

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO ÓROS USANDO OS MODELOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO IPCC-AR4 PARA O CENÁRIO A1B

Wescley de Sousa Fernandes¹; Cleiton da Silva Silveira²; Francisco de Assis de Souza Filho³;
Victor Costa Porto⁴ & Wictor Edney Dajtenko Lemos²

RESUMO – As projeções de vazões para a bacia do Óros (Ceará) foram obtidas usando as precipitações dos modelos globais do quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC-AR4) para o período de 2010 a 2099 do cenário A1B. As vazões foram geradas pelo modelo hidrológico *Soil Moisture Account Procedure* (SMAP), sendo inicializado por precipitações corrigidas estatisticamente a partir dos dados observados e por evaporações estimadas pelo método de *Penann-Mothieth*. Para analisar o impacto nas vazões médias anuais do século XXI foi avaliada a tendência das séries usando o método de Mann-Kendall-Sen. Para identificar a frequência de eventos extremos foram comparadas as curvas de distribuição de probabilidade acumulada do século XX e XXI. Para análise sazonal considerou-se a anomalia na climatologia média dos modelos do século XXI em relação ao século XX. A maioria dos modelos apresenta tendência significativa, porém divergem quanto sinal. Os modelos GISS_AOM_RUN1 e GISS_AOM_RUN2 indicam aumentos na quantidade de anos com vazões acima da média; enquanto os modelos CSIRO_MK3_0_RUN1, MIROC3_2_HIRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 indicam uma maior ocorrência de eventos secos. Os modelos divergem quanto ao sinal da anomalia na estação chuvosa e na pré-estação.

ABSTRACT – The projected flows for the Óros basin (Ceará) were obtained using the precipitation data of global models of the fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4) for the period 2010 to 2099 in the A1B scenario. The flows were generated by the "Soil Moisture Account Procedure" (SMAP) hydrologic model, and initialized by statistically corrected precipitation data from the observed data and estimated by the evaporation method Penann-Mothieth. To analyze the impact of annual average flow of the XXI century was evaluated the series trend using the Mann-Kendall-Sen method. To identify the extreme events, the frequency of the curves was compared with the probability distribution accumulated in the XX and XXI century. For seasonal analysis was considered the anomaly of climatological average in the XXI century models in relation to XX century. The most models show significant trend, but differ on the signal. The GISS_AOM_RUN1 and GISS_AOM_RUN2 models indicate increases in the amount of years with flows above the mean, while the models CSIRO_MK3_0_RUN1, MIROC3_2_HIRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 and MIROC3_2_MEDRES_RUN3 indicate a higher incidence of dry events. The models differ as to sign of the anomaly in the rainy season and in pre-season.

Palavras-chave: Orós, IPCC-AR4; Mudanças climáticas.

(1) Mestre em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: wescley_ufc@hotmail.com

(2) Doutorando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará. E-mail: cleitonsilveira16@yahoo.com.br; wictoredney@hotmail.com

(3) Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. Email: assis@ufc.br

(4) Graduando em engenharia civil, UFC. E-mail: victorporto_leao@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima semiárido com grande variabilidade temporal e espacial de chuvas (Molion & Bernardo, 2002). Pequenas flutuações, associadas às condições climáticas, provocam significativos impactos sociais e econômicos sobre a região, conforme descritos por Souza Filho & Moura (2006). Desta forma, identificar padrões de variação ou/e sinais de mudanças climáticas é de relevante importância, já que impacta os recursos hídricos, agricultura e outras áreas relevantes.

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima predominantemente semi-árido com intensa variabilidade temporal e espacial de chuvas (Molion e Bernardo, 2002; Albuquerque et. al, 2009), também apresentando altos índices de evaporação potencial, tudo isso associada historicamente a significativos impactos sociais e econômicos, apresentando frequentemente déficits hídricos que comprometem projetos e ações sociais. Desta forma, torna-se relevante para o desenvolvimento de políticas públicas a identificação das alterações na ocorrência do clima e na oferta de disponibilidade hídrica presente e futura.

Para formação de planos de gerenciamentos e de atuação no setor hídrico, o cálculo das vazões é um forte aliado, pois seus impactos refletem diretamente em setores cruciais, como agricultura, armazenamento de reservatórios, enchentes, etc. Tendo em vista essa considerável importância, torna-se relevante o aprimoramento de modelos hidrológicos e o detalhamento com possíveis melhoras para os parâmetros utilizados.

O Quarto Relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC-AR4) alerta para um aumento médio global das temperaturas entre 1,8°C e 4,0°C até 2100 (IPCC, 2007; Alley et al., 2007). Esse aumento pode ser ainda maior se a população e a economia continuarem crescendo rapidamente e se for mantido o consumo intenso dos combustíveis fósseis. Entretanto, a estimativa mais confiável indica um aumento médio de 3°C, assumindo que os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45 acima da taxa atual. Para a região Nordeste o aquecimento pode chegar a 4°C no cenário pessimista A2 e de 2 a 3°C no cenário otimista B2. Isto pode afetar a agricultura de subsistência regional, a irrigação, o setor hidroelétrico, etc., obrigando as populações a migrarem, gerando ondas de “refugiados do clima” (Avila, 2007).

Como forma de amenizar o problema da escassez de recursos hídricos no Nordeste, grandes obras de açudagem têm sido realizadas pelo poder público visando o abastecimento da população sertaneja e à irrigação de terras. O Nordeste brasileiro tem cerca de 70 mil açudes de superfície superior a 1.000 m². A alta variabilidade pluviométrica e a intensa evaporação da região fazem com que os açudes apresentem baixa profundidade (inferior a 10 metros, em média) e alta salinização da água, que limitam sua utilização na agricultura e no abastecimento.

