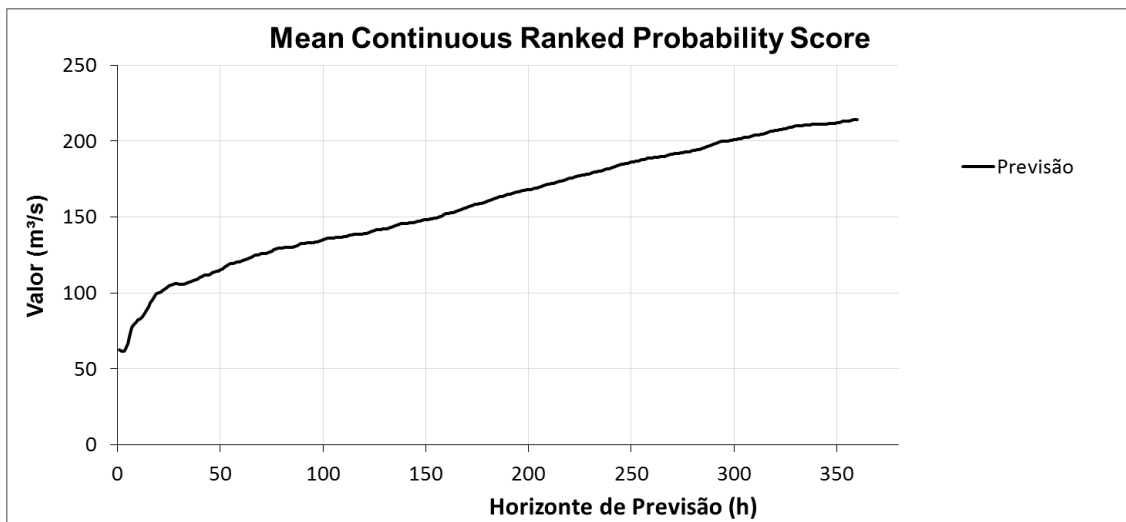
Também, através de um gráfico que mostre a função acumulada de probabilidades de uma previsão determinística fica mais fácil entender por que o CRPS desta é equivalente ao EMA. Isto é mostrado na Figura 7, onde é apresentado o resultado que seria obtido com o uso da média da previsão por conjunto do exemplo.



**Figura 7. Comparação entre a curva de probabilidades acumuladas da média da previsão por conjunto com a curva de probabilidades acumuladas da observação.**

No caso da Figura 7, como as duas probabilidades acumuladas são 1, a diferença entre as funções do par previsão/observação também é sempre 1, que elevado ao quadrado permanece com o mesmo valor. E no caso de os valores de vazão serem perfeitamente coincidentes a diferença será zero, que corresponde a uma previsão perfeita.

Assim como todas as demais métricas apresentadas até o momento, o resultado de uma análise de CRPS médio para um sistema de previsão consiste em um gráfico que mostra o valor do erro em função dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado no exemplo da Figura 8.



**Figura 8. Exemplo do resultado típico de uma análise de CRPS médio.**

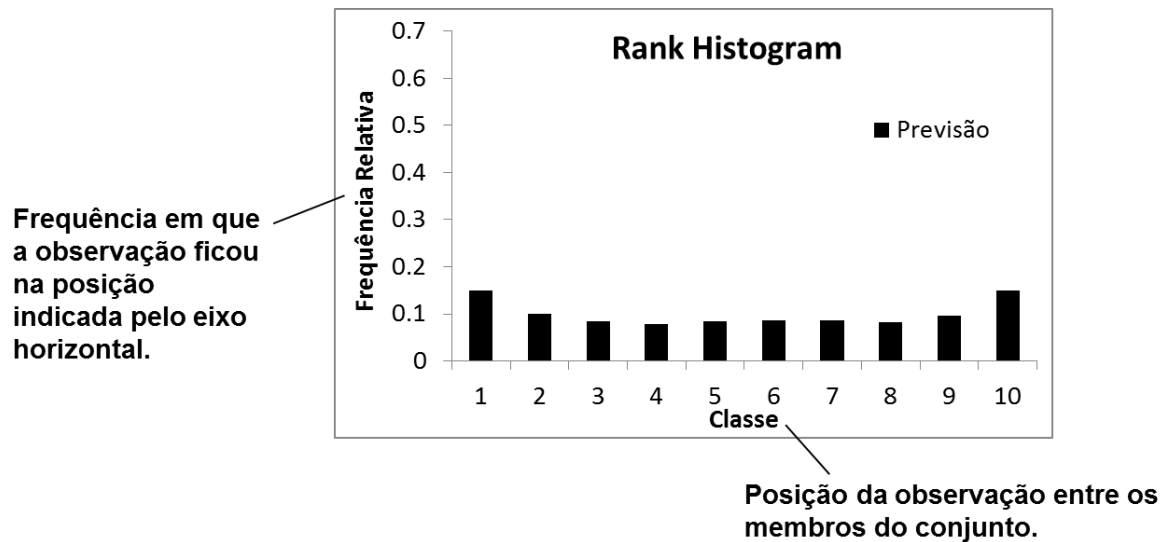
## Rank Histogram

O *Rank Histogram*, também conhecido como *Talagrand Histogram*, é uma medida simples, porém muito útil, do espalhamento de previsões por conjunto. Ele consiste em uma contagem do percentual de casos em que os valores observados ficaram posicionados entre os membros da previsão por conjunto, em todas as  $N$  previsões realizadas. Ele é computado para cada um dos horizontes de previsão.

Cada posição entre os membros do conjunto é denominada de uma classe (ou *bin*), e o número de classes é sempre igual ao número de membros da previsão por conjunto mais um. Contudo, quando o número de membros, e conseqüentemente de classes, é muito grande, não é incomum que os resultados sejam agrupados para serem apresentados em um menor número de classes.

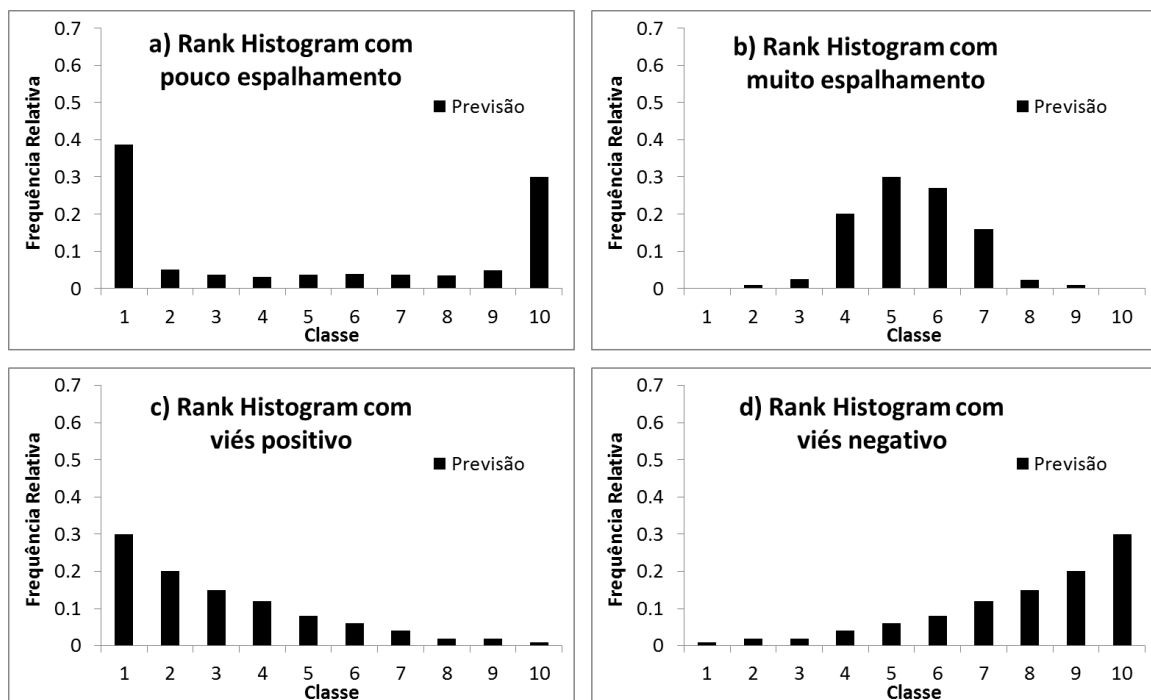
Ao final, o diagrama resultante dá uma medida do espalhamento da previsão por conjunto no horizonte de previsão avaliado, uma vez que ele indica quais são as posições onde a observação mais se enquadrou no período analisado.

