

AVALIAÇÃO DO ENSEMBLE DA PREVISÃO CLIMÁTICA DE CHUVA NO ESTADO DO CEARÁ COM BASE EM MODELOS NUMÉRICOS DE CLIMA

Dirceu Silveira Reis Jr.¹, Luiz Sérgio V. Nascimento², & Eduardo Sávio P. R. Martins³

RESUMO --- A FUNCEME fornece desde 2006, em caráter experimental, uma previsão de afluências aos principais reservatórios do Estado do Ceará nas escalas mensal e sazonal. Esta previsão emprega modelos regionais de clima (RSM e RAMS) em conjunto com um modelo hidrológico. Este artigo avalia a capacidade dos modelos numéricos de clima em prever a chuva no Estado do Ceará nas escalas mensal e sazonal, bem como as metodologias utilizadas para reduzir o viés observado nestas previsões. Como a previsão de chuva emprega uma abordagem probabilística, descrita por um *ensemble*, a avaliação da previsão é baseada na correlação entre os valores observados e a média dos membros do ensemble de previsão, e na métrica *Ranked Probability Skill Score* (RPSS). Resultados baseados nas previsões de 2002 a 2005, emitidas em dezembro do ano anterior, mostram que a qualidade da previsão varia espacialmente, e que em vários locais existe um ganho de informação em relação à climatologia (1971-2000), em especial nas bacias do Rio Salgado e do Alto Jaguaribe, principalmente no que tange as chuvas de Fevereiro, e total precipitado durante a quadra chuvosa (Fev – Mai) e primeiro semestre.

ABSTRACT --- FUNCEME has provided, in experimental mode, monthly and seasonal inflow forecasts at the main reservoirs in the State of Ceará. The methodology employs regional climate models (RCMs) in conjunction with a hydrologic model. This paper evaluates monthly and seasonal precipitation forecasts for the State of Ceará provided by RCMs, as well as the bias-correction methodologies employed in the forecast system. Given the precipitation forecast employs a probabilistic approach described by an ensemble forecast, both the correlation between observed precipitation and the mean of the ensemble members, and the *ranked probability score system* (RPSS) are used in the evaluation procedure. Results based on the 2002-2005 forecasts, issued on December of previous years, show that the quality of these forecasts varies across the state, and that these forecasts provide valuable information for many sites in the region when compared to climatology data (1971-2000), mainly for the Salgado and Alto Jaguaribe River sub-basins, especially for precipitation in February and total precipitation of the rainy season (Fev – Mai) and the whole semester.

Palavras-chave: previsão climática, previsão por *ensemble*, modelos climáticos.

¹ Pesquisador da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. Av. Rui Barbosa, 1246, Fortaleza – CE, 60.115-221, e-mail: dirceu.reis@gmail.com

² Pesquisador da FUNCEME, e-mail: luizsergiovn@gmail.com

³ Presidente da FUNCEME, e-mail: esm9@secrel.com.br

1 - INTRODUÇÃO

Importantes avanços científicos na área de previsão climática foram observados ao longo da última década. Uma série de fatores, como por exemplo, a criação de bancos de dados climatológicos globais de qualidade, experimentos regionais de grande escala com emprego de novas técnicas de medição em diferentes escalas temporal e espacial, e o rápido desenvolvimento computacional, propiciaram uma melhora considerável do entendimento e da modelagem de fenômenos atmosféricos, o que causou um aumento da qualidade da previsão climática (Wang et al., 2004).

Estes avanços na área de previsão climática criam uma perspectiva positiva na área de recursos hídricos, pois traz a possibilidade de desenvolver estratégias de previsão de aflúências com base na previsão de chuva com meses de antecedência (Wood et al., 2002; Franz et al., 2003; Tucci et al., 2003; Grantz et al., 2005; Reis et al., 2007), uma alternativa às usuais estratégias de previsão com base em modelos de regressão, como por exemplo, no trabalho de Souza e Lall (2003), onde se obteve uma relação empírica entre as vazões médias anuais e diversos indicadores climáticos, ou como no oeste americano, onde a previsão é feita através da regressão estatística entre as vazões mensais e o acúmulo de neve observado no final do inverno (Day, 1985).

A previsão de volumes afluentes aos reservatórios pode ajudar no processo de alocação de água numa dada região, bem como na operação de sistemas de reservatórios. Entretanto, a previsão de fenômenos naturais estará sempre sujeita a incertezas, e cabe aos técnicos, cientistas e gestores envolvidos no processo identificar se a informação oriunda de previsão climática é de fato útil (Hartmann et al., 2003; Lettenmaier, 2003).

Dá a importância de se verificar ou avaliar a qualidade de uma determinada estratégia de previsão. Estas avaliações permitem não apenas conhecer o desempenho dos modelos de previsão numa região, mas também identificar os meios pelos quais a previsão pode ser aperfeiçoada e o modo como a previsão pode ser aplicada, além de fornecer informação imprescindível aos tomadores de decisão, que são, em última instância, aqueles que farão uso ou não da previsão (Franz et al., 2003).

Este artigo pretende avaliar a qualidade da previsão climática de chuva por *ensemble*, obtida pelo modelo Regional Spectral Model (RSM), empregado de forma operacional na FUNCEME desde o final de 2001. A avaliação é feita tendo em mente que estas previsões de chuva serão utilizadas por um modelo hidrológico concentrado para se obter um *ensemble* de previsão de aflúências aos principais reservatórios do Estado do Ceará.

O artigo continua com uma breve descrição da estratégia de previsão de aflúências baseada na previsão climática de chuva, com o foco na descrição do modelo RSM. Esta descrição é importante

para contextualizar o problema. Em seguida, são apresentadas as métricas empregadas na avaliação da previsão climática de chuva por *ensemble*, bem como as metodologias empregadas para a remoção de viés dos dados de previsão. Na seção 4 encontram-se a apresentação e discussão dos resultados. Por último, na seção 5, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 – PREVISÃO CLIMÁTICA DE CHUVA

Este artigo trata da avaliação da previsão climática de chuva por *ensemble* que vem sendo emitida pela FUNCEME, de forma operacional, desde dezembro de 2001. Entretanto, é importante explicar o contexto desta avaliação. A FUNCEME, desde dezembro de 2005, vem emitindo mensalmente, no período de dezembro a abril, uma previsão de afluências aos principais reservatórios do Estado, bem como de vazões em vários postos fluviométricos. Esta previsão cobre o período úmido (Jan-Jun), sendo que a maior parte da chuva ocorre na quadra chuvosa (Fev-Mai).

Esta previsão de afluência utiliza uma cascata de modelos. Dados de previsão climática gerados pelo modelo de circulação global (GCM) ECHAN4.5, desenvolvido e operado pelo Instituto Max Planck, são utilizados para alimentar dois modelos regionais de clima, o RSM e o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). As previsões de chuva nas escalas mensal e sazonal obtidas por estes modelos regionais, depois de interpoladas para uma grade de 10 km x 10 km, são então utilizadas como dados de entrada de um modelo hidrológico concentrado, do tipo chuva-vazão, para gerar a previsão de afluências em locais de interesse.