A barragem Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira ou açude Orós, segundo maior açude do Ceará, tem capacidade de armazenamento de 2,1 milhões de metros cúbicos e drena uma área de 25.000 km². Fazê-lo perene surgiu como a alternativa mais viável para solucionar o problema da escassez de água no sertão cearense. No entanto, esta idéia só foi colocada em prática no século XX. Porém, surge ainda, o interesse em análises de gestão e alocação, para que se otimize a maior capacidade possível do açude Óros.

Diante disso, existe uma demanda pelo Estado Ceará e pelas empresas privadas de informações climáticas para tomada de decisão ao nível regional/local. Informações de variabilidade e mudanças climáticas de qualidade podem tornar o planejamento mais eficaz e minimizar os potenciais impactos sobre a disponibilidade deste recurso. A possibilidade de projetar variações climáticas com antecedência permite que as autoridades tomem decisões que ao menos minimizem os impactos de mudanças no clima, reduzindo assim o grau de vulnerabilidade do suprimento hídrico.

O objetivo deste trabalho é avaliar como as mudanças e/ou variabilidade climática estão afetando o balanço hídrico para a bacia do Óros utilizando as projeções do IPCC-AR4 e o modelo concentrado de chuva-vazão *Soil Moisture Account Procedure* (SMAP).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Região de Estudo

Construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, com a participação do consultor Eng^o Casemiro José Munarski e do Laboratório Hidrotécnico Saturnino de Brito S.A.A, a barragem Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira do Açude Orós está localizada no município de Orós, estado do Ceará, aproximadamente a 450 km de Fortaleza, com uma capacidade 2,1 milhões de metros cúbicos e drenando uma área de 25000 km², tem como finalidades: perenização do rio Jaguaribe; irrigação do Médio e Baixo Jaguaribe; piscicultura; culturas agrícolas de áreas de montante; turismo e aproveitamento hidrelétrico.

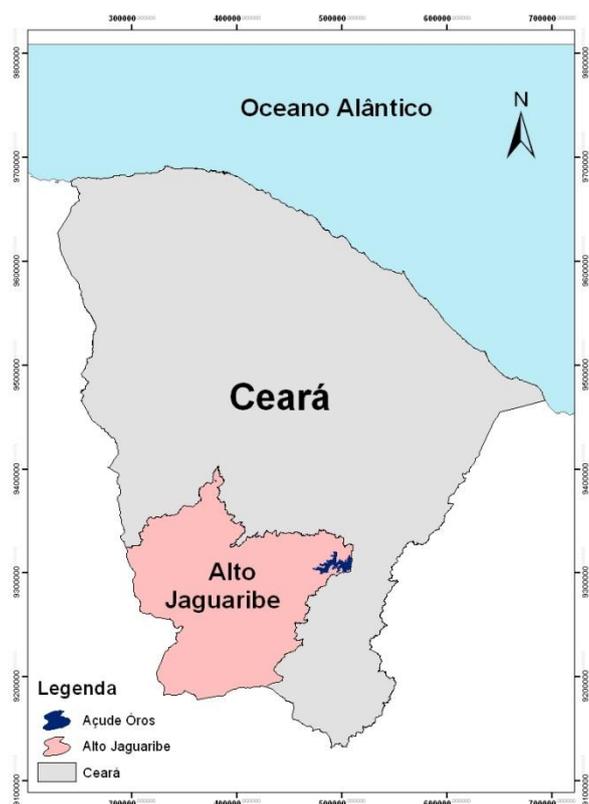


Figura 1 – Região de estudo, Bacia do Óros.

2.3. Modelos do IPCC-AR4

Os dados provenientes do IPCC são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuíram para esse relatório (conforme Tabela 1), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX (simulações 20C3M). Para este experimento foram usados apenas aqueles modelos que disponibilizaram temperatura máxima e mínima do ar, visto que o cálculo de evapotranspiração potencial sugerido neste trabalho (secção XXX) só seria possível usando essa informação.

Tabela 1 – Relação dos Modelos Globais do CMIP3.

| Designação do Modelo | Instituição ou Agência; País |
|-----------------------------|--|
| BCCR-BCM2 | <i>Bjerknes Centre for Climate Research, Universidade de Bergen; Noruega</i> |
| CCCMA-CGCM3 1-T63 | <i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis; Canadá</i> |
| CNRM-CM3 | <i>Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo France; França</i> |
| CONS-ECHO-G | <i>Meteorological Institute of the University of Bonn (Alemanha), Institute of KMA (Correia do Sul), and Model, and Data Group</i> |
| LASG-FGOALS-G1.0 | <i>LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 9804, Beijing 100029; China</i> |
| MRI-CGCM2.3.2 | <i>Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency; Japão</i> |
| NCAR-PCM | <i>National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF, DOE, NASA, e NOAA; Estados Unidos</i> |
| NIES-MIROC3.2-MED | <i>CCSR/NIES/FRCGC; Japão</i> |

2.3.1. Cenários do século XXI

Para avaliação das projeções para o século XXI para o Nordeste Setentrional do Brasil serão considerados os cenários A1B, A2 e B1.

O cenário A1 destaca um rápido crescimento econômico na primeira metade do século XXI associado com um declínio na segunda metade e a inserção de novas tecnologias (IPCC, 2007(a)).

A família A1 se divide em três grupos:

- A1F: aprimoramento da tecnologia com ênfase nos combustíveis fósseis;
- A1T: evolução da tecnologia a base de combustíveis não fósseis;
- A1B: sugere um equilíbrio entre as diversas fontes de energia.