A Figura 9 apresenta um exemplo de Rank Histogram de uma previsão por conjunto.



**Figura 9. Exemplo de Rank Histogram de uma previsão por conjunto.**

O formato do histograma pode dizer muito sobre o espalhamento de previsões por conjunto. Na Figura 10 são apresentadas quatro formas comuns de um *Rank Histogram*, discutidas a seguir.



**Figura 10. Quatro formas comuns de um *Rank Histogram*,**

Em teoria, uma previsão com espalhamento perfeito produz um histograma plano, com a ocorrência da mesma frequência relativa de observações em todas as classes. Este seria o caso do histograma na Figura 10.

Altas frequências em ambas as caudas do histograma (formado de “U”) são um indicativo de falta de espalhamento, por que simbolizam que a observação ocorreu muitas vezes acima e muitas vezes abaixo dos membros da previsão. Este seria o caso do histograma apresentado na Figura 10a.

Um histograma com formato de “triângulo” (também chamado de “U invertido”) simboliza um possível excesso de espalhamento nas previsões, uma vez que existe a tendência da observação em se concentrar sempre na região central dos membros do conjunto. Este seria o caso do histograma apresentado na Figura 10b.

Outros formatos, como “L” e “L invertido” (Figura 10c. e Figura 10d), são indicativos de viés positivo (molhado) e negativo (seco), respectivamente, nas previsões de vazão por conjunto. O viés positivo seria indicado pelo fato das observações serem verificadas com muita frequência abaixo da maioria dos membros do conjunto. Já o viés negativo é indicado pelo fato das observações se concentrarem sempre acima das previsões.

Outros formatos no *Rank Histogram* podem acontecer, e neste caso eles representam outros tipos de desvios particulares nas previsões.

## **Diagrama ROC (Relative Operating Characteristic)**

O diagrama ROC (*Relative Operating Characteristic*) também mede a qualidade de uma previsão para a ocorrência de um evento discreto, como a excedência de um limiar de uma cheia. Ela é uma medida baseada na tabela de contingência com as quatro opções possíveis de previsão e ocorrência do evento, conforme mostrado na Figura 11.

		Observado?	
		sim	não
Previsto?	sim	a	b
	não	c	d

**Figura 11. Exemplo de tabela de contingência para um evento discreto.**

Para montar o diagrama ROC é aplicada uma verificação desta tabela de contingência para cada um dos horizontes de previsão, de cada uma das previsões realizadas. Neste caso, para cada um dos intervalos de tempo analisado verifica-se em qual dos quadrantes **a**, **b**, **c**, ou **d** da tabela de contingência a previsão se enquadrou.

Por exemplo, se considerarmos a previsão exemplo da Tabela 1 e Figura 4, no horizonte de previsão de 96h, a média do conjunto previu a ocorrência de uma cheia acima do limiar definido, e esta cheia efetivamente ocorreu (a observação foi maior ou igual que o limiar), então este horizonte de tempo, desta previsão, se enquadra no quadrante **a** da tabela de contingência. Esta mesma verificação é realizada para todos os demais horizontes de previsão, e todas as demais previsões utilizadas na análise de desempenho do sistema.

Após este procedimento, para cada um dos horizontes de previsão são calculados dois índices: o POD (*Probability of Detection*) e o POFD (*Probability of False Detection*).

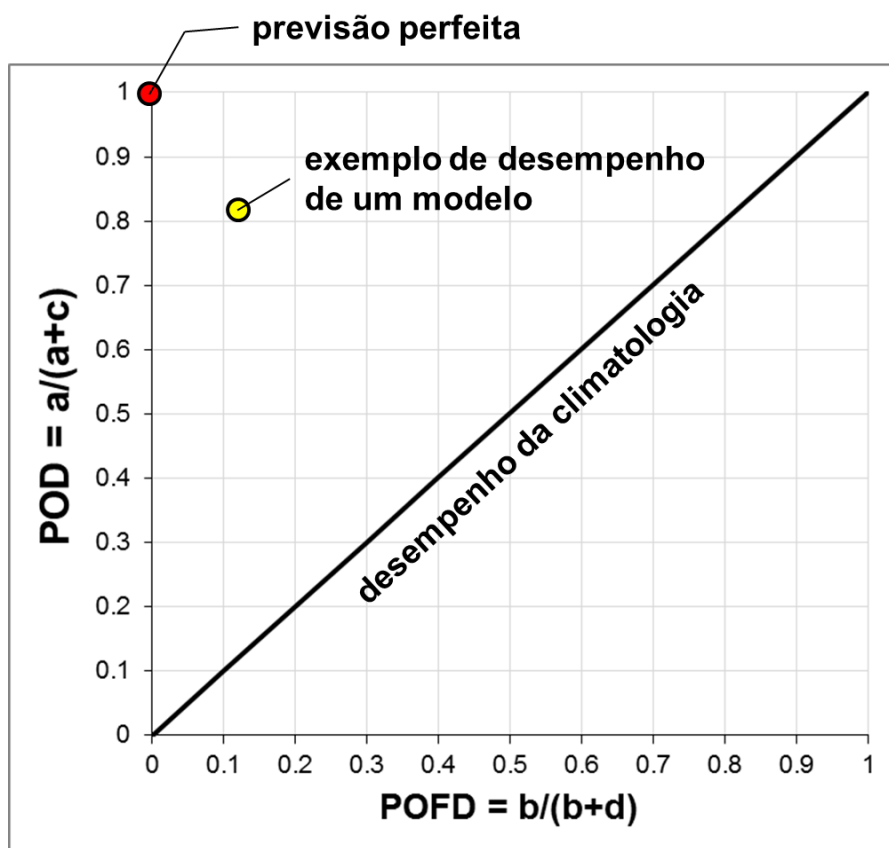
O POD consiste na chamada probabilidade de detecção, e ele responde a seguinte pergunta: qual é a fração do número total de ocorrências do evento que foram corretamente previstas? Ou seja, ele é definido pela percentagem de vezes em que o sistema de previsão efetivamente acertou a previsão de ocorrência do limiar em função do número de vezes que o limiar foi excedido nas observações. Considerando a tabela de contingência, sua formulação é dada por  $POD = a/(a+c)$ .

Já o POFD consiste na chamada probabilidade de falsa detecção, e ele responde a seguinte pergunta: qual a fração de não ocorrências do evento que foram previstas como ocorrência do limiar pelo modelo? Ou Qual a fração de vezes que o modelo emitiu um falso alarme? Ou seja, ele é definido pela porcentagem de vezes em que o sistema de previsão efetivamente errou a previsão de não ocorrência do limiar, dizendo que o limiar efetivamente seria excedido quando ele efetivamente não foi. Considerando a tabela de contingência, sua formulação é dada por  $POFD = b/(b+c)$ .

Os valores desejados de POD para um sistema perfeito são iguais a unidade. Ou seja, que o modelo sempre acerte a ocorrência do limiar. Da mesma forma, os valores desejados para POFD são iguais à zero. Ou seja, que o meu modelo nunca emite alarmes falsos.

De posse dos valores médios de POD e POFD para cada um dos horizontes de previsão finalmente é possível finalmente montar um diagrama ROC para cada um dos horizontes de previsão.

O diagrama ROC consiste em um gráfico onde no eixo “x” é plotada a probabilidade de falsa detecção (POFD) e no eixo “y” é plotada a probabilidade de detecção (POD). A Figura 12 apresenta um exemplo hipotético de um diagrama ROC.