Como o RAMS vem sendo empregado na FUNCEME há muito pouco tempo, desde dezembro de 2005, a avaliação da previsão apresentada neste artigo limita-se aos resultados do modelo RSM. Estudos anteriores com o modelo RSM para o nordeste brasileiro mostram que o modelo possui uma boa capacidade de representar os padrões de chuva na região, mais especificamente as anomalias (valor mensal menos a média mensal do período) observadas no período de 1971 a 2000. Entretanto, de uma maneira geral, estas análises foram feitas por pontos de grade do modelo enfocando grandes regiões, como por exemplo, o Estado do Ceará, e para grandes extensões temporais, como chuva trimestral, quadra chuvosa (Fev-Mai) e chuva semestral. O diferencial deste artigo está no fato de avaliar as previsões do modelo na escala da bacia hidrográfica, sob a forma de chuva média, dado que o modelo hidrológico empregado na previsão de afluências é do tipo concentrado, e de avaliar não apenas a capacidade do modelo de representar a anomalia, mas o verdadeiro valor das chuvas mensais, trimestrais, da quadra e do semestre.

2.1 – Regional Spectral Model (RSM)

O RSM foi o primeiro modelo climático regional a ser utilizado pela FUNCEME para realizar o downscaling da previsão climática de chuva gerada pelo modelo de circulação global ECHAM

4.5. A FUNCEME vem utilizando este modelo de forma operacional desde 2001 e com resultados satisfatórios. A versão utilizada é a 97 (Juang & Kanamitsu, 1994).

Sun et al. (2005) fornecem todos os detalhes acerca da configuração do modelo RSM para o Nordeste brasileiro, assim como uma análise crítica da capacidade do modelo de fazer previsões para a região.

A resolução espacial do modelo sobre o Nordeste brasileiro é de 60 km x 60 km, suficiente para representar as principais características topográficas da região, e o domínio modelado vai desde 100° W a 10° E, e de 20° N até 30° S, totalizando uma grade de 109 x 72 pontos. Vale mencionar que a região do Nordeste brasileiro está de fato longe dos limites do domínio modelado, evitando assim possíveis ruídos gerados na fronteira (Sun et al., 2005).

Uma série de estudos com este modelo foi realizada com base no período que vai de 1971 a 2000, onde os resultados do modelo foram comparados com valores de chuva observados no mesmo período. A conclusão é de que o modelo RSM possui uma boa capacidade para representar a variabilidade espacial da chuva na escala sazonal e a variabilidade interanual das mesmas.

2.2 – Previsão por *ensemble*

As equações que regem os fenômenos atmosféricos são altamente não-lineares, o que causa uma forte dependência dos resultados de previsão às condições iniciais provenientes dos modelos globais. Como uma forma de descrever esta fonte de incerteza, a FUNCEME adota uma previsão climática “probabilística”, através de um *ensemble* (conjunto) de previsões, ao invés de uma previsão determinística obtida por uma única rodada dos modelos.

A geração do *ensemble* é feita através da técnica de semente randômica, em que as condições iniciais, que caracterizam cada membro do *ensemble*, diferem entre si somente por uma perturbação randômica sobreposta à análise do modelo global. Sendo assim, em vez de quatro previsões determinísticas de chuva, uma para cada modelo (RSM e RAMS) e uma para cada cenário de temperatura de superfície do oceano (SST persistida e SST prevista), obtém-se um *ensemble* de previsão com 40 membros, 20 obtidos pelo modelo RAMS e 20 gerados pelo modelo RSM.

Deste modo, a faixa de variação dos valores de precipitação do *ensemble*, para cada mês de previsão, reflete a incerteza contida na análise do modelo global. Quanto maior esta faixa de variação, maior é a incerteza na previsão, e vice-versa. A previsão por *ensemble* requer métricas diferentes das tradicionais para avaliar a qualidade da previsão, como será discutido na seção 4.

2.3 – Correção de viés

Os modelos climáticos regionais possuem uma boa capacidade de prever anomalias ao redor de um valor médio, porém apresentam erros sistemáticos relativamente altos, que podem e devem

ser removidos para que estes resultados possam ser utilizados de maneira adequada na previsão de aflúências [Wang et al., 2004; Wood et al., 2002; Leung et al., 1999; Chen et al., 1996].

Há, portanto, a necessidade de utilizar algum tipo de procedimento de correção deste viés causado pelos erros sistemáticos de modo que os resultados de precipitação obtidos pelos modelos atmosféricos possam ser utilizados na modelagem hidrológica. Alguns algoritmos já foram propostos na literatura. De uma forma geral, estes algoritmos baseiam-se em métodos estatísticos que tentam realizar uma análise dos erros com base numa série histórica longa de valores observados e modelados [Wand et al., 2004; Wood et al., 2002; Feddersen et al., 1999].

Dois métodos são investigados neste artigo, um baseado na preservação dos dois primeiros momentos estatísticos da série histórica, e outro baseado na preservação da frequência relativa amostral da série histórica.

2.3.1 Correção com base nos momentos (MOM)

O primeiro método de correção, denominado MOM, procura preservar os dois primeiros momentos estatísticos da série de precipitações observadas, que neste caso foi o período que vai de 1971 a 2000. Toda a análise é feita com base na chuva média na bacia de interesse. Com o intuito de remover a sazonalidade do problema, a correção é feita mês a mês de maneira independente.

O algoritmo consiste em estimar a média e desvio-padrão das séries observada e simulada para cada mês do ano no período de 1971 a 2000. O valor bruto da previsão de chuva em um dado mês é subtraído da média histórica dos valores simulados para aquele mês e dividido pelo correspondente desvio-padrão. Obtém-se então um valor padronizado da previsão de chuva daquele mês. Para se obter o valor corrigido da previsão, basta multiplicar o valor padronizado pelo desvio-padrão da série histórica observada do mês em questão, e adicionar o valor da média histórica observada do referido mês. Deste modo, preservam-se os dois primeiros momentos estatísticos da série histórica observada.

2.3.1 Correção com base na frequência relativa amostral (PDF amostral)

O segundo método estudado, denominado aqui de PDF amostral, consiste em preservar as frequências amostrais observadas na série histórica de precipitação (Wood et al., 2002). Como no método anterior, o procedimento de correção é feito mês a mês, e a variável a ser corrigida é a chuva média mensal na bacia de interesse.

O procedimento baseia-se nas curvas de frequência amostral das séries de precipitação média observada e simulada na bacia de interesse no período de 1971 a 2000. Portanto, para cada mês obtêm-se duas curvas de frequência amostral, uma para os valores observados e outra para os valores simulados. Como as precipitações simuladas possuem 10 membros, a curva de frequência

amostral do modelo possui 300 valores, enquanto que a curva dos valores observados contém apenas 30 valores, um para cada ano da série histórica.

O valor bruto da previsão de chuva em um dado mês está associado a uma probabilidade de ocorrência dada pela curva de frequência amostral do modelo. Este valor pode ser facilmente interpolado na curva de frequência dos valores simulados. Para se obter o valor corrigido da previsão, basta pegar a precipitação correspondente à mesma probabilidade de ocorrência utilizando a curva de frequência amostral dos valores observados.

3 – LOCAIS DE PREVISÃO

Como já foi dito anteriormente, o objetivo deste estudo é o de avaliar a capacidade do modelo regional de clima, RSM, em fazer a previsão de chuva média nas bacias incrementais contribuintes aos locais onde há interesse de realizar previsão de vazões, quais sejam, os principais reservatórios do Estado. Entretanto, como não se dispõe de dados fluviométricos nos locais dos barramentos, a única maneira de avaliar a qualidade das previsões de aflúências consiste em utilizar os dados dos postos fluviométricos.

Por este motivo, além de avaliar a qualidade da previsão de chuva média nas bacias contribuintes aos principais reservatórios do estado, este trabalho também avalia a qualidade da previsão de chuva média nas bacias hidrográficas dos postos fluviométricos. As tabelas abaixo apresentam a lista das bacias onde foi feita a verificação da previsão climática.