O cenário A1B sugere um pico das emissões de gases estufa na metade do século XXI, seguido por uma tendência de redução na segunda metade do século XXI.

O cenário A2 projeta um crescimento contínuo da população associado um lento desenvolvimento tecnológico, isto implica em emissões acentuadas de dióxido de carbono. Este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases estufas.

O cenário B1 projeta um mundo com população global crescente a taxas inferiores ao A2 e soluções locais para sustentabilidade econômica, social e ambiental. O crescimento econômico é intermediário, considera um progresso tecnológico menos acelerado e diversificado. Esse cenário é considerado o mais otimista dos três avaliados, propõe um nível de emissões de gases estufas bem inferior aos cenários A1B e A2 no final século XXI. Para o presente trabalho será usado o cenário A1B.

2.4. Correção Gama

Um modelo probabilístico muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas, que apresentam versatilidade de formas, coeficientes de assimetria variáveis, é a distribuição gama. Com grandes números de aplicações bem sucedidas em modelagens de vazões, Hann (1977) destaca a distribuição gama não só para análises de vazão, mas também para análises de precipitação de duração diárias, semanais, mensais e anuais. Para o presente trabalho a correção estatística é feita nas séries das precipitações dos modelos do IPCC-AR4.

O cálculo de probabilidades da distribuição gama deve ser feito por aproximações numéricas, tais como descritas por Press et al (1986), ou por extensas tabelas estatísticas. Uma aproximação relativamente simples e que conduz a resultados satisfatórios faz uso da variável Gama normalizada por parâmetros de escala. Uma distribuição de probabilidade de tempo t para n -ésimas ocorrências de Poisson tem como função de densidade a equação 1, a qual é retratação da distribuição Gama para valores inteiros do parâmetro n . A densidade Gama resulta da soma de n

variáveis exponenciais independentes, cada qual com parâmetro λ ou, de modo equivalente, cada qual com parâmetro $\theta = 1/\lambda$. Em geral, o parâmetro n não necessita ser inteiro e, sem essa restrição, a função densidade da distribuição Gama passar a ter como expressão geral a equação 2.

Na qual, θ e n representam, respectivamente, os parâmetros de escala e forma; sinteticamente, indica-se que $X \sim \text{Ga}(\theta, n)$. Na equação 5.39, $\Gamma(n)$ denota o fator de normalização que obriga a área total da densidade ser igual a 1. Esse fator de normalização é expresso pela função *Gama completa* $\Gamma(\cdot)$, do argumento n , a qual é dada por pela equação 3.

Quando n é um número inteiro, a função Gama completa $\Gamma(n)$ é equivalente a $(n-1)!$. Press et AL (1986) descreveu propriedades matemáticas da função Gama para descrição de algoritmos para suas aproximações numérica. Quanto aos valores de n pode-se observar diversas tabelas estatísticas, pois a propriedade matemática $\Gamma(n+1) = n\Gamma(n)$ permite uma extensa quantidade de valores tabelados. A função de probabilidade acumulada da distribuição Gama é expressa pela equação 4, o que demonstra, pela integral, a não resolução analítica.

$$f_T(t) = \frac{\lambda^n t^{n-1} e^{-\lambda t}}{(n-1)!} \quad (1)$$

$$f_X(x) = \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{n-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta \Gamma(n)} \quad (2)$$

Para x, θ e $n > 0$

$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

$$F_X(x) = \int_0^x \frac{\left(\frac{x}{\theta}\right)^{n-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)}{\theta \Gamma(n)} dx \quad (4)$$

2.5 Métodos de Penann Motheith modificado

O modelo matemático de Penman Monteith para estimativa das necessidades hídricas das plantas encontrado em Allen et al. (1998), sendo a equação da evapotranspiração de referência (ET_0) dado por:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (5)$$

Onde, ETo é a evapotranspiração de referência (mm dia-1); Rn é a radiação líquida na superfície das culturas (MJ m2 dia-1); G é o fluxo de calor no solo (MJ m2 dia-1); T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s-1); es é a pressão da saturação de vapor (kPa); ea é a pressão de vapor atual (kPa); (es - ea) é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (kPa °C-1); γ é a constante psicrométrica (kPa °C-1).

A velocidade do vento, a radiação líquida, a pressão de vapor real ou atual e a temperatura máxima e mínima formam um conjunto de dados básicos para estimativa da ETo Penman Monteith FAO (EToPM). Através deste conjunto de dados é possível estimar diversas variáveis. Conforme equações a seguir:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{\text{atm}} \quad (6)$$

Onde, Patm é a pressão atmosférica (kPa)

$$P_{\text{atm}} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (7)$$

Onde, z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m)

$$\Delta = \frac{4098 \left(0,6108 \cdot \exp \frac{17,27 \cdot T}{T+237,3} \right)}{(T+237,3)^2} \quad (8)$$

Onde, exp é a base do logaritmo natural = 2,7183;

T é a média da temperatura do ar (°C);

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 \cdot T}{T+237,3} \quad (9)$$

Onde, e°(T) é a pressão de saturação de vapor em determinada temperatura do ar T (kPa);]

T é a temperatura do ar (°C);

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\text{max}}) + e^{\circ}(T_{\text{min}})}{2} \quad (10)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

Onde, Rns é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre (MJ m2 dia-1);

Rnl é a radiação de onda longa líquida que sai da superfície terrestre (MJ m2 dia-1).

$$R_{ns} = 1 - \alpha(R_s) \quad (12)$$

Onde, α é o albedo ou coeficiente de reflexão da cobertura vegetal, o qual assume o valor de 0,23 para a grama de referência hipotética (adimensional);

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{\text{maxK}}^4 + T_{\text{minK}}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (13)$$