**Figura 12. Exemplo hipotético de um diagrama ROC. Esquema adaptado de Meller (2012).**

Com o diagrama ROC é possível acessar qual é o *trade-off* entre a capacidade de um sistema de previsão em detectar a ocorrência de cheias, e a sua quantidade de emissões de falsos alarmes. Nesse caso, o desempenho ideal de um sistema de previsão seria um ponto exatamente sobre o canto superior esquerdo do diagrama, indicando POD igual a unidade e POFD igual à zero.

Este diagrama ROC com apenas um ponto o é computado para previsões determinísticas. Contudo, ele também é utilizado e traz informações interessantes sobre resultados de previsões por conjunto.

Para previsões por conjunto, o diagrama ROC pode ser computado utilizando a média do conjunto, como citado anteriormente. Contudo, mais comum e em geral de maior utilidade é utilizar a distribuição dos membros para a transformação do conjunto em múltiplas previsões determinísticas dadas pelos diferentes percentis do ensemble.

Nesse caso, computa-se, por exemplo, quais são os valores dos 9º, 8º, 7º, ..., 2º, e 1º decis da previsão de vazão por conjunto. Os percentis mais altos correspondem aos valores de vazão mais altos entre os membros do conjunto. O 9º decil, por exemplo, correspondere a vazão que é só é igualada ou superada por 10% dos membros do conjunto naquele horizonte daquela previsão. Já os percentis mais baixos correspondem aos valores de vazão mais baixos entre os membros do conjunto.

Para cada um destes valores de decis calcula-se, então, qual é são os valores de POD e POFD. Isto deve ser feito para cada uma das previsões, para cada uma das antecedências de tempo. Ao final, os valores médios de POD e POFD são computados para cada horizonte de previsão e um diagrama ROC de cada horizonte de previsão pode ser gerado.

A diferença entre o diagrama ROC gerado desta forma para previsões por conjunto e um diagrama de uma previsão determinística é que o diagrama da previsão por conjunto resulta efetivamente em uma curva, já que ele possui vários pontos (um ponto para cada percentil utilizado).

É comum ainda conectar a curva gerada com os eixos  $POD, POFD=1,1$  e  $POD, POFD=0,0$  do diagrama. Isto simboliza que se optarmos por sempre anunciar a ocorrência de um evento nossa taxa de alarmes verdadeiros sempre será 100%, mas em compensação a taxa de alarmes falsos também será extrema. A mesma lógica é válida se

optarmos por nunca anunciarmos a ocorrência de eventos, a taxa de alarmes falsos será baixíssima, mas a de alarmes verdadeiros também.

A Figura 13 apresenta um exemplo hipotético de um diagrama ROC para uma previsão de vazão por conjunto. Este diagrama é adaptado de Meller (2012).

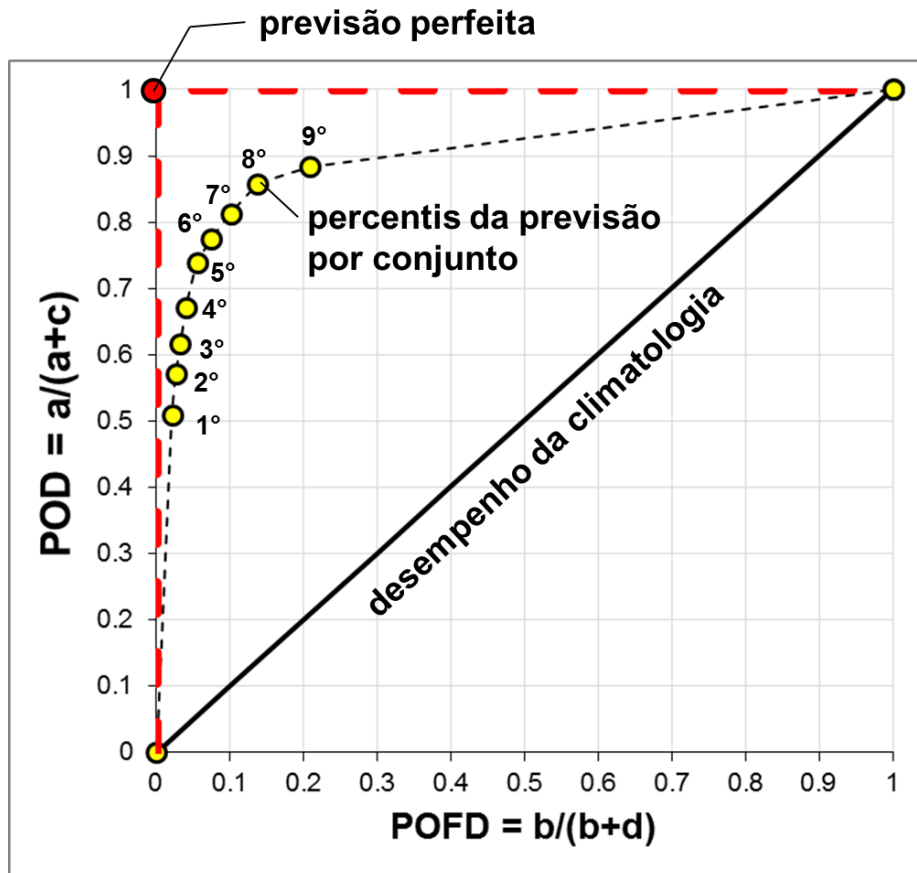


Figura 13. Exemplo hipotético de um diagrama ROC para uma previsão de vazão por conjunto. Diagrama esquemático adaptado de Meller (2012).

Uma característica interessante do diagrama ROC para previsões por conjunto é que ele permite uma compreensão do benefício do uso de diferentes partes da previsão por conjunto. Como no caso mostrado na Figura 13, geralmente o uso dos limites superiores da previsão por conjunto permite uma maior POD, contudo eles também aumentam o número de ocorrências de falsos alarmes (por vezes denominados de “crying wolfs”).

O inverso também é verdadeiro, com o uso de percentis pequenos esperam-se menos falsos alarmes, contudo também se esperam menos detecções do limiar.

E assim, a partir destes resultados do diagrama, usuários de previsões de vazão por conjunto podem definir qual seria o percentil ideal da previsão a ser utilizado na tomada de decisão, em função de sua aversão ao risco e dos erros aceitáveis.

Da mesma forma, diferentes previsões determinísticas e por ensemble podem ser comparadas em termos de diagrama ROC para verificação de qual teria mais benefícios na antecipação de eventos, e se as estatísticas calculadas estão de acordo com o desempenho esperado.

Finalmente, as formulações matemáticas formais para o cálculo do POD e POFD são dadas a seguir:

$$POD_h(L, p_L) = \frac{\sum_{n=1}^N \mathbb{1}\{1 - P_{Qp_{h,n}}(L) > p_L | Q_{O_{h,n}} > L\}}{\sum_{n=1}^N \mathbb{1}\{Q_{O_{h,n}} > L\}} \quad (7)$$

$$POFD_h(L, p_L) = \frac{\sum_{n=1}^N \mathbb{1}\{1 - P_{Qp_{h,n}}(L) > p_L | Q_{O_{h,n}} \leq L\}}{\sum_{n=1}^N \mathbb{1}\{Q_{O_{h,n}} \leq L\}} \quad (8)$$

em que  $N$  é o número total de previsões emitidas (não é o número de membros no conjunto, mas sim o número de previsões emitidas avaliadas);  $n$  é uma dada previsão avaliada. Dentro de  $n$  podem estar incluídas vários membros previsões por ensemble;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $L$  é um dado limiar de ocorrência de uma cheia sendo analisado;  $P_{Qp_{h,n}}$  é o percentil da previsão de vazão por conjunto avaliando a excedência da cheia (no caso de previsões por ensemble) com horizonte  $h$ ;  $Q_{O_{h,n}}$  é o valor observado da vazão correspondente a previsão emitida  $n$  com horizonte  $h$ ;  $\mathbb{1}()$  é uma função que tem valor 1 quando o evento determinado internamente ocorre, e zero quando o evento não ocorre;. e  $POD_h(L, p_L)$  e  $POFD_h(L, p_L)$  são os valores de taxa de alarme verdadeiro e de alarme falso no horizonte  $h$ . A equação deve ser aplicada para cada um dos horizontes de previsão.