Tabela 1: Lista das bacias incrementais afluentes aos reservatórios do Estado do Ceará onde foi avaliada a qualidade da previsão climática de chuva

n°	Reservatório	Área (km ²)	n°	Reservatório	Área (km ²)
1	Castanhão	20.070	5	Banabiuú	9.054
2	Pereira Miranda (PM)	3.260	6	Pacoti-Riachão-Gavião (PRG)	1.394
3	Paulo Sarasate (P.S)	3.522	7	Pacajús	4.514
4	Fogareiro	4.965			

Vale notar a ausência da bacia contribuinte ao reservatório de Orós. Esta ausência pode ser explicada pelo fato de existir um posto fluviométrico (Iguatú, código 36160000) logo a montante do barramento. Neste caso específico, a previsão de aflúências ao reservatório de Orós é feita com base na previsão de vazões para o posto de Iguatú, empregando um ajuste com base na relação entre as áreas de drenagem. Portanto, a avaliação da qualidade da previsão climática de chuva para a bacia contribuinte ao reservatório de Orós é, de fato, realizada com base na qualidade da previsão para a bacia hidrográfica do posto Iguatú (36160000).

Tabela 2: Lista das bacias onde foi avaliada a qualidade da previsão climática de chuva

nº	Posto	Área (km ²)	nº	Posto	Área (km ²)	nº	Posto	Área (km ²)
1	34750000	18339.5	7	36125000	3746.1	13	36270000	8986.9
2	35210000	1642.6	8	36128000	5874.2	14	36280000	11447.9
3	35880000	4093.2	9	36160000	20608.9	15	36290000	12680.4
4	35950000	2055.8	10	36180000	2027.2	16	36470000	4838.3
5	36020000	5521.5	11	36210000	1755.9	17	36520000	6794.6
6	36045000	3958.5	12	36250000	4372	18	36550000	2011.3

De uma maneira geral, espera-se que a incerteza da previsão climática de chuva seja maior em bacias com área de drenagem pequena. Bacias com área menor que 3600 km² dificilmente terão bons resultados de previsão visto que o espaçamento de grade do modelo em questão (RSM) é de 60 km x 60 km., mesmo sabendo que a chuva média na bacia é calculada com base em valores interpolados para uma grade de 10 km x 10 km. Seguindo o mesmo raciocínio, regiões grandes, como todo o Estado do Ceará, devem apresentar resultados melhores. De todo modo, a verificação apresentada neste trabalho também inclui bacias com área menor que 3600 km². Uma discussão da influência da área da bacia sobre os resultados é incluída na seção de resultados.

4 – MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DA PREVISÃO

Esta seção discute as métricas utilizadas na avaliação do *ensemble* da previsão climática de chuva média na bacia. Diversas métricas são utilizadas na meteorologia para verificação de previsão de variáveis meteorológicas. Detalhes podem ser obtidos em Epstein (1969) e Wilks (1995).

Neste trabalho foram utilizadas duas métricas, uma tradicional, que não faz uso de todos os membros do ensemble, e outra que procura dar valor à qualidade da previsão probabilística descrita por um ensemble. A primeira métrica, correlação entre valores observados e modelados, baseia-se nos resultados de chuva do modelo RSM no período de 1971 a 2000. A segunda métrica, que faz uso do ensemble de previsão, e que é sensível a erros sistemáticos, baseia-se nas previsões do modelo no período de 2002 a 2005, já que o período de 1971 a 2000 é utilizado no cálculo da correção de viés das precipitações modeladas, impossibilitando o uso deste período maior de dados na avaliação da previsão. Ambas as métricas são descritas na seqüência.

4.1 – Correlação entre Precipitações Observada e Modelada

A primeira métrica empregada na avaliação da qualidade da previsão climática de chuva é a correlação entre os valores de chuva observados no período de 1971 a 2000 e os valores de chuva obtidos pelo modelo RSM no mesmo período.

Como a previsão do modelo RSM é composta por vários membros, a correlação foi estimada com base na média dos membros do ensemble. A correlação foi estimada separadamente para todos os meses do primeiro semestre, bem como para os trimestres JFM, FMA, MAM, AMJ, para a quadra chuvosa, que vai de Fevereiro a Maio, e para o total precipitado no primeiro semestre.

A correlação entre as precipitações observadas e modeladas para cada bacia hidrográfica estudada indica o quão bem o modelo representa as variações de precipitação observada ao longo dos meses. Entretanto, a presença de erros sistemáticos, fator muito importante para a previsão de aflúências, objetivo maior deste estudo, não é capturada nesta análise. Este fato leva à adoção de uma outra métrica, o *Ranked Probability Skill Score* (RPSS), que além de penalizar erros sistemáticos, utiliza não apenas a média do ensemble, mas todos os membros do mesmo.

4.1 – *Ranked Probability Skill Score* (RPSS)

O *Ranked Probability Skill Score* (RPSS) foi criado exatamente para avaliar a qualidade de previsões com base probabilística, como no caso de previsões por *ensemble*. O RPSS é, de fato, derivado do *Ranked Probability Score* (RPS), como será mostrado mais adiante.

A metodologia do RPS consiste em dividir o espaço amostral da variável de interesse, no nosso caso, a precipitação média na bacia, em faixas. Os limites de cada faixa são associados a probabilidades de não-excedência. Para isto, utilizam-se os valores de precipitação observados no histórico. No presente caso, empregou-se o período denominado de climatologia, um período de 30 anos que vai de 1971 a 2000. Portanto, com base nesses dados observados, definem-se os limites superiores de precipitação de cada faixa, que estão associados a probabilidades de não-excedência.

O número de faixas e as correspondentes probabilidades de não-excedência influenciam o valor final do RPS, e conseqüentemente, do RPSS. Uma possibilidade seria a utilização de apenas três faixas igualmente distribuídas, ou seja, com limites de faixas associados às probabilidades 1/3 e 2/3. Esta é exatamente a maneira como a FUNCEME descreve sua previsão climática de chuva para a quadra chuvosa, ou seja, através de probabilidades do total acumulado na quadra ficar no primeiro, segundo ou terceiro tercil dos valores de chuva observados no período de 1971 a 2000, classificando as três faixas como “seca”, “normal” e “chuvosa”, respectivamente. Vale mencionar que na previsão operacional da FUNCEME, as análises são feitas por ponto de grade e em relação às anomalias, de modo que os erros sistemáticos não precisam ser corrigidos. No presente trabalho,

a análise é feita para a chuva média na bacia com os valores de precipitação corrigidos por métodos de correção de viés.

Em vez de utilizar apenas três faixas, este estudo de verificação empregou cinco faixas igualmente espaçadas, ou seja, os limites das faixas estão associados aos valores de precipitação média na bacia observados no período de 1971 a 2000, cujas probabilidades de não-excedência são 0,20; 0,40; 0,60; 0,80.