Onde, σ é a constante de Stefan-Boltzmann (4,903 x 10-9 MJ.m2 dia-1); TmáxK é a temperatura máxima absoluta durante período de 24 h (°K); TmínK é a temperatura mínima absoluta durante

período de 24 h ($^{\circ}\text{K}$); R_s é a radiação solar medida ou calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} é a radiação de céu claro medida ou calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5}z)R_a \quad (14)$$

z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m);

R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

2.5 Modelo Hidrológico SMAP

O SMAP é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, no qual ocorre a calibração por meio de series de precipitação. Tecnicamente analisa-se a contribuição da umidade do solo, do nível de saturação do solo, baseado em reservatórios lineares que possam representar o solo como camada superior e um aquífero como uma camada inferior, e por meio de balanços hidrológicos fornecerem demandas de afluências. Inicialmente, para o determinado balanço hídrico, devemos realiza o cálculo do nível inicial do reservatório no solo ($RSOLO_{in}$):

$$RSOLO_{in} = TU_{in} \times SAT \quad (15)$$

Onde, $RSOLO_{in}$ é o nível inicial do reservatório, TU_{in} é a taxa inicial de umidade do solo, SAT é a saturação

A equação 1 pode ser lida:

$$TU_{in} = \left(\frac{RSOLO_{in}}{SAT} \right) \quad (16)$$

Em seguida, iremos para o cálculo de D_{solo} , por meio da equação:

$$D_{solo} = 0,5 \times (P - P \times TU_{in}^{PES} - EP \times TU_{in} - RSOLO_{in} \times CREC \times TU_{in}^4) \quad (17)$$

Onde, P é a precipitação, TU_{in} é a taxa inicial de umidade do solo, PES é o coeficiente relacionado a geração de escoamento superficial, EP é a evaporação potencial, $RSOLO_{in}$ é o nível inicial do solo, $CREC$ é o coeficiente de recarga do reservatório

Com a obtenção do D_{solo} pode-se calcular a taxa de umidade (TU), por meio da equação 4.

$$TU = \left(\frac{RSOLO + D_{solo}}{SAT} \right) \quad (18)$$

Onde, TU é a taxa variável de umidade do solo, $RSOLO$ é o nível variável do reservatório, SAT é a saturação. Para cada valor de precipitação (P) é feito um balanço de massa. Uma parte da precipitação é transformada em escoamento superficial (ES) calculado por:

$$ES = P \times TU^{PES} \quad (19)$$

Onde, ES é o escoamento superficial, P é a precipitação, TU é a taxa variável de umidade do solo, PES é o coeficiente relacionado à geração de escoamento superficial. A umidade deste

reservatório é atualizada ao longo do tempo devido às perdas por evapotranspiração real (ER), calculada pelo produto da evaporação potencial pela taxa de umidade do solo, demonstrado na equação 6.

$$ER = EP \times TU \quad (20)$$

Onde, ER é a evapotranspiração real, EP é a evaporação potencial, TU é a taxa variável de umidade do solo. Sendo essa taxa de umidade dada pela razão entre o nível do reservatório (RSOLO) e a saturação (SAT). O RSOLO é determinado pelo produto da taxa inicial da umidade do solo (SOLIN/TU_{in}), podendo ser calibrada, pela saturação. A saída deste reservatório é a recarga do aquífero (REC), que ocorrerá se RSOLO for maior que a retenção de água por capilaridade dada pelo produto da capacidade de campo (CAPC) pela saturação (SAT), corrigida de um coeficiente de recarga (CREC) a ser calibrado, dado pela equação 7, podendo-se assim, realizar o cálculo do nível do reservatório, fornecido pela equação 8.

$$REC = RSOLO_{in} \times CREC \times TU^4 \quad (21)$$

Onde, REC é a recarga do aquífero, RSOLO_{in} é o nível inicial do solo, CREC é o coeficiente de recarga do reservatório, TU é a taxa variável de umidade do solo

$$RSOLO = RSOLO_{in} + P - ES - ER - REC \quad (22)$$

Onde, RSOLO é o nível variável do reservatório, RSOLO_{in} é o nível inicial do solo, P é a precipitação, ES é o escoamento superficial, ER é a evapotranspiração real, REC é recarga do aquífero Seguimos com o cálculo do escoamento de base (EB), dado por:

$$EB = R_{subin} \times (1 - K_{corrigido}) \quad (23)$$

Onde, EB é o escoamento de base, R_{subin} é o nível inicial de água no subsolo. Sendo o reservatório subterrâneo considerado linear, onde o nível de água existente (RSUB) é deplecionado à taxa constante K, pela razão entre a vazão de base inicial, com RSUB_{in} e K calibrados por meio de recursos computacionais. A vazão total (em m³/s) é dada pelas equações seguintes, onde ES e EB são em mm, a área em km² e o TEMPO = 2630

$$K_{corrigido} = 0,5^{\left(\frac{1}{K}\right)} \quad (24)$$

Onde, K é a taxa de depleção do nível de água no subsolo

$$R_{sub} = R_{subin} - EB - REC \quad (25)$$

Onde, R_{sub} é o nível de água no subsolo, R_{subin} é o nível inicial de água no subsolo, EB é o escoamento de base, REC é recarga do aquífero

$$Q = (ES - EB) \times A / 2630 \quad (26)$$

Onde, ES é o escoamento superficial, EB é o escoamento de base e A é a área do reservatório

2.6 Análise das Projeções de vazões sazonais

A sazonalidade da precipitação é de grande relevância para a avaliação dos impactos do clima em recursos hídricos e agricultura na região. O início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas. Uma sensível mudança nos padrões da sazonalidade impacta diretamente estas duas importantes áreas. Adicionalmente pode-se avaliar que os totais de precipitação mensais e sua sazonalidade podem ser considerados como indicativos de mudanças ou não nos padrões dos sistemas geradores de chuvas e sua ocorrência.