## **Reliability Diagram (diagrama de confiança)**

O *Reliability Diagram* também é um diagrama que fornece informações sobre o desempenho de um conjunto de previsões para um evento discreto, como a excedência

de um limiar. Um diagrama diferente é computado para cada um dos horizontes de previsão.

No eixo das abscissas (eixo “x”) do diagrama são plotadas as probabilidades de o evento avaliado ser excedido na previsão de vazão. No caso de uma previsão por conjunto, estas probabilidades são calculadas assumindo que os membros do conjunto são equiprováveis e verificando qual é a percentagem deles que ultrapassa o limiar.

Usualmente para compor o diagrama as probabilidades são plotadas dentro de classes discretas pré-definidas: 0-20%, 20-40%,...,80-100%, por exemplo.

No eixo das ordenadas do diagrama (eixo “y”) são plotadas as probabilidades condicionais observadas da ocorrência do evento, dadas as probabilidades de previsão definidas no eixo “x”.

Ou seja, no eixo das ordenadas é respondida a pergunta: de todas as vezes que o meu sistema de previsão previu a ocorrência do evento com a probabilidade dada no eixo “x”, qual foi a frequência real de ocorrências deste evento?

De acordo com a teoria por trás do *reliability diagram*, um evento deve ser observado com a mesma probabilidade de ocorrência que as probabilidades de ocorrência previstas pelo sistema de previsão ao longo de uma grande amostra.

Isto significa que um *reliability diagram* perfeito deve ser uma linha com inclinação de quarenta e cinco graus, e que desvios desta linha representam diferentes tipos de erros.

A Figura 14 apresenta um exemplo de *reliability diagram*. Nele, por exemplo, de todas as vezes que a previsão de ocorrência do evento avaliado teve probabilidade de ocorrência de 0,5 (50%), a ocorrência do evento foi observada com frequência de 0,45 (45%). Este pode ser considerado um desempenho muito bom, e próximo do desempenho perfeito, mostrado pela linha com inclinação de quarenta e cinco graus.

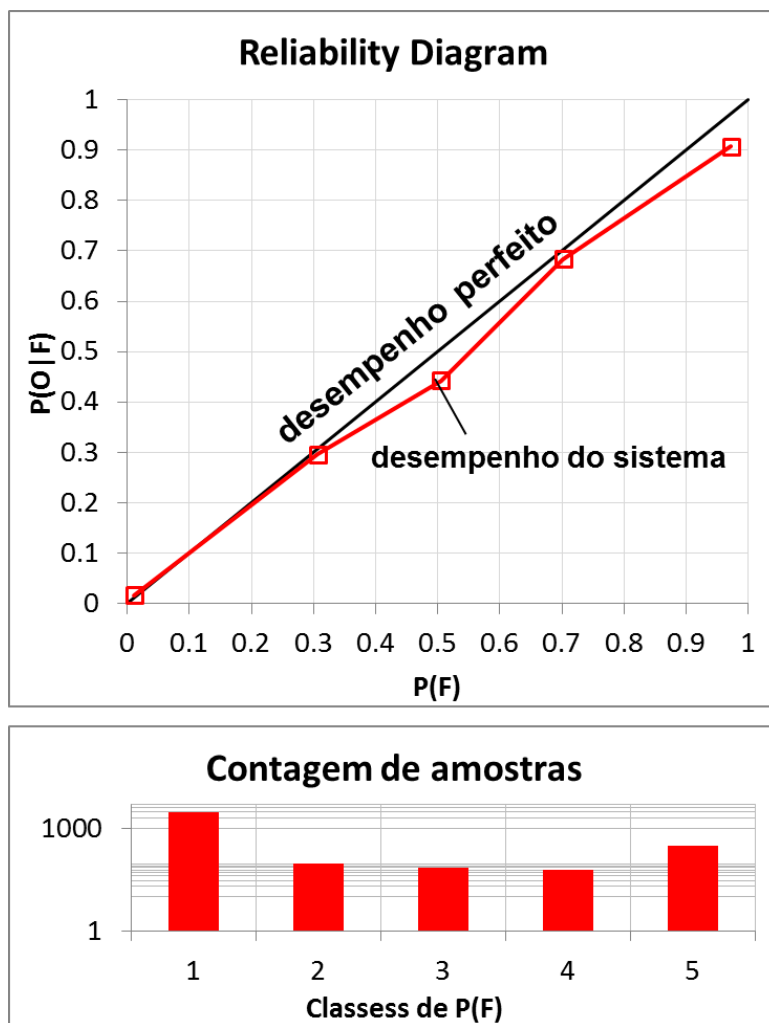


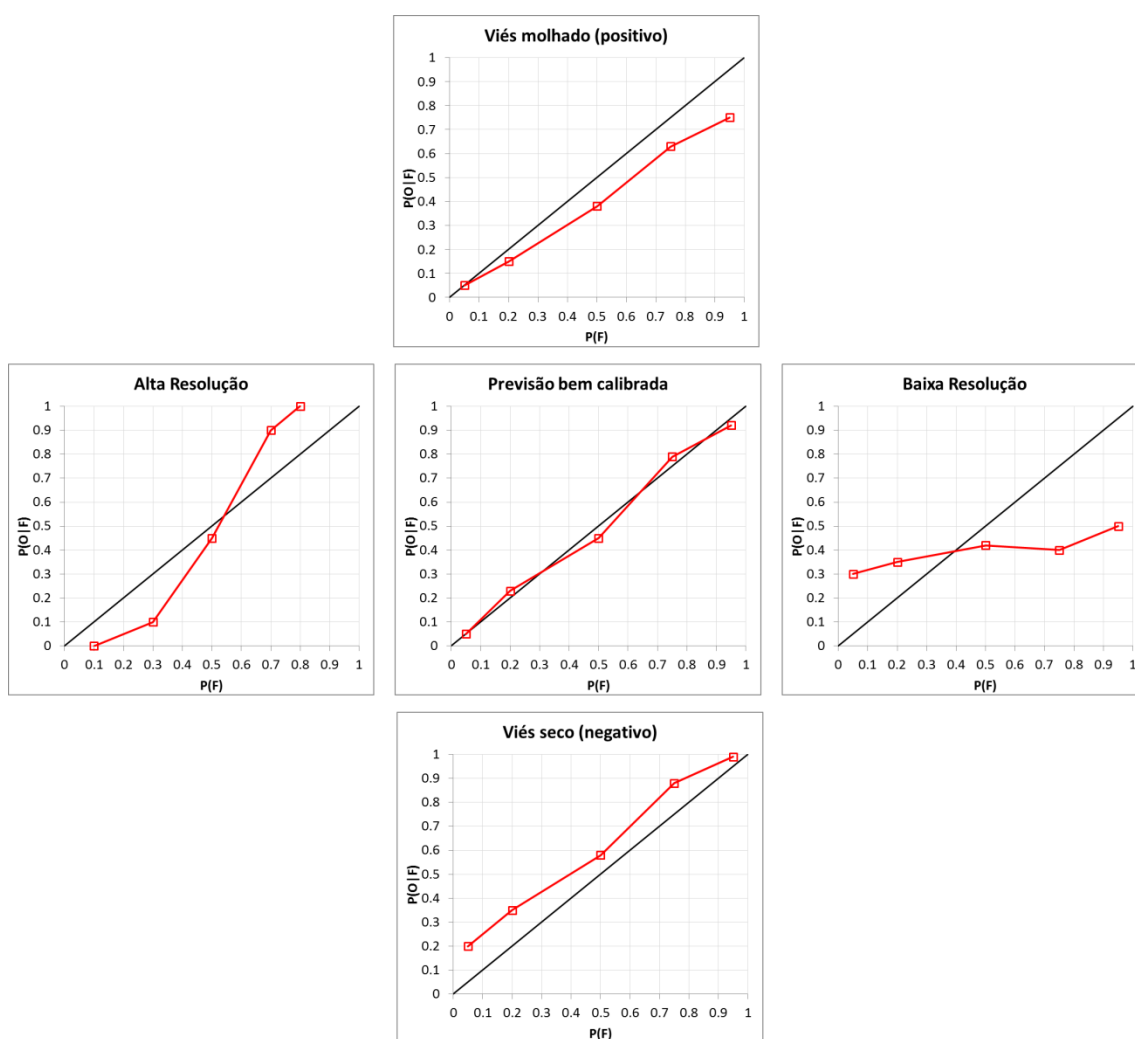
Figura 14. Exemplo de *reliability diagram* no gráfico da parte superior da figura. Na parte inferior é mostrado seu correspondente *sharpness histogram*.