Definidos os limites de não-excedência do período da climatologia, os membros do ensemble de previsão para um dado mês, trimestre, quadra, ou semestre são distribuídos nestas cinco faixas pré-estabelecidas. Com isso podem-se estimar a frequência relativa amostral para a faixa i , f_i , e a probabilidade acumulada dos valores da previsão, F_i ,

$$F_i = \sum_1^i f_i \quad , i = 1, \dots, 5 \quad (1)$$

O mesmo pode ser feito para o valor observado de precipitação, mas nesse caso, existe apenas um valor, de modo que a frequência relativa amostral será igual a 1 para a faixa onde o valor observado cair, e zero para as demais. A probabilidade acumulada de cada faixa é dada pela seguinte expressão,

$$F_{oi} = \sum_1^i f_{oi} \quad , i = 1, \dots, 5 \quad (2)$$

O RPS de uma previsão é dado pelo somatório dos quadrados da diferença entre as probabilidades acumulada da previsão por ensemble e observada, conforme a expressão abaixo,

$$RPS = \sum_{i=1}^5 (F_i - F_{oi})^2 \quad (3)$$

Vale notar que quanto maior a probabilidade para faixas distantes da qual o valor observado pertence, maior será o valor do RPS, ou seja, pior é a qualidade da previsão. Diz-se que o RPS é sensível à distância (Wilks, 1995). Uma previsão perfeita teria um RPS igual a zero. Neste caso, o ensemble de previsão indicaria 100% de chance da precipitação cair em apenas uma faixa, exatamente a faixa onde o valor observado ocorre. Quando há n previsões ao longo do tempo, calcula-se a média dos RPSs,

$$\overline{RPS} = 1/n \sum_{j=1}^n RPS_j \quad (4)$$

A métrica RPSS utilizada neste trabalho é derivada do RPS. A idéia é poder comparar duas metodologias de previsão. Neste trabalho, a metodologia base para comparação é a própria climatologia, ou seja, o objetivo é avaliar o ganho em utilizar modelos climáticos regionais na previsão de chuva em relação ao conhecimento que se tem das chuvas que ocorreram no passado.

O RPSS é calculado pela seguinte expressão,

$$RPSS(\%) = \frac{\overline{RPS}_{cl} - \overline{RPS}_{mod}}{\overline{RPS}_{cl}} * 100 \quad (5)$$

em que \overline{RPS}_{cl} é o RPS médio que se obtém quando a climatologia é empregada para fazer a previsão e \overline{RPS}_{mod} é o RPS médio quando os modelos regionais de clima são utilizados na previsão.

A faixa de variação do RPSS vai de $-\infty$ até 100%. Valores negativos indicam que a previsão não traz qualquer benefício em relação ao uso da climatologia, enquanto que 100% estaria relacionado a um sistema de previsão perfeito.

Neste artigo, o RPSS é calculado para a previsão de todos os meses do primeiro semestre separadamente, para os trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, para a quadra chuvosa (Fev – Mai), e para o total precipitado no primeiro semestre. Todas essas avaliações são realizadas com base em previsões emitidas no mês de dezembro do ano anterior.

5 – RESULTADOS

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados de correlação entre as precipitações observada e modelada pelo modelo RSM (média do ensemble de 10 membros), no período entre 1971 e 2000, para as bacias contribuintes aos postos fluviométricos estudados. A primeira figura apresenta os resultados mensais do primeiro semestre, enquanto a segunda apresenta os resultados para os quatro trimestres (JFM, FMA, MAM, AMJ), para a quadra chuvosa (Fev – Mai) e para o primeiro semestre. Estes resultados foram obtidos com o modelo RSM trabalhando em modo simulação.

Observa-se claramente que as correlações entre as precipitações modeladas e a média do ensemble do modelo RSM são maiores quando se faz a integração temporal da chuva, ou seja, quando se analisa os resultados dos trimestres, quadra e semestre, ao invés dos resultados mês a mês. Nestes casos de total acumulado em intervalos maiores que um mês, as correlações são bem altas, quase sempre acima de 0,70, chegando até a mais de 0,80 em algumas bacias, com exceção do trimestre JFM. Vale mencionar que estes modelos de previsão climática de chuva têm dificuldades em modelar os fenômenos formadores de chuva típicos das chuvas de dezembro e janeiro, portanto, já era esperado que as correlações com o mês de janeiro, e em menor grau, com o trimestre JFM, não fossem tão altas quanto as dos outros meses ou trimestres.

Observa-se que as bacias 4 e 11, de uma maneira geral, especialmente para os trimestres, quadra e semestre, apresentam baixas correlações quando comparadas com as bacias de outros postos fluviométricos. O motivo desta baixa correlação está possivelmente associado ao tamanho das áreas de drenagem, 2.055 e 1744 km², bem menor do que seria razoável tendo em vista que a grade do modelo é de 60 km x 60 km. Entretanto, dever haver outros fatores em jogo já que as

bacias contribuintes aos postos 2, 10 e 18 também possuem áreas pequenas, mas apresentam boa correlação.

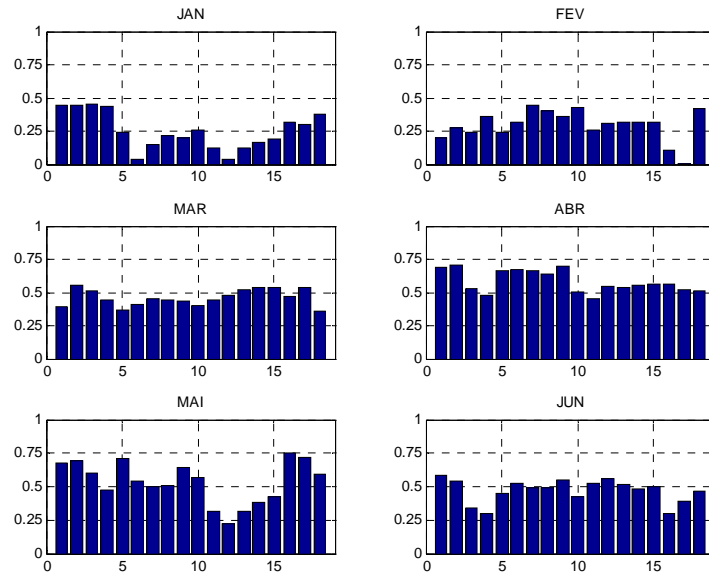


Figura 1: Correlação mensal entre as precipitações observada e modelada pelo RSM, no período de 1971 a 2000, para os 18 postos fluviométricos.

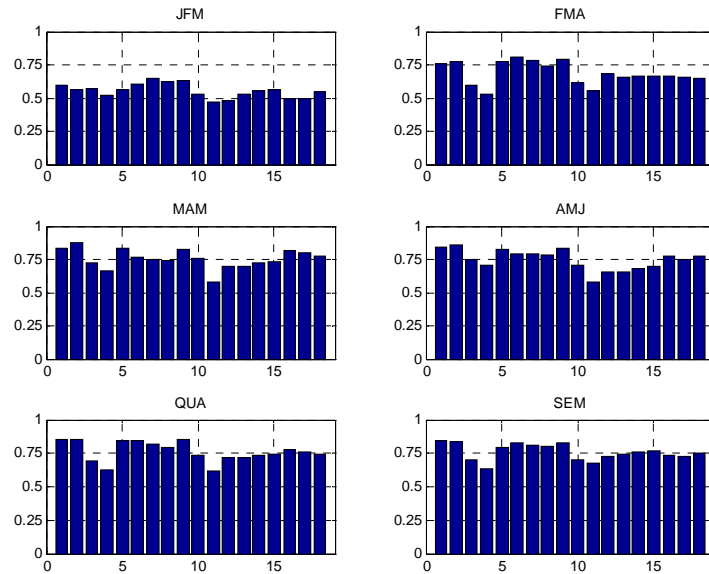


Figura 2: Correlação trimestral, quadra chuvosa (Fev – Mai) e semestral das precipitações observada e modelada com o RSM, no período de 1971 a 2000 para os 18 postos fluviométricos.

As Figuras 3 e 4 também apresentam os resultados de correlação entre as precipitações observadas e a média do ensemble do modelo RSM, como no caso das Figuras 1 e 2, porém os resultados são para os 7 reservatórios listados na Tabela 1, quais sejam: Castanhão (Cast.), Pereira

Miranda (P.M.), Paulo Sarasate (P.S.), Fogareiro (Fog.), Banabuiú (Banab.), as bacias agregadas dos reservatórios Pacoti-Riachão-Gavião (PRG), e Pacajús (Pac.).