Para o cálculo das anomalias sazonais são consideradas as projeções fornecidas pelos modelos globais do IPCC-AR4 para os cenários A1B, A2 e B1 no período de 2010 a 2099. Em seguida é feita uma comparação relativa à representação dos modelos para o cenário 20C3M (este cenário indica como os modelos do IPCC representam os padrões de variação do século XX) no período de 1901 a 1999.

2.7 Análise de tendência das vazões anuais

Para analisar a tendência do século XXI as séries de vazões anuais do cenário A1B do século XXI foram normalizadas com base nas características da série do cenário 20C3M de 1901 a 1999. Essa normalização segue a equação 3:

$$Z = \frac{X_{XXI}^j - \bar{X}_{20C3M}}{\sigma_{20C3M}} \quad (27)$$

Onde Z é a vazão do cenário do século XXI normalizada, X_{XXI}^j a vazão anual do cenário A1B para um ano j, \bar{X}_{20C3M} a vazão anual média do cenário 20C3M na série de 1901 a 1999 e σ_{20C3M} o desvio padrão da série de vazões anuais do cenário 20C3M.

Para as metodologias de avaliação de tendência/variabilidade foram utilizados os métodos clássicos de Mann-Kendall-Sen.

2.7.1. Métodos de Mann-Kendall-Sen

Os testes estatísticos podem ser classificados em paramétricos e não paramétricos (Naghetini & Pinto, 2007). Os testes paramétricos se baseiam na hipótese de que os dados amostrais foram obtidos a partir de uma população cuja distribuição seja conhecida ou previamente especificada. Já os testes não-paramétricos não necessitam da especificação do modelo distributivo da população, sendo formulados com base nas características da amostra. Segundo Xu et al. (2003), os testes não-paramétricos são mais robustos.

Nos testes de tendência, segundo Xu et al. (2003), a hipótese nula H_0 ocorre na ausência de tendência na série histórica. Já a hipótese não nula (H_1) ocorre quando existe uma tendência na série.

Se uma tendência linear está presente em uma série, a declividade (mudança por unidade de tempo) pode ser estimada usando o método não-paramétrico desenvolvido por Sen (1968) (Kahya & Kalayci, 2004).

No método de Sen são computados a declividade de N pares de dados através da equação 29:

$$Q_i = \frac{(x_j - x_k)}{(j - k)} \quad (28)$$

Para $i = 1, 2, \dots, N$.

Onde x_j e x_k são os valores de x nos períodos j e k respectivamente, com $j > k$. A mediana dos N valores de Q_i será a declividade de Sen. Se houver apenas uma referência em cada período de tempo, então:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (29)$$

Onde n é o tamanho da série. Se N for ímpar, a declividade de Sen será:

$$Q_{mediana} = Q_{(N+1)/2} \quad (30)$$

Se N for par, a declividade de Sen será:

$$Q_{mediana} = \frac{[Q_{(N)/2} + Q_{(N+2)/2}]}{2} \quad (31)$$

O valor de $Q_{mediana}$ é então testado através de um teste bicaudal com grau de confiança de $100(1 - \alpha) \%$ e a declividade estimada é obtida através de um teste não paramétrico (Kahya & Kalayci, 2004).

O teste de tendência de Man-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Kendall & Gibbons, 1990) é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como a de qualidade da água, vazões, temperatura e precipitação (Hamed, 2009).

No teste de Mann-Kendall, também conhecido por Kendall's tau (Kahya & Kalayci, 2004), assume-se que os dados estão aleatoriamente distribuídos, caso das séries históricas naturais.

O teste estatístico de Mann-Kendall é dado pela equação 9 (Burn et al, 2002):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Sgn(X_j - X_i) \quad (32)$$

Onde X_i e X_j são valores sequenciais, n é o tamanho da série e

$$Sgn(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \text{se } \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (33)$$

O teste de Mann-Kendall possui dois parâmetros importantes para a análise de tendência: o nível de significância α e a declividade β (Burn et al, 2002).

A declividade β é determinada por (Hirsch et al, 1982):