Em adição ao diagrama também é usual a apresentação de um histograma com o número de previsões que caíram dentro de cada uma das classes pré-definidas de probabilidades de previsão. Este histograma é normalmente chamado de *sharpness histogram* (histograma de agudeza). O *sharpness histogram* não versa exatamente sobre a qualidade das previsões, mas sim como é a sua distribuição na amostra analisada. Ele serve como um complemento importante para o entendimento do *reliability diagram*.

O formato de “U” normalmente é desejado para este histograma, pois ele indicaria que a previsão é certa em suas decisões sobre a ultrapassagem de limiar. Contudo, isso não significa necessariamente que a previsão é boa ou ruim, já que ela pode sofrer de outros problemas, bem como incluir tantas incertezas que o seu formato é geralmente mais plano.

É válido destacar que o autor Wilks (2006) nomeia o *reliability diagram* de maneira um pouco diferente da apresentada aqui. O autor chama de *reliability diagram* o conjunto dos dois gráficos apresentados na Figura 14, de função de calibração (*calibration function*) o gráfico superior, e de distribuição do refinamento (*Refinement Distributions*) o gráfico inferior.

O autor Wilks (2006) também apresenta uma discussão muito interessante sobre a interpretação dos resultados do *reliability diagram*, com a apresentação de cinco formas características mais prováveis de resultados que permitem diagnósticos imediatos dos diagramas. Estas formas são apresentadas na Figura 15.



**Figura 15. Cinco formas características do *reliability diagram* (função de calibração), adaptado de Wilks (2006).**

O painel central na Figura 15 mostra a assinatura esperada de uma previsão bem calibrada, onde a frequência relativa do evento é praticamente igual à probabilidade

geralmente prevista, e, portanto a linha da previsão fica muito próxima da linha com inclinação de quarenta e cinco graus.

Nos painéis superior e inferior da Figura 15 são apresentadas formas características do diagrama para previsões que possuem viés condicional tipo I. No caso do painel superior a previsão possui viés condicional tipo I positivo. Este viés positivo é verificado por que as previsões geralmente indicam a ocorrência de eventos com uma probabilidade maior do que a frequência que eles ocorrem, fazendo com que a curva de desempenho se desloque para baixo da curva de quarenta e cinco graus.

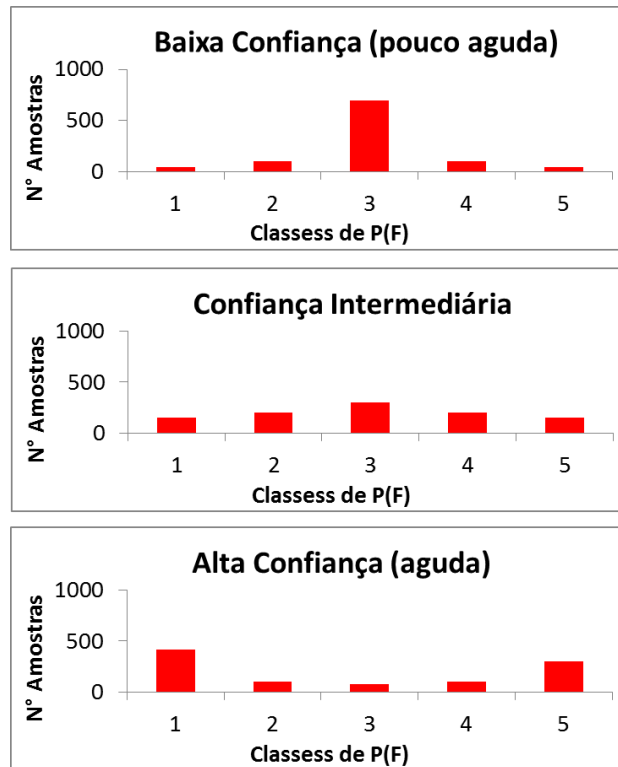
No caso do painel inferior a previsão possui viés condicional tipo I negativo. Este viés condicional tipo I negativo é verificado por que as previsões geralmente indicam a ocorrência de eventos com uma probabilidade menor do que a frequência que eles efetivamente foram observados, fazendo com que a curva de desempenho se desloque para cima da curva de quarenta e cinco graus.

As deficiências nas previsões indicadas pelos painéis na esquerda e na direita da Figura 15 indicam viés condicionais mais sutis nos resultados das previsões. Ou seja, que a ocorrência do viés depende de algumas situações nas previsões.

No painel da esquerda (alta resolução) existe um viés condicional positivo nas previsões associadas a situações previstas com pequena probabilidade (ou seja, quando o modelo prevê com probabilidade 0,1 a cheia não ocorre) e um viés negativo associado com situações previstas com alta probabilidade (ou seja, quando ele prevê com probabilidade 0,8 as cheias sempre acontecem). Mas em eventos com probabilidades intermediárias o modelo tem bom desempenho. Ela é chamada de alta resolução por que ela diferencia bem a ocorrência de eventos com alta e baixa probabilidade, muito embora com o viés associado.

No painel mais da direita acontece exatamente a situação contrária do painel da esquerda. Nela o modelo tem um viés condicional negativo nas previsões associadas a situações previstas com pequena probabilidade (ou seja, quando o modelo prevê a ocorrência com probabilidade menor que 0,1 na verdade ela ocorre com frequência 0,3), e um viés positivo associado com situações previstas com alta probabilidade (ou seja, quando o modelo prevê cheias com probabilidades maiores que 0,9 elas acontecem com frequência muito menor, em torno de 0,5). Este desempenho é chamado de baixa resolução por que ele prevê sempre um espectro muito amplo de ocorrência da cheia, não diferenciando a situação de eventos mais prováveis e menos prováveis. Com isso, a utilidade das previsões também é comprometida.

Na Figura 16 são apresentadas três configurações comuns do diagrama de agudeza (*Refinement Distributions*) também segundo Wilks (2006).



**Figura 16. Três configurações comuns do diagrama de agudeza (*Refinement Distributions*), adaptado de Wilks (2006).**

No painel superior da Figura 16 é apresentada a assinatura comum de uma previsão dita pouco confiante (ou pouco aguda), onde em geral a ocorrência do evento avaliado é prevista muitas vezes com probabilidades intermediárias. Nesse caso, as previsões em geral tem muita incerteza associada, ou muito espalhamento dos membros.

No painel intermediário da Figura 16 é mostrada uma previsão com confiança intermediária. Ou seja, onde o número de alarmes emitidos pela previsão se divide de maneira mais igual entre as diferentes probabilidades. O diagrama indica que o sistema prevê a ocorrência do evento com múltiplas probabilidades, e que a amostra utilizada para o cálculo do *reliability diagram* é muito similar em todas as classes de probabilidade.

Já no painel inferior da Figura 16 é mostrada a assinatura comum de uma previsão muito confiante, com um formato de “U”, indicando que são feitas muitas previsões com baixa probabilidade de ocorrência, e muitas previsões com alta probabilidade de ocorrência. Isso é um indicativo que o modelo de previsão tem pouca



incerteza, e é sempre bem confiante ao emitir suas decisões, sugerindo muitas vezes a baixa ou alta probabilidade de ocorrência do evento.