O padrão da correlação é similar àquele observado para os postos fluviométricos. As correlações são maiores para os totais acumulados nos trimestres, quadra chuvosa e primeiro semestre, do que para os meses separadamente, mostrando a dificuldade que o modelo tem em representar adequadamente a variabilidade intra-anual.

De novo, o trimestre JFM é o que apresenta a correlação mais baixa dentre os trimestres avaliados, embora a diferença aqui seja menor do que a observada no caso dos postos fluviométricos. De todo modo, as correlações para os meses de março, abril e maio são superiores a 0,50, chegando a mais de 0,70 na bacia do reservatório de Paulo Sarasate nos meses de abril e maio, e nas bacias dos reservatórios de Pereira de Miranda, Fogareiro e Banabuiú no mês de maio. Os trimestres FMA, MAM e MAJ apresentam correlações bem altas, quase sempre acima de 0,70 para todos os reservatórios durante FMA, e em torno de 0,75 nos trimestres MAM e MAJ.

Com relação à quadra chuvosa e o total precipitado no primeiro semestre, as correlações ficam também em torno de 0,75, com exceção do reservatório de Fogareiro, que fica um pouco mais abaixo. Vale notar a alta correlação observada na bacia contribuinte ao reservatório Paulo Sarasate, em torno de 0,85, tanto para a quadra chuvosa quanto para o primeiro semestre.

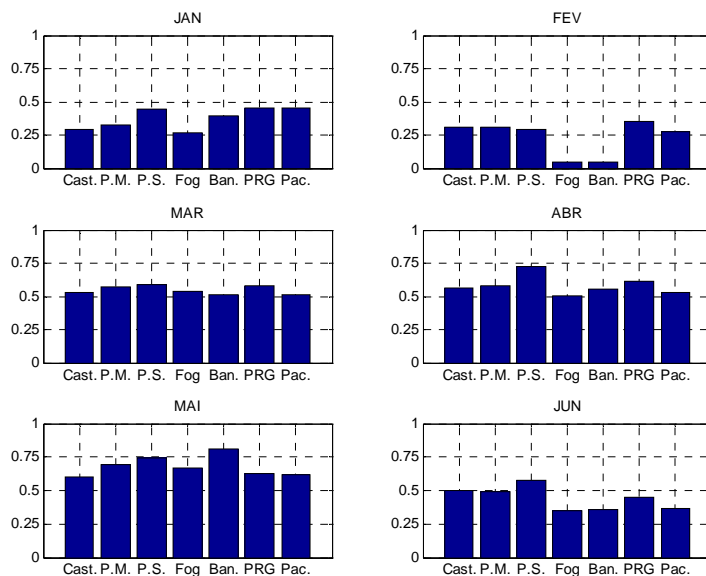


Figura 3: Correlação mensal das precipitações observada e modelada com o RSM, no período de 1971 a 2000 para as bacias dos 7 reservatórios avaliados.

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados de RPSS para os 18 postos fluviométricos analisados, para todos os meses do primeiro semestre e para os totais acumulados nos quatro trimestres, quadra chuvosa e primeiro semestre. A análise é baseada nas previsões de 2002 a 2005,

emitidas em dezembro dos anos anteriores. São apresentados apenas os resultados para os postos onde o RPSS foi maior do que zero, ou seja, onde a previsão de precipitação proporciona algum ganho em relação à climatologia. Nos casos onde o RPSS foi negativo, a barra de dados foi omitida.

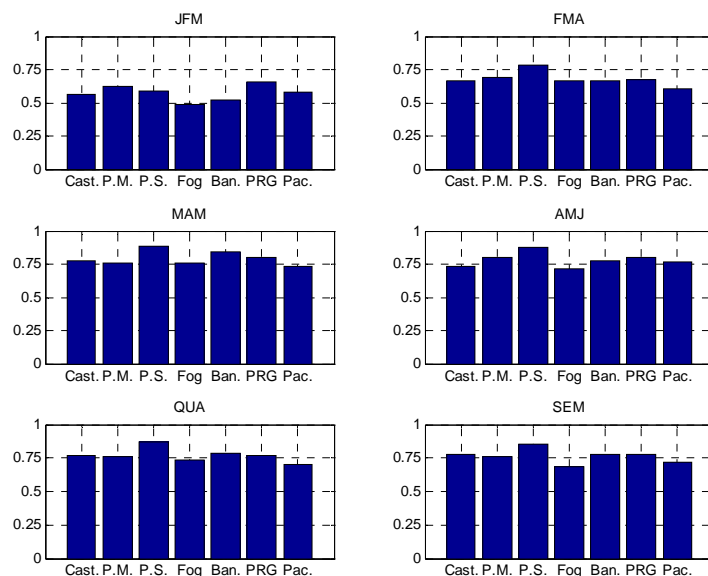


Figura 4: Correlação trimestral, quadra chuvosa (Fev – Mai) e semestral das precipitações observada e modelada (RSM), no período de 1971 a 2000, para as bacias dos 7 reservatórios.

Analisando-se os resultados mensais, verifica-se, como era de se esperar, que o modelo RSM, em dezembro, possui uma boa capacidade de prever as precipitações do mês de fevereiro, mas falha na previsão dos totais mensais de março e abril, com exceção dos postos do Rio Salgado, que apresentam valores razoáveis de RPSS no mês de abril, assim como um posto do alto Jaguaribe, 36180000 (posto 10). Alguns postos apresentam valores de RPSS bons para maio e junho, mas a pluviosidade nestes meses, de uma maneira geral, é baixa.

Diferentemente dos outros meses, a boa capacidade de previsão para o mês de fevereiro acontece em todas as bacias contribuintes aos postos fluviométricos, embora a qualidade de previsão, expressa pelo RPSS, varie espacialmente no Estado. A região do Estado que apresenta o maior RPSS (>50%) para o mês de fevereiro é aquela onde se localizam os postos 11 – 15, que é a região do Rio Salgado, importante afluente da margem direita do Rio Jaguaribe, um dos principais contribuintes ao reservatório do Castanhão. Outra região com bons valores de RPSS para o mês de fevereiro, em torno de 45%, é a do Alto Jaguaribe, mais especificamente nas bacias contribuintes aos postos 36125000 e 36128000. Ainda na bacia do Alto Jaguaribe, mais especificamente nas bacias contribuintes aos postos 36020000 (posto 5) e 36045000 (posto 6), o RPSS é um pouco mais modesto, em torno de 15 e 25%, mas ainda bom. Como dito anteriormente, a previsão de afluências ao reservatório de Orós é feita com base na previsão de afluências ao posto Iguatú, 36160000 (posto

9). Pode-se verificar que para o mês de fevereiro, com previsão emitida em dezembro, o RPSS para o posto Iguatú é de aproximadamente 30%, um valor considerado bom.

O posto com pior RPSS foi o de número 35950000 (posto 4), mas ainda assim com valor positivo, o que significa dizer que é melhor do que a previsão com a climatologia. Uma possível explicação para este baixo RPSS é sua área de contribuição de apenas 2.055 km². Do ponto de vista de previsão de aflúências, este posto não seria utilizado, pois possui uma área de drenagem muito pequena, mas seus resultados são mostrados a título de ilustração. De todo modo, outros postos com área de drenagem inferior a 3000 km², como os postos 2, 10 e 11, obtiveram bons valores de RPSS.

Com relação à definição da melhor metodologia para correção de viés, os resultados mensais não fornecem os elementos suficientes para uma definição clara. Em algumas regiões a correção pela PDF forneceu valores maiores de RPSS, enquanto em outras regiões o oposto foi observado.