$$\beta = \text{Mediana} \left[\frac{(X_j - X_i)}{(j - i)} \right] \quad (34)$$

para todo $i < j$

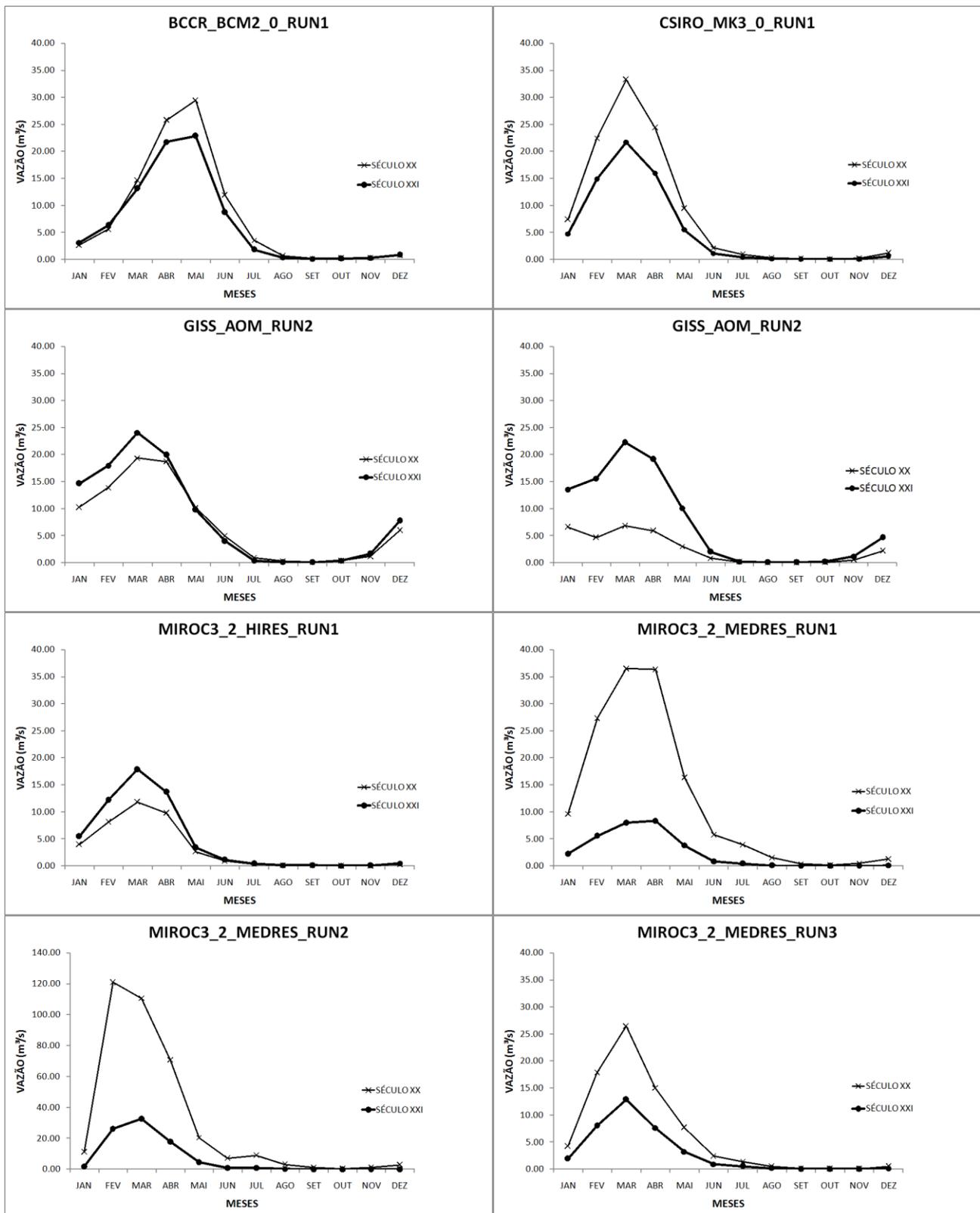
3. RESULTADOS

3.1. Projeções sazonais

Na figura 2 é mostrado o comportamento sazonal para vazões da bacia do Óros obtido por meio do modelo hidrológico SMAP, através da comparação entre a climatologia do século XX e do século XXI.

Os modelos BCCR_BCM2_0_RUN1, CSIRO_MK3_0_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 apresentaram valores climatológicos de vazão para o século XXI menores do que os valores climatológicos de vazão para o século XX. Para o modelo BCCR_BCM2_0_RUN1 os valores de vazão do século XXI começam a ser menores a partir do mês de fevereiro. No modelo CSIRO_MK3_0_RUN1 a maior significância de valores menores é observada na estação chuvosa. Os modelos MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 apresentam valores extremamente menores de vazão no século XXI comparado ao século XX, destacando-se o modelo MIROC3_2_MEDRES_RUN1 com uma diferença de até 100 m³/s, na estação chuvosa (mês de março).

Os modelos GISS_AOM_RUN1, GISS_AOM_RUN2 e MIROC3_2_HIRES_RUN1 apresentam valores de vazão maiores no século XXI em relação ao século XX, principalmente na estação chuvosa.



Figuras 2 - Figuras que representam a sazonalidade para o século XXI e para o século XX de vazões obtidas pelo modelo hidrológico SMAP inicializado com evaporações estimadas pelo método de Penann Motheith modificado e precipitações do IPCC-AR4 corrigidas estatisticamente

3.2. Projeções Interanual

Na tabela 2 é mostrada a tendência da vazão usando o modelo hidrológico SMAP para o método de Mann-Kendall-Sen. Os modelos GISS_AOM_RUN1 e GISS_AOM_RUN2 apresentaram tendência positiva, já os modelos CSIRO_MK3_0_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 apresentaram tendência negativa e os demais modelos não apresentaram tendência.

Tabela 2 - Tendência da vazão obtida pelo modelo hidrológico SMAP para o açude Óros no século XXI segundo o Teste de Mann-Kendall Sen.

| MODELOS do IPCC-AR4 | Vazão (%) | | |
|----------------------|-----------|-------|-------|
| | 2040 | 2070 | 2100 |
| bccr_bcm2_0_run1 | - | - | - |
| csiro_mk3_0_run1 | -13.8 | -27.6 | -62.1 |
| giss_aom_run1 | 15.9 | 31.8 | 71.5 |
| giss_aom_run2 | 26.6 | 53.2 | 119.8 |
| miroc3_2_hires_run1 | - | - | - |
| miroc3_2_medres_run1 | -2.6 | -5.3 | -11.8 |
| miroc3_2_medres_run2 | -3.0 | -6.0 | -13.4 |
| miroc3_2_medres_run3 | -4.7 | -9.3 | -20.9 |

- Ausência de tendência.

A maioria dos modelos indica tendência negativa para as vazões do século XXI, o impacto sinalizado por estes é de até máximo 62,1% até 2100. Enquanto os membros que indicam aumento de vazões sinalizam valores superiores a 100% até 2100. Isto indica uma grande margem de incerteza entre os modelos.