Muitas vezes também os diagramas de agudeza se apresentam no formato de “L” ou “L invertido”, indicando que as previsões sugerem muitas vezes a ocorrência do evento com a menor ou com a maior probabilidade. Elas seriam muito confiantes para estas classes. Nestes casos, Hamil et al (2008) sugerem a adaptação do diagrama com a utilização de uma escala logarítmica no eixo vertical, para melhor visualização do número de amostras em cada classe.

De qualquer forma, é válido lembrar que este diagrama de agudeza sozinho não versa sobre a qualidade das previsões, e sim apenas sobre o seu comportamento, apoiando a análise do *reliability diagram*.

Esta última afirmação fica bem clara quando pensamos no diagrama de agudeza para uma previsão determinística. Ele sempre terá formato de “U”, “L” ou “L invertido”, pois uma previsão determinística somente pode indicar probabilidade de 0% ou 100%. Com isso, a previsão determinística é sempre confiante em suas indicações de ocorrência do evento. Mas isso não significa necessariamente que as previsões são boas. É somente uma descrição do seu comportamento.

Esta observação inclusive merece uma pequena discussão, por que o que se deseja de um sistema de previsão por conjunto é que ele tenha uma alta agudeza (diagrama em formato de “U”), sugerindo que todos os membros sempre indicam a decisão com alta ou baixa probabilidade de ocorrência. Ao mesmo tempo, ao lidarmos com previsões por conjunto estamos justamente adicionando as incertezas ao sistema que permitem a verificação de probabilidades intermediárias. Assim, o formato de “U” do diagrama de agudeza combinado com uma previsão perfeitamente calibrada no *reliability diagram* compõe o cenário perfeito para facilitar a tomada de decisão, mas também não é sempre possível, pois depende de todas as incertezas dentro do contexto de geração das previsões.

Finalmente, é importante destacar que os resultados do *reliability diagram* são dependentes da incerteza na amostragem, e que, portanto, uma grande amostra é sempre desejada para que os resultados sejam confiáveis.

## **Forecast Convergence Score**

O *Forecast Convergence Score* (FCS) usado neste trabalho é uma medida de consistência entre previsões consecutivas apresentada por Pappenberger et al. (2011), em um estudo onde os autores avaliaram as tomadas de decisão do EFAS. O FCS mostrado pelos autores é baseado no Brier Score (BS), por que ele é uma medida relacionada com a ocorrência de um evento discreto (ultrapassagem de um limiar) e sua unidade de medida é dada pela diferença ao quadrado das probabilidades de ocorrência do evento. Porém, a comparação é feita entre previsões com dois instantes de tempo iniciais diferentes (no Brier Score ela é feita com a observação). A formulação matemática do FCS, ou FCS BS (Forecast Convergence Score baseado no Brier Score), é dada pela Equação 9:

$$\text{FCS BS}_h(L) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (F_{\text{Qp}_{h,t,n}}(L) - F_{\text{Qp}_{h+d,t-d,n}}(L))^2 \quad (9)$$

em que  $N$  é o número total de previsões emitidas (não é o número de membros no conjunto, mas sim o número de previsões emitidas avaliadas);  $n$  é uma dada previsão avaliada. Dentro de  $n$  podem estar incluídas várias previsões por ensemble;  $h$  é o horizonte de previsão avaliado;  $L$  é um dado limiar de ocorrência de uma cheia sendo analisado;  $F_{\text{Qp}_{h,t,n}}$  é a probabilidade de excedência da cheia calculado através da previsão ou do conjunto de previsões (no caso de previsões por ensemble) com horizonte  $h$ ;  $t$  é a data ou instante de tempo do início da previsão; e  $d$  é o delay entre duas previsões consecutivas que estão sendo avaliadas. A medida é tomada a cada horizonte de previsão  $h$ , considerando o mesmo pareado com o horizonte de previsão  $h + d$  da previsão imediatamente anterior.

O raciocínio por trás do FCS é bem simples: quando duas previsões consecutivas indicam a mesma decisão em termos de probabilidades (por exemplo, 10% de chance de ultrapassagem do limiar) elas são consistentes, e, portanto, o valor do FCS é zero. Contudo, caso elas apresentem uma diferença entre suas decisões, o valor do FCS será maior do que zero e proporcional às diferenças nas probabilidades indicadas elevadas ao quadrado. Assim, quando mais próximas de zero for o valor do FCS, mais consistentes são as previsões entre si. E quando maiores forem os valores de FCS, mais inconsistentes são as previsões entre si.

Um resultado típico de uma análise de FCS para um sistema de previsão pode consistir em um gráfico que mostra o valor da convergência em função dos horizontes de previsão avaliados, conforme mostrado no exemplo da Figura 8. Nela podemos ver um exemplo onde o valor da métrica começa relativamente alto, tende a diminuir, e nos horizontes de previsão maiores ele volta a crescer. Este tipo de resultado indica que as previsões possuem uma inconsistência menor entre si nos horizontes de previsão 40h e 160h, e maior nas demais antecedências.

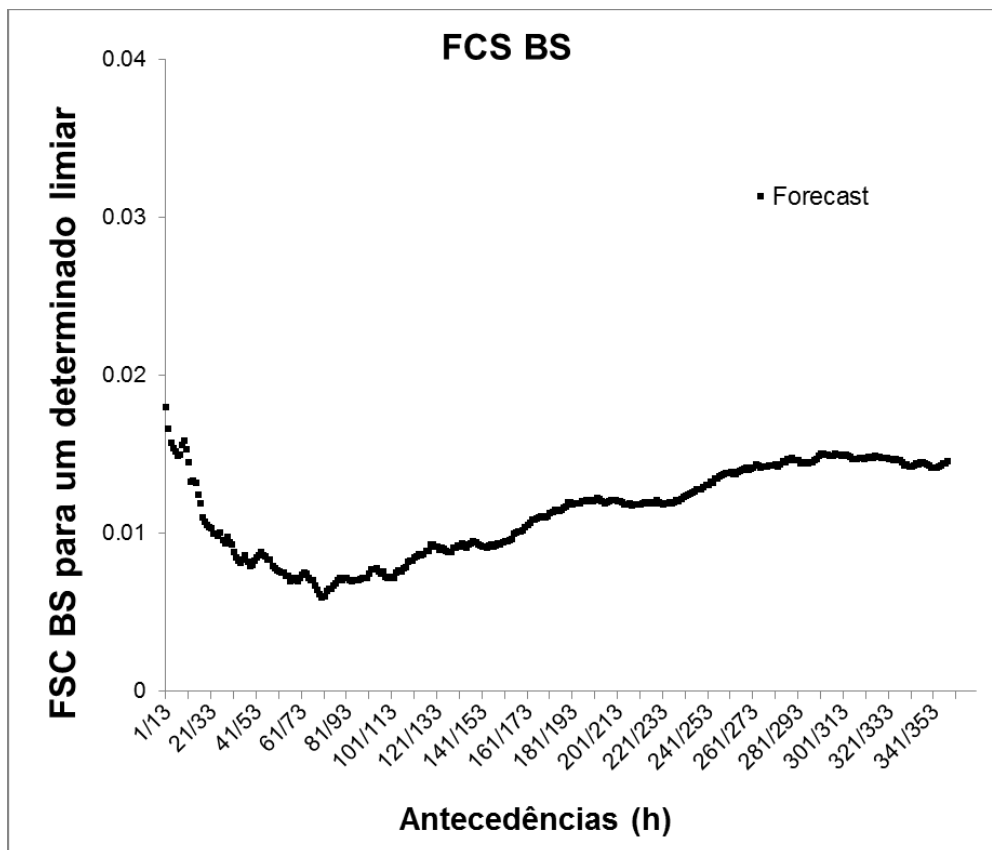


Figura 17. Exemplo do resultado típico de uma análise de FCS BS.

Finalmente, sobre o FCS é importante destacar que esta não é uma métrica de avaliação de qualidade das previsões, ao contrário das demais citadas até o momento. Tanto que ela nem é baseada em dados observados, apenas nas próprias previsões. E sim ela é uma métrica de medição de consistência, ou convergência, das previsões.