As previsões dos totais acumulados de chuva para os trimestres JFM e FMA apresentam valores de RPSS relativamente elevados para os postos do Rio Salgado (11-15) e para três postos do Alto Jaguaribe (6-8), entre 25 e 55%. As demais bacias apresentam valores mais modestos ou abaixo de zero. Vale notar os resultados ruins para os postos localizados na bacia do reservatório Banabuiú (16-18). Em nenhum deles o RPSS foi positivo para quaisquer dos quatro trimestres, quadra chuvosa ou semestre, embora o RPSS seja positivo para os meses de fevereiro e maio.

No trimestre MAM, apenas os postos do Rio Salgado apresentaram valores positivos de RPSS, em torno de 25%, ou seja, menores do que os verificados para o trimestre anterior. Os postos do Alto Jaguaribe apresentaram RPSS negativo para MAM.

No trimestre AMJ, todos os postos do Alto Jaguaribe e do Rio Salgado apresentaram RPSS positivo na casa de 20 a 25%. Além destes, o posto 34750000 (posto 1), cuja bacia localiza-se na parte sudoeste do Estado, obteve um RPSS por volta de 20% para AMJ.

Em relação à quadra chuvosa, mais uma vez, os postos com RPSS mais significativos foram aqueles localizados na bacia do Rio Salgado e três postos localizados na bacia do Alto Jaguaribe (6-8). O mesmo pode ser dito para o total acumulado no semestre, onde todos os postos do Alto Jaguaribe e do Rio Salgado apresentaram um RPSS de aproximadamente 25% no Jaguaribe, com exceção do posto 36125000 (7) que obteve 50%, e 50% para os postos do Rio Salgado, com exceção do posto 36210000 (11), que obteve um RPSS em torno de 25%. Vale lembrar que o posto 36210000 possui uma área de drenagem pequena, apenas 2.027 km², sendo, portanto, uma surpresa que apresente valores tão altos de RPSS.

As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados de RPSS para as bacias contribuintes aos sete reservatórios estudados. De certa forma, os resultados mensais são similares àqueles observados para os postos fluviométricos. O mês de fevereiro, como esperado, foi o que apresentou melhores resultados, RPSS entre 25% e 50% para quatro dos sete reservatórios. Os reservatórios com

melhores resultados foram o Castanhão e o Banabuiú, seguidos do Fogareiro com 30% e Pereira Miranda com 25%. Vale mencionar que o RPSS do reservatório de Orós (posto Iguatú – 36160000 – posto 9) para o mês de fevereiro foi de aproximadamente 30%.

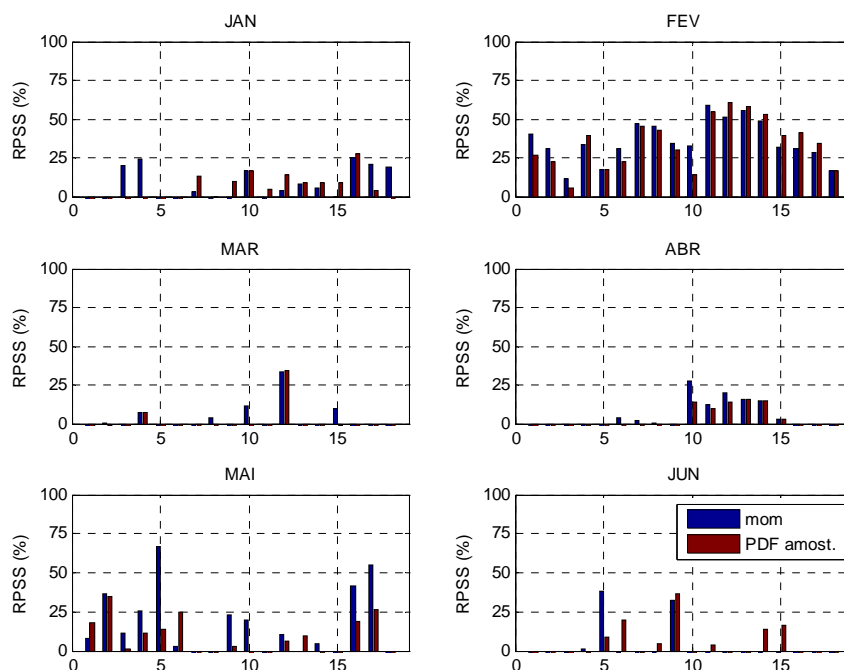


Figura 5: Resultados de RPSS (%) mensal, no período de 2002 a 2005, para os 18 postos fluviométricos utilizados. Previsão realizada no mês de dezembro do ano anterior. Comparação do método de correção de viés, MOM (azul) e PDF amostral (vermelho).

O RPSS para os meses de março e abril é quase que exclusivamente negativo, com exceções positivas, porém bem modestas para as bacias contribuintes aos reservatórios Pereira de Miranda e Pacoti-Riachão-Gavião para o mês de março, e ao reservatório Castanhão no mês de abril. Mais uma vez, observam-se valores positivos de RPSS em maio e junho, porém, como dito anteriormente, o índice pluviométrico destes meses costumam ser pequeno.

Analisando-se os resultados para os totais acumulados para os trimestres, quadra chuvosa e primeiro semestre, percebe-se que dentre os reservatórios analisados, apenas o reservatório Castanhão apresenta sistematicamente valores positivos de RPSS, e sempre acima de 25%. Aparentemente, muito deste bom desempenho deve estar associado à boa capacidade do modelo RSM prever precipitação na bacia do Rio Salgado, como mostrado anteriormente. Embora não apresentado na Figura 8, o reservatório de Orós (posto 36160000) também possui bons valores de RPSS, embora não tão bons quanto os observados na bacia do Castanhão, em torno de 25% no trimestre AMJ e um pouco acima de 20% no total do semestre.

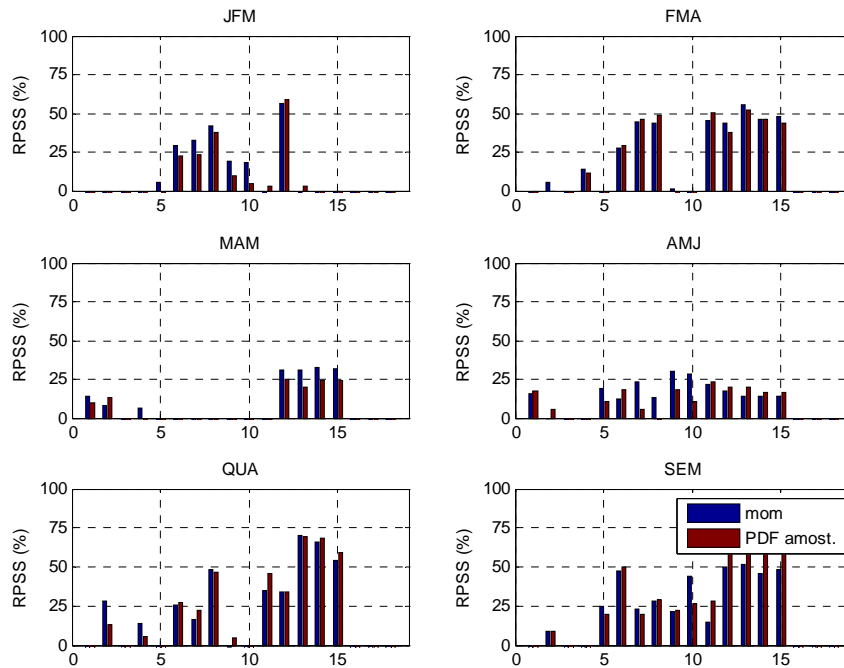


Figura 6: Resultados de RPSS (%) trimestral, da quadra chuvosa, e do primeiro semestre, no período de 2002 a 2005, para os 18 postos utilizados. Previsão realizada no mês de dezembro do ano anterior. Comparação do método de correção de viés, MOM (azul) e PDF amostral (vermelho).