Na tabela 3 são mostrados as médias anuais, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) das séries de vazões dos modelos do IPCC-AR4 nos séculos XX e XXI para a bacia do Óros. Nota-se que o século XX apresenta série de vazões com menor dispersão do que o século XXI. Tanto para os modelos no século XX, como para quase todos os modelos no século XXI (exceto as três rodadas dos modelos MIROC3_2_MEDRES) não é observada nenhuma ocorrência significativa de variabilidade, fator demonstrado pela inferioridade dos valores de desvio padrão em relação à média. Para os modelos MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 pode-se observar uma variabilidade significativas, pois os valores de desvio padrão são superiores aos valores das médias.

Tabela 3 - Médias anuais, dos desvios padrões das médias anuais e do coeficiente de variação para os modelos do IPCC-AR4 para o aqúde Óros no século XX e no século XXI.

| MODELOS do IPCC-AR4 | Século XX | | | Século XXI | | |
|-----------------------------|-----------|---------------|-----|------------|---------------|-----|
| | Média | Desvio Padrão | CV | Média | Desvio Padrão | CV |
| bccr_bcm2_0_run1 | 8.1 | 4.4 | 0.5 | 6.7 | 4.5 | 0.7 |
| csiro_mk3_0_run1 | 8.9 | 4.7 | 0.5 | 5.6 | 4.2 | 0.8 |
| giss_aom_run1 | 5.7 | 2.8 | 0.5 | 6.7 | 3.1 | 0.5 |
| giss_aom_run2 | 2.1 | 1.8 | 0.9 | 7.0 | 2.9 | 0.4 |
| miroc3_2_hires_run1 | 2.8 | 2.0 | 0.7 | 4.3 | 3.2 | 0.7 |
| miroc3_2_medres_run1 | 12.1 | 6.3 | 0.5 | 2.6 | 3.2 | 1.2 |
| miroc3_2_medres_run2 | 30.8 | 17.2 | 0.6 | 7.4 | 7.6 | 1.0 |
| miroc3_2_medres_run3 | 6.6 | 4.8 | 0.7 | 3.2 | 3.9 | 1.2 |

Na figura 2 são mostradas as curvas das funções de distribuição acumulada para vazões obtidas pelo modelo hidrológico SMAP. Para a análise das curvas da função distribuição de probabilidade é observado que os modelos GISS_AOM_RUN1, GISS_AOM_RUN2 e MIROC3_2_HIRES_RUN1 indicam anos com vazões extremas para o século XXI maiores do que para o século XX. Enquanto os modelos BCCR_BCM2_0_RUN1, CSIRO_MK3_0_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2, MIROC3_2_MEDRES_RUN3 indicam uma maior ocorrência de eventos secos, dentre estes, os modelos MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 apresenta um significativo distanciamento dos eventos do século XX, principalmente o modelo MIROC3_2_MEDRES_RUN2. Nos modelos que sugerem eventos molhados para o século XXI em relação ao século XX o modelo GISS_AOM_RUN2 demonstra uma maior probabilidade de eventos molhados no século XXI.