Portanto, valores próximos de zero do FCS podem indicar uma característica desejável das previsões, que é o fato de elas indicarem de forma consistente a

ocorrência de eventos. Contudo, isto não significa que a previsão será boa, por que ela pode muito bem indicar de forma consistente a ocorrência de um evento, mas que não vai ocorrer.

## ANEXO C

DADOS DOS MODELOS UTILIZADOS NESTA  
PESQUISA QUE CONSTAM NA BASE DE  
DADOS DO TIGGE

**Ensemble Name: CPTEC EPS****Ensemble Characteristics****1. Ensemble Version**

Version Identifier Code  
 Date of first implementation of this version  
 Global or Regional EPS? (See section 7 for items specific to regional EPS)

**Model 1**

1.0 ?

1999

Global

Date time of first forecast run  
 Date of last forecast with this version (if applicable)  
 Data time of last forecast run (if applicable)

?

Is there a higher-resolution control forecast available?

Yes, a T299

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

N/A - First version listed

**2. Configuration of the EPS**

Horizontal resolution of the model  
 Horizontal configuration and resolution of the output grid  
 Number of model levels  
 Forecast length and forecast step interval  
 Runs per day (Times in UTC)  
 Is there an unperturbed control forecast included? (Y/N)  
 Number of perturbed ensemble members (excluding control)  
 Is model coupled to an ocean model?  
 Integration time step  
 Top of model - model section  
 Additional comments

T126

384x196 (0.9375 degrees)

28

T+0h to T+360h at 6h interval

2 (00, 12)

Y

14

No

15 minutes

0.1 hPa

**3. Initial conditions and Perturbations**

Initial perturbation strategy  
 Optimisation time in forecast (if applicable)  
 Horizontal resolution of perturbations (if different from model resolution)  
 Initial perturbed area  
 Data assimilation method for control analysis  
 Are perturbations to observations employed? (Y/N)  
 Perturbations added to control analysis or derived directly from ensemble analysis  
 Perturbations in +/- pairs? (Y/N)  
 Additional comments

EOF-based perturbation

45S to 30N / 0 to 360

The analysis comes from NCEP

N

ADDED

YES

**4. Model Uncertainty Perturbations**

Is model physics perturbed? If yes, briefly describe method(s).  
 Do all ensemble members use exactly the same model version, or are, for example, different parameterization schemes used? Please describe any differences.  
 Is model dynamics perturbed? If yes, briefly describe method(s).  
 Are the above model uncertainty perturbations applied to the control forecast?

NO

SAME

NO

NO

Additional comments

**5. Surface Boundary Perturbations**

Perturbations to sea-surface temperature? If yes, briefly describe method(s).  
 Perturbations to soil moisture? If yes, briefly describe method(s).  
 Perturbations to surface wind stress or roughness? If yes, briefly describe method(s).  
 Any other surface perturbations? If yes, briefly describe method(s).  
 Are the above surface perturbations applied to the control forecast?  
 Additional comments

NO

NO

NO

NO

NO

**6. Other details of model**

What kind of soil scheme is in use?  
 How are radiations parametrized?  
 What kind of Large scale dynamics is in use (e.g. gridpoint semi-Lagrangian)?  
 What kind of boundary layer parametrization is in use?  
 What kind of convection parametrization is in use?  
 What Cloud scheme is in use?  
 Other relevant details?

SSiB (Xue, 1990, SiB - Sellers et al, 1986)  
 Lacis and Hansen (1974) for short wave  
 Harshvardhan et al (1974) for long wave  
 spectral Eulerian

Vertical Turbulent Diffusion 2.0 (Mellor and Yamada, 1982)  
 Deep: Kuo (Kuo, 1965; Anthes, 1977) Shallow (Tiedke, 1983)

Cloud Radiation Interactions (Slingo, 1987)

**7. Regional Ensemble specifics**

Regional domain descriptor (lat/long of boundaries)  
 Normal source of boundary conditions  
 Are boundary conditions perturbed?  
 Specification of boundary conditions required.  
 Are boundary condition requirements compatible with any other global models or standards? If so, please describe  
 Additional comments

Not applied

Not applied

Not applied

Not applied

Not applied

Not applied

Not applied

**8. Further Information**

Scientific contact  
 Technical contact point

Dr. José Paulo Bonatti

Christopher Cunningham [ christopher.cunningham@cptec.inpe.br, TEL:+55 1231868531, FAX:+55 1231012835 ]

Other contact points

Alex Almeida Fernandes [ alex.fernandes@cptec.inpe.br ]; Waldenio Almeida [ waldenio.almeida@cptec.inpe.br ]

List key reference papers for model

Xue, 1990; Sellers et al, 1986; Lacis and Hansen, 1974; Harshvardhan et al., 1974; Mellor and Yamada, 1982; Kuo, 1965; Anthes, 1977; Tiedke, 1983; Cavalcanti et al., 2002; Coutinho, 1999; Mendonça and Bonatti, 2002; Mendonça and Bonatti, 2009;

URLs for system documentation

[http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/mod\\_ens.shtml](http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/mod_ens.shtml)

Data policy of originating centre for usage of data in TIGGE

?

**9. TIGGE Specific Information**

Version Identifier Code  
 Date of first forecast in TIGGE  
 Data time of first forecast run in TIGGE  
 Date of last forecast in TIGGE  
 Data time of last forecast run in TIGGE  
 Is there a higher-resolution control forecast included in TIGGE? If so give tab name where it is described.

?

Feb 1st, 2008

00UTC

?

?

N

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

N/A - First version in TIGGE

## Ensemble Name: ECMWF EPS

### Ensemble Characteristics

#### 1. Ensemble Version

Version Identifier Code

Date of first implementation of this version

Please provide a short description of the Ensemble Prediction System

Research or Operational? If not operational, are there any plans to become so?

Global or Regional EPS? (See section 7 for items specific to regional EPS)

Date time of first forecast run

Date of last forecast with this version (if applicable)

Date time of last forecast run (if applicable)

Is there a higher-resolution control forecast available? (If yes, this should be described in a separate sheet of this spreadsheet.)

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

#### 2. Configuration of the EPS

Horizontal resolution of the model. (Where variable resolution is used, please describe in full.)

Horizontal configuration and resolution of the output grid

Number of model levels

Type of model levels (eg sigma)

Forecast length and forecast step interval

Runs per day (Times in UTC)

Is there an unperturbed control forecast included? (Y/N)

Number of perturbed ensemble members (excluding control)

Integration time step

Top of model - **model section**

Is model coupled to an ocean model?

If yes, please describe ocean model briefly including any ensemble perturbations applied

Additional comments

#### 3. Initial conditions and Perturbations

Data assimilation method for control analysis

Resolution of model used to generate control analysis

Control variables used in data assimilation

Ensemble initial perturbation strategy

Optimisation time in forecast (if applicable)

Horizontal resolution of perturbations (if different from model resolution)

Initial perturbed area

Are perturbations to observations employed? (Y/N)

Perturbations added to control analysis or derived directly from ensemble analysis

Perturbations in +/- pairs? (Y/N)

Additional comments

#### 4. Model Uncertainty Perturbations

Is model physics perturbed? If yes, briefly describe method(s).

Do all ensemble members use exactly the same model version, or are, for example, different parameterization schemes used? Please describe any differences.

Is model dynamics perturbed? If yes, briefly describe method(s).

Are the above model uncertainty perturbations applied to the control forecast?

Additional comments

#### 5. Surface Boundary Perturbations

Perturbations to sea-surface temperature? If yes, briefly describe method(s).

Perturbations to soil moisture? If yes, briefly describe method(s).

Perturbations to surface wind stress or roughness? If yes, briefly describe method(s).

Any other surface perturbations? If yes, briefly describe method(s).

Are the above surface perturbations applied to the control forecast?

Additional comments

#### 6. Other details of model

Description of model grids.

List of model levels in appropriate coordinates

What kind of Large scale dynamics is in use (e.g. gridpoint semi-Lagrangian)?

What kind of boundary layer parameterization is in use?

What kind of convection parameterization is in use?

What kind of large-scale precipitation scheme is in use?

What Cloud scheme is in use?