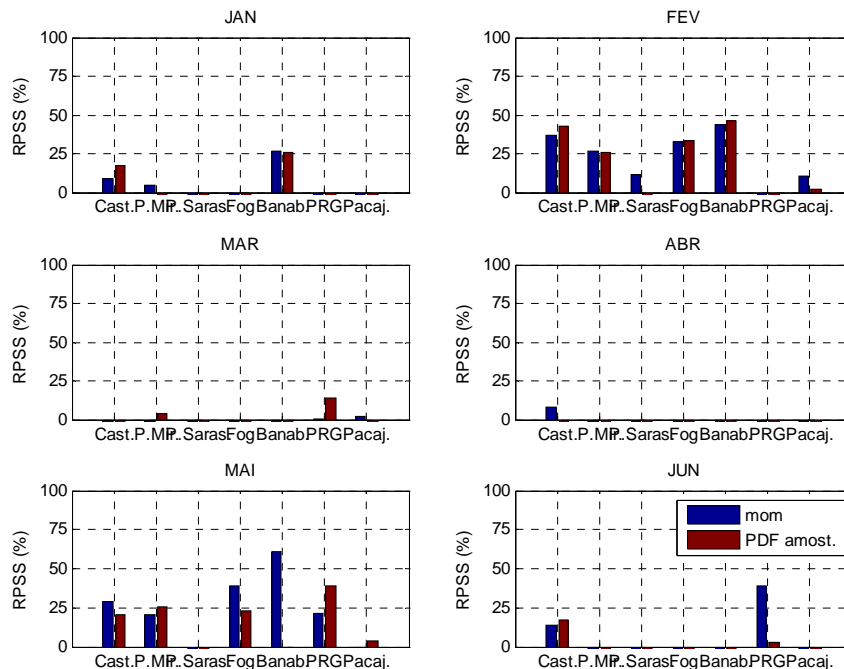


Figura 7: Resultados de RPSS (%) mensal, no período de 2002 a 2005, para os 7 reservatórios avaliados. Previsão realizada no mês de dezembro do ano anterior. Comparação do método de correção de viés, MOM (azul) e PDF amostral (vermelho).

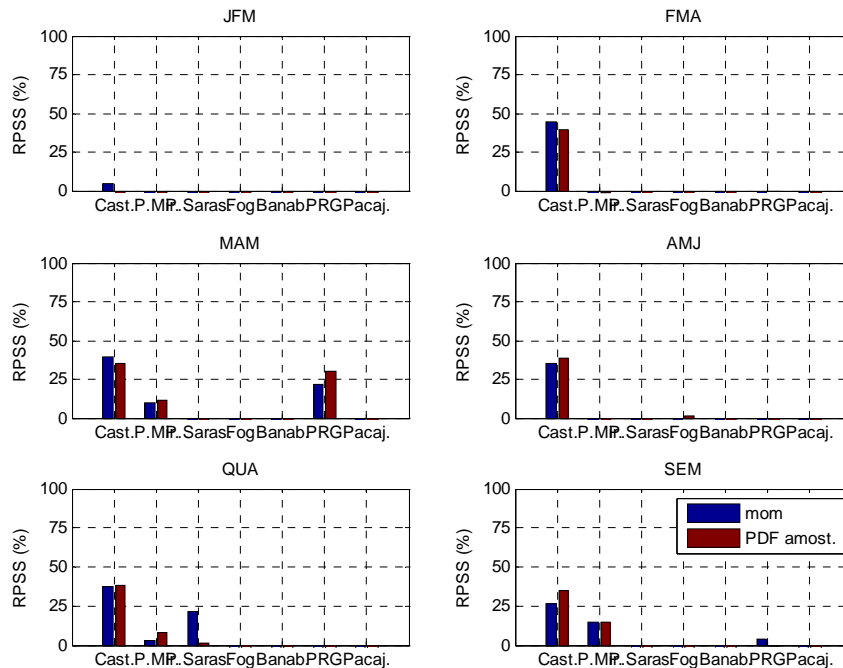


Figura 8: Resultados de RPSS (%) trimestral, da quadra chuvosa, e do primeiro semestre, no período de 2002 a 2005, para os 7 reservatórios. Previsão realizada no mês de dezembro do ano anterior. Comparação do método de correção de viés, MOM (azul) e PDF amostral (vermelho).

Embora a métrica RPSS dê uma idéia clara a respeito da qualidade das previsões quando comparadas com a climatologia, é conveniente e educativo recorrer a uma comparação visual entre as previsões obtidas pelos modelos numéricos de clima e a climatologia.

A Figura 9, apresentada a seguir, permite este tipo de comparação. Esta figura utiliza boxplots para representar os *ensembles* de previsão, em negrito, e a climatologia, em branco, das precipitações do mês de fevereiro e da quadra chuvosa para a bacia contribuinte ao reservatório Castanhão. Cada conjunto de três boxplots representa um ano de previsão. Os dois boxplots em negrito, localizados mais a esquerda, representam os *ensemble* obtidos com as correções de viés MOM e PDF amostral, respectivamente. Os gráficos também apresentam os limites das faixas de precipitação utilizadas para o cálculo do RPSS (em vermelho) e a precipitação observada em cada um desses anos (em azul).

Nota-se que a previsão fornece uma distribuição de probabilidades menos dispersa quando comparada com a climatologia, o que pode ser visto como resultado da incorporação de informação relevante oriunda dos modelos climáticos ao sistema. Além disso, pode-se observar que ao longo dos anos de 2002 a 2005 as distribuições de probabilidades relativas às previsões ficam mais próximas do valor observado do que a distribuição baseada na climatologia.

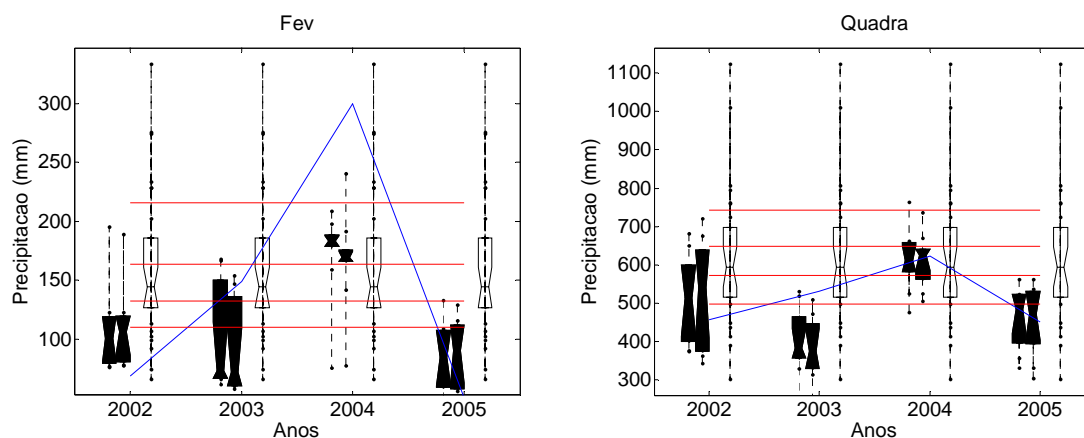


Figura 9: Boxplots da previsão para o Castanhão (Fevereiro e quadra chuvosa), emitida em Dezembro, com correção MOM (a esquerda) e PDF amostral (a direita), e Boxplot da climatologia (em branco). Precipitação observada em azul e limites de faixas utilizados no RPSS em vermelho.