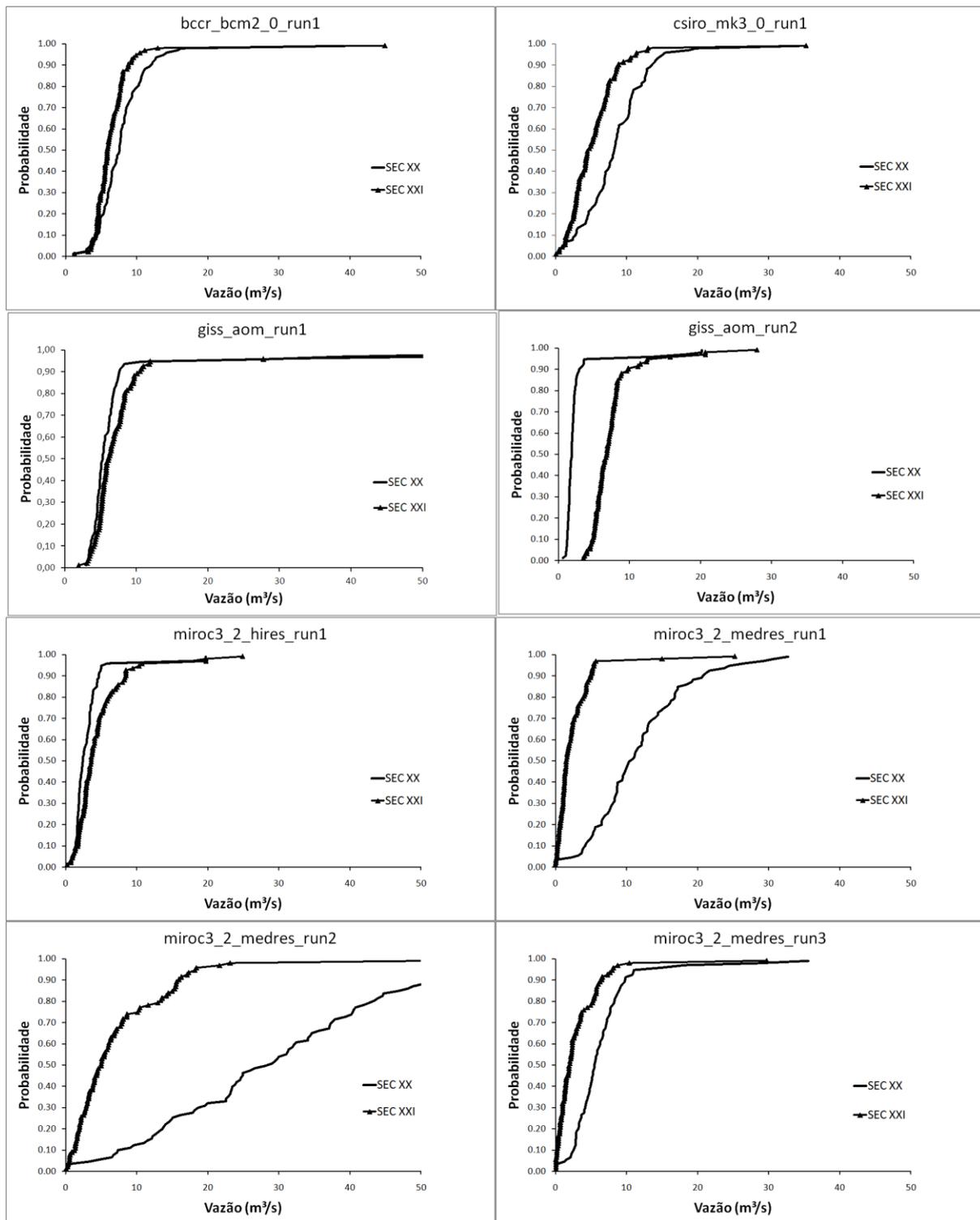


FIGURA 2 - Curvas das funções de distribuição acumulada (CDF) para vazões corrigidas obtidas pelo modelo hidrológico SMAP inicializado com evaporações potenciais estimadas pelo método de Penann-Motheith modificado.

4. CONCLUSÕES

Os modelos do IPCC divergem quanto o futuro das vazões na bacia do Óros, esse espalhamento pode estar associado à própria incerteza proveniente dos fenômenos meteorológicos que envolvem as variáveis provenientes dos modelos globais (a atmosfera é um sistema caótico, Lorenz, 1963 e 1965) e/ou má representação dos fenômenos micro e meso-escala que precisam ser resolvidos numa grade de melhor resolução.

Os modelos possuem dificuldade de representar a variabilidade da série histórica da bacia do Óros tanto para o século XX, como para o século XXI, fator demonstrado pelo baixo coeficiente de variação. Os modelos MIROC3_2_MEDRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN2 e MIROC3_2_MEDRES_RUN3 indicam aumento da variabilidade entre o século XX e o século XXI.

Dos 8 modelos analisados 3 apresentam maior frequência de eventos secos (com destaque para o modelo GISS_AOM_RUN2), e os modelos MIROC3_2_HIRES_RUN1, MIROC3_2_MEDRES_RUN1 e MIROC3_2_MEDRES_RUN2 apresentam uma frequência de eventos mais úmidos e 2 modelos (BCCR_BCM2_0_RUN1 e GISS_AOM_RUN1) não apresentaram impacto significativo na frequência de eventos extremos.

As divergências dos modelos globais do IPCC-AR4 quanto às projeções interanuais e sazonais demonstram um alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de precipitação, evaporação e vazão na bacia do Óros. Podendo ser usada para adoção de políticas e gestão em nível de agricultura, recursos hídricos e outras áreas correlacionadas.

Obviamente, projeções com menos incertezas seriam mais interessantes para os tomadores de decisão, no entanto isto não ocorre nas projeções dos modelos do IPCC-AR4 para esta região. Estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiration: **guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper

AVILA, A. M. HEUMINSK., **Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC(2007)**: Universidade Estadual de Campinas

- BURN, D. H., ELNUR, M. A. H., **Detection of hydrologic trends and variability.** *Journal of Hydrology* 255 (2002), 107-122;
- HAMED, K. H., **Exact distribution of the Mann-Kendall trend test statistic for persistent data.** *Journal of Hydrology* 365 (2009), 86-94;
- HELSEL, D. R., HIRSCH, R. M., **Statistical Methods in Water Resources.** In: Hydrologic Analysis and Interpretation. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations Book 4, Chapter A3. 2002;
- HIRSCH, R. M. SLACK, J. R., SMITH, R. A., **Techniques of trend analysis for monthly water quality data.** *Water Resources Research* 18 (1982), 107-121;
- KAHYA, E., KALAYCI, E., **Trend analysis of streamflow in Turkey.** *Journal of Hydrology* 289 (2004), 128-144;
- KENDALL, M. G., **Rank Correlation Measures.** Ed. Charles Griffin. London, 1975;
- KENDALL, M. G., GIBBONS, J. D., **Rank Correlation Methods.** 5^a ed. Ed. Griffin. London, 1990;
- MANN, H. B., **Non-parametric tests against trend.** *Econometrica* 13, 245-259;
- MOLION, L. C. B; BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro (RJ), v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MORAES J. M., GENOVEZ A. M., MORTATTI, J., BALLESTER, M.V., MARTINELLI, L. A. & VICTORIA, R. L. **Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do Rio Piracicaba.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2 (2): 65-79, 1997.
- NAGHETTINI, M., PINTO, É. J. de A., **Hidrologia Estatística.** CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte, 2007;
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T., and Flannery, B. P.: 1986, **Numerical Recipes - The art of scientific computing**, Cambridge University Press, New York, NY 10011, USA, first edition
- SOUZA FILHO, F.A.;MOURA,A.D.**Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos.** Fortaleza:Banco do Nordeste do Brasil; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 332p.,2006
- XU, Z. X., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H., **Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation.** *Journal of Hydrology* 279 (2003) 144-150;
- WALPOLE, R. E., MYERS, R. H.,MYERS, S. L. & YE, K., **Probability & Statistics for Engineers &Scientistis.** 8^aEdição.Editora Pearson–Prentice Hall.New Jersey, 2007.