What kind of land-surface scheme is in use?

How is radiation parametrized?

Other relevant details?

#### 7. Regional Ensemble specifics

Regional domain descriptor (lat/long of boundaries)

Normal source of boundary conditions

Are boundary conditions perturbed?

Specification of boundary conditions required.

Are boundary condition requirements compatible with any other global models or standards? If so, please describe

Are initial conditions downscaled from a global analysis or is a regional analysis used?

Is regional ensemble a downscaling of global ensemble perturbations, or are specific regional perturbations calculated?

Additional comments

#### 8. Further Information

Scientific contact

URLs for Scientific documentation

Technical contact point

URLs for Technical documentation

Other contact points

List key reference papers for model

List key reference papers for EPS

URLs for system documentation

Data policy of originating centre for usage of data in TIGGE

#### 9. TIGGE Specific Information

Version Identifier Code

Date of first forecast in TIGGE

Date time of first forecast run in TIGGE

Date of last forecast in TIGGE

Date time of last forecast run in TIGGE

Is there a higher-resolution control forecast included in TIGGE? If so give tab name where it is described.

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

#### Model 1

mar/06

Global ensemble system that simulates initial uncertainties using singular vectors and model uncertainties due to physical parameterisations using a stochastic scheme. Based on 51 members, run twice-a-day up to day 15, with at 00UTC a coupled ocean system from day 10 to day 15 (extended to 32 days once a week, on Thursdays).

Operational

Global

No

N/A - First version listed

TL399

T399 L62 for day 1 to day 10 (leg 1) and T255 L62 for T+246 to day 15 (leg 2)

The resolution archived is N200 reduced gaussian grid for leg1 and N128 reduced gaussian grid for leg2.

62

sigma

T+0h to T+360h at 6h

2 (00, 12)

Y

50

30 min

-5hPa

No

4D-Var 12h window

TL799L91

Singular Vectors (Total energy norm)

T+48

T4ZL62

Extra tropical (<30S, >30N) + up to 6 tropical areas

No

Added

Y

Y. Stochastic perturbation of physics tendency by factor in range [0.5,1.5]

Same

N

N

N

N

N

N

N/A

Linear grid

[http://www.ecmwf.int/products/data/technical/model\\_levels/model\\_def\\_62.html](http://www.ecmwf.int/products/data/technical/model_levels/model_def_62.html)

Spectral semi-lagrangian

Moist EDMF with Klein/Hartmann stratus/shallow convection criteria

Tiedtke 89, Bechtold et al 2004 (QJ) which improved the triggering

Tiedtke 93 prognostic cloud fraction

HTESSEL

See [http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs\\_old/PHYSICS/Chap2\\_Radiation2.htm#959602](http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs_old/PHYSICS/Chap2_Radiation2.htm#959602)

(a) Buizza, R., & Palmer, T. N., 1995: The singular-vector structure of the atmospheric general circulation. *J. Atmos. Sci.*, 52, 9, 1434-1456. (b) Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., & Petroliagis, T., 1996: The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and Validation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (1996) Vol 122, pp 73-119. (c) Buizza, R., Miller, M., & Palmer, T. N., 1999a: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 2867-2908. (d) Buizza, R., Bidoi, J.-R., Wedi, N., Fuentes, M., Hamrud, M., Holt, G., & Vitart, F., 2007: The new ECMWF VAREPS (Variable Resolution Ensemble Prediction System). *O. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 133, 681-695.

<http://www.ecmwf.int/products/forecasts/guide/index.html>

Users of the ECMWF data sets are requested to reference the source of the data in any publication, e.g. "ECMWF ERA-40 data used in this study/project have been provided by ECMWF/have been obtained from the ECMWF Data Server".

1<sup>st</sup> October 2006

00Z

N/A

N/A

Yes, there is a control forecast run at T399 and a high resolution forecast run at T799

N/A - First version in TIGGE

**Ensemble Name: NCEP GEFS****Ensemble Characteristics****1. Ensemble Version**

Version Identifier Code

Date of first implementation of this version

Global or Regional EPS? (See section 7 for items specific to regional EPS)

Data time of first forecast run

Date of last forecast with this version (if applicable)

Data time of last forecast run (if applicable)

Is there a higher-resolution control forecast available?

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

**Model 1***March 27 2007**Global**Yes**N/A - First version listed***2. Configuration of the EPS**

Horizontal resolution of the model

Horizontal configuration and resolution of the output grid

Number of model levels

Forecast length and forecast step interval

Runs per day (Times in UTC)

Is there an unperturbed control forecast included? (Y/N)

Number of perturbed ensemble members (excluding control)

Is model coupled to an ocean model?

Integration time step

Top of model - **model section**

Additional comments

*T126**Spectrum, 1.0\*1.0 degree output**28**T+0h to T+384h at 6h**4 (00, 06, 12, 18)**Y**20**No**10 min**-2.73hPa***3. Initial conditions and Perturbations**

Initial perturbation strategy

Optimisation time in forecast (if applicable)

Horizontal resolution of perturbations (if different from model resolution)

Initial perturbed area

Data assimilation method for control analysis

Are perturbations to observations employed? (Y/N)

Perturbations added to control analysis or derived directly from ensemble analysis

Perturbations in +/- pairs? (Y/N)

Additional comments

*ETR (Ensemble Transform with Rescaling), 6hr cycling**T+48**Global**GSI (Gridded Statistical Interpolation)**No**Added**No**Tropical storm relocation***4. Model Uncertainty Perturbations**

Is model physics perturbed? If yes, briefly describe method(s).

Do all ensemble members use exactly the same model version, or are, for example, different parameterization schemes used? Please describe any differences.

Is model dynamics perturbed? If yes, briefly describe method(s).

Are the above model uncertainty perturbations applied to the control forecast?

Additional comments

*Yes, Stochastic perturbation to account for random model errors**Same**N**N***5. Surface Boundary Perturbations**

Perturbations to sea-surface temperature? If yes, briefly describe method(s).

Perturbations to soil moisture? If yes, briefly describe method(s).

Perturbations to surface wind stress or roughness? If yes, briefly describe method(s).

Any other surface perturbations? If yes, briefly describe method(s).

Are the above surface perturbations applied to the control forecast?

Additional comments

*N**N**N**N**N/A***6. Other details of model**

What kind of soil scheme is in use?

How are radiations parametrized?

What kind of Large scale dynamics is in use (e.g. gridpoint semi-Lagrangian)?

What kind of boundary layer parametrization is in use?

What kind of convection parametrization is in use?

What Cloud scheme is in use?

Other relevant details?

*NOAH land surface model by Ek and etc., (2003)**Long wave uses RRTM, short wave uses Chou's scheme (1992)**Spectrum triangular truncation**MRF-PBL scheme by Troen and Mahrt (1986), Hong and Pan (1996)**Simplified Alakawa-Shubert (SAS) scheme**Prognostic cloud scheme by Zhao and Carr (1997)***7. Regional Ensemble specifics**

Regional domain descriptor (lat/long of boundaries)

Normal source of boundary conditions

Are boundary conditions perturbed?

Specification of boundary conditions required.

Are boundary condition requirements compatible with any other global models or standards?

If so, please describe

Additional comments

**8. Further Information**

Scientific contact

Technical contact point

Other contact points

List key reference papers for model

List key reference papers for EPS

URLs for system documentation

Data policy of originating centre for usage of data in TIGGE

*[Zoltan.Toth@noaa.gov](mailto:Zoltan.Toth@noaa.gov)**[Yuejian.Zhu@noaa.gov](mailto:Yuejian.Zhu@noaa.gov)**[http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens\\_info.html](http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens_info.html)**[http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens\\_info.html](http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/ens_info.html)***9. TIGGE Specific Information**

Version Identifier Code

Date of first forecast in TIGGE

Data time of first forecast run in TIGGE

Date of last forecast in TIGGE

Data time of last forecast run in TIGGE

Is there a higher-resolution control forecast included in TIGGE? If so give tab name where it is described.

Brief summary of main changes from previous version (keywords).

*N/A - First version in TIGGE*