5 – CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um estudo de avaliação da previsão de chuva por *ensemble* no Estado do Ceará, nas escalas mensal e sazonal, obtida com o modelo regional de clima RSM. Este estudo se enquadra num projeto maior, cujo objetivo principal é desenvolver metodologias para otimização da operação de reservatórios com uso de previsão de afluências na escala de clima.

O presente estudo foca na qualidade das previsões emitidas em dezembro para os totais mensais do primeiro semestre, e o total precipitado nos trimestres JFM, FMA, MAM e AMJ, na quadra chuvosa (Fev-Mai) e no semestre (Jan-Jun). A avaliação foi feita com base na chuva média nas bacias contribuintes a 18 postos fluviométricos e 7 reservatórios. Foram também avaliadas duas metodologias para correção de viés, comumente observados em previsão com modelos climáticos.

A qualidade da previsão foi avaliada através de duas métricas: a correlação entre a precipitação observada no período de 1971 a 2000 e a média do ensemble de previsão; e o *ranked probability skill score* (RPSS), que é capaz de utilizar toda a informação contida no ensemble para comparar o ganho que se tem em empregar modelos regionais quando comparados com a climatologia. O RPSS foi empregado na avaliação das previsões no período de 2002 a 2005

Os resultados mostraram que o modelo RSM possui uma boa capacidade de prever as chuvas de fevereiro (previsão emitida em dezembro) em todas as bacias estudadas, porém a qualidade da previsão varia no Estado. A região do Rio Salgado foi a que obteve os melhores resultados de RPSS (~55%), seguida de algumas bacias do Alto Jaguaribe (25-50%).

Como era de se esperar, a previsão de chuva na escala climática apresenta melhores resultados para os totais acumulados dos trimestres, com ênfase no FMA, pelo menos para a previsão emitida em dezembro, para a quadra chuvosa e para o semestre. O RPSS em alguns casos chegou a 70%. Em relação às bacias contribuintes aos reservatórios, as do Castanhão e Orós foram as que

obtiveram os melhores resultados de RPSS, variando entre 35% no Castanhão (Quadra) e 25% no Orós.

Os resultados não permitiram uma conclusão definitiva acerca da melhor metodologia para correção de viés. Em muitos casos os resultados foram muito similares, em outros a metodologia MOM obteve valores mais altos de RPSS, porém em um número quase igual de bacias a metodologia da PDF amostral se mostrou melhor. A previsão de vazões emitida pela Funceme emprega, no momento, a correção MOM.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FUNCAP e ao CNPq pelo financiamento do projeto “Uso de Previsão de Afluências na Operação de Reservatórios do Semi-Árido”.

BIBLIOGRAFIA

CHEN, M. R.E.DICKINSON, X. ZENG, A.N. HAHMANN (1996). “*Comparison of Precipitation Observed Over the Continental United States to that Simulated by Climate Model*”, Journal of Climate, 9, 2233-2249.

DAY, G.N., “Extended Streamflow Forecasting Using NWSRFS”, Journal of Water Resources Planning and Management, 111, 157-170, 1985.

EPSTEIN, E.S., “A Scoring System for Probability Forecast of Ranked Categories”, Journal of Applied Meteorology, 8, 985-987, 1969.

FEDDERSEN, H.; NAVARRA, A. & WARD, M.N (1999). “Reduction of Model Systematic Error by Statistical Correction for Dynamical Seasonal Predictions”, Journal of Climate, Vol. 12, July, 1974-1989.

FRANZ, K.J.; HARTMANN, H.C.; SOROOSHIAN, S & BALES, R. “Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for Water Supply Forecasting in the Colorado River Basin”. Journal of Hydrometeorology, Vol. 4, December, 1105-1118. 2003.

GAMBLE, J.L.; FURLOW, J.; SNOVER, A.K.; HAMLET, A.F.; MOREHOUSE, B.J.; HARTMANN H. E PAGANO, T. “Assessing the Impact of Climate Variability and Change on Regional Water Resources: The Implications for Stakeholders.” In: Water: Science, Policy, and Management: Challenges and Opportunities, 341-368. Eds. R. Lawford & S. Eden. American Geophysical Union, Washington D.C. 2003.

GRANTZ, K.; RAJAGOPALAN, B.; CLARK, M. & ZAGONA, E. “A Technique for Incorporating Large-scale Climate Information in Basin-scale Ensemble Streamflow Forecasts”. Water Resources Research, Vol. 41, W10410, doi:10.1029/2004WR003467, 2005.

- HARTMAN, H.C.; BRADLEY, A. & HAMLET, A. “*Advanced Hydrologic Predictions for Improving Water Management*”. In: *Water: Science, Policy, and Management: Challenges and Opportunities*, 285-307. Eds. R. Lawford & S. Eden. American Geophysical Union, Washington D.C. 2003.
- JUANG, H.-M.H. & M. KNAMITSU, “*The NMC nested Regional Spectral Model*”, *Mon. Wea. Rev.*, 122, 3-26, 1994.
- LETTENMAIER, D.P., “*The Role of Climate in Water Resources Planning and Management*”, In: *Water: Science, Policy, and Management: Challenges and Opportunities*, 285-307. Eds. R. Lawford & S. Eden. American Geophysical Union, Washington D.C. 2003.
- LEUNG, L.R., A.F. HAMLET, D.P. LETTENMAIER, A. KUMAR, “*Simulations of the ENSO Hydroclimate Signals in the Pacific Northwest Columbia River Basin*”, *Bull. Am. Soc.*, 80(11), 2313-2329, 1999.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Toward a New Advanced Hydrologic Prediction Service (AHPS)*. 104 p. The National Academies Press, Washington D.C. 2006.
- REIS, D.S.,JR, MARTINS, E.S., NASCIMENTO, L.S.V., COSTA, A.A., ALEXANDRE, A.M.B., “*Monthly Streamflow Forecasts for the State of Ceará, Brazil*”, In: *Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007)*. IAHS Publ. 313, 2007.
- SOUZA FILHO, F.A., LALL, U. (2002), “*Seasonal to Interannual Streamflow Forecasts for Ceara, Brazil: Applications of a Multivariate, Semiparametric Algorithm*”, *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 11, doi: 10.1029/2002WR001373.
- SUN, L., D.F. MONCUNILL, H. LI, A.D. MOURA, F.A. SOUZA FILHO, “*Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the NCEP RSM97*”, *Journal of Climate*, 18, 551-567, 2005.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. & COLLISCHONN, W. “*Long-term Flow Forecast Based on Climate and Hydrologic ModelingÇ Uruguay River Basin*”. *Water Resources Research*, Vol. 8, NO. 7, 1181, doi:10.1029/2003WR002074, 2003.
- WANG, Y., L.R. LEUNG, J.L. MCGREGOR, D.-K. LEE, W.-C. WANG, Y. DING, F. KIMURA, “*Regional Climate Modeling: Progress, Challenges, and Prospects*”, *Journal of Meteorological Society of Japan*, 82 (6), 1599-1628, 2004.
- WILKS, D.S., “*Forecast Verification*,” In: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 233-283, 1995.
- WOOD, A., E.P. MAURER, A. KUMAR, D. LETTENMAIER, “*Long-Range Experimental Hydrologic Forecasting for the Eastern United States*”, *Journal of Geophysical Research*, 107, NO. D20, 4429, doi:10.1029/2001JD000659, 2002.