

Análise das projeções de vazões nas bacias do setor elétrico brasileiro usando dados do IPCC-AR4 para o século XXI

Cleiton da Silva Silveira

Universidade Federal do Ceará - *cleitonsilveira16@yahoo.com.br*

Francisco de Assis de Souza Filho

Universidade Federal do Ceará - *assisouzaofilho@gmail.com*

João Eduardo G. Lopes

Universidade Estadual de Campinas - *jelopes1@gmail.com*

Paulo Sergio Franco Barbosa

Universidade Estadual de Campinas - *franco.barbosa@gmail.com*

Rafael Oliveira Tiezzi

Universidade Estadual de Campinas - *cleitonsilveira16@yahoo.com.br*

Recebido: 30/07/13 - revisado: 10/02/14 - aceito: 11/06/14

RESUMO

As projeções de vazões para as bacias brasileiras que possuem plantas produtoras de hidroeletricidade foram obtidas usando as precipitações dos modelos globais do CMIP3 (utilizados no quarto relatório do Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC-AR4) para o período de 2010 a 2099 dos cenários A1B, B1 e A2. As vazões foram geradas a partir desta chuva pelo modelo hidrológico Soil Moisture Account Procedure (SMAP), sendo inicializado por precipitações corrigidas estatisticamente a partir dos dados de chuva mensal do Climatic Research Unit (CRU) e por evaporações estimadas pelo método de Penann-Moethieth. Foram analisados os impactos percentuais nas vazões médias anuais para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099 em comparação ao período de 1931 a 1999. Os modelos do IPCC-AR4 convergem quanto ao impacto no setor elétrico na região sudeste/centro-oeste e Sul, mostrando que possivelmente as vazões devem reduzir em até 5% em cada período de 30 anos em Furnas e aproximadamente 4% até o final do século em Itaipu. Quanto aos setores Norte e Nordeste a divergência entre modelos indica bastante incerteza nestas regiões, porém sugerem uma margem na qual o planejamento de infraestrutura deve ocorrer. As divergências dos modelos IPCC-AR4 quanto às projeções demonstram grande incerteza. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de vazões e podem ser consideradas na adoção de políticas de gestão.

Palavras Chave:

INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é basicamente constituída por energias consideradas limpas, principalmente provenientes de hidroelétricas. A hegemonia da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira impõe cautelosa análise sobre o regime fluvial e seus padrões de variação temporal, tendo em vista o significativo impacto que estas variações podem produzir na oferta de energia, e consequentemente, em toda a economia nacional (ALVES et al., 2013).

Diante disso, existe uma demanda pelo Estado e pelas empresas privadas por informações climáticas para tomada de decisão ao nível regional/local. Informações de variabilidade e mudanças climáticas de qualidade podem tornar o planejamento energético mais eficaz e minimizar os potenciais impactos sobre a disponibilidade deste recurso (BANCO MUNDIAL, 2010).

O processo de planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro é composto, dentre outras atividades, por simulações computacionais de configurações futuras do sistema de energia elétrica que se baseiam em previsões e projeções (COSTA et al., 2007). Nestas simulações se busca localizar

e mensurar necessidades elétricas e energéticas futuras, com intuito, principalmente, de permitir a segurança do suprimento e a minimização dos custos de investimento e operação. O planejamento energético da expansão da oferta de energia elétrica deve ser ajustado de forma a atender às projeções de consumo de energia, considerando níveis de garantia de suprimento adequados e ao menor custo possível.

Neste sentido, projeções de precipitação e vazão fornecem informações importantes para o setor hidrelétrico, pois podem definir os possíveis impactos sofridos na geração de energia. Além disso, a possibilidade de projetar variações e/ou mudanças climáticas com antecedência permite que as autoridades tomem decisões que minimizem os impactos de mudanças no clima, reduzindo assim o grau de vulnerabilidade do suprimento de energia nacional. O planejamento adequado pode reduzir os impactos sociais e econômicos em diversos setores, como por exemplo, os decorrentes do episódio do “apagão” no setor elétrico brasileiro. Desta forma, torna-se relevante para o desenvolvimento de políticas públicas a identificação das alterações na ocorrência do clima e os possíveis impactos no regime de vazões.

As mudanças e variabilidade climáticas têm sido alvo de discussões e pesquisas científicas em todo mundo com vistas ao entendimento de sua ocorrência (IPCC, 2007(a); NOBRE, 2005; SILVEIRA et al., 2013(a); MARENGO; SOARES et al., 2005; MARENGO; VALVERDE, 2007). O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é o principal órgão científico internacional para as avaliações das alterações climáticas, e foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) em 1988, para fornecer visões científicas claras sobre o estado atual do conhecimento das mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais (IPCC).

Desde 1988, quando foi criado o IPCC, cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima têm se reunido para publicar relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas. Até o momento, foram publicados quatro relatórios: em 1990 em Sundsvall (Suécia), 1995 em Roma (Itália), 2001 em Acra (Gana) e 2007 em Paris (França).

O quarto relatório fornecido pelo IPCC, divulgado em fevereiro de 2007, confirma a projeção de aumento da temperatura média da atmosfera. Dados evidentes de mudanças globais foram apresentados no AR4, em decorrência do aumento da concentração dos gases de efeito estufa a partir de atividades humanas. As concentrações de dióxido de carbono (CO_2), de gás metano (CH_4) e de óxido nitroso (N_2O) ultrapassaram os valores pré-industriais. Os indicadores de mudanças climáticas mostrados por esse relatório foram o aumento da temperatura global, aumento do nível do mar e a redução da cobertura de gelo. Estas alterações afetam diretamente o ciclo hidrológico e podem afetar as vazões obtidas no setor hidroelétrico.

Vários estudos foram realizados com o objetivo de verificar as influências das mudanças climáticas nos recursos hídricos, empregando os resultados dos cenários e modelos de circulação geral e regional criados pelo IPCC, acoplando esses resultados ao modelo hidrológico, ou apenas criando cenários hipotéticos de modificações climáticas (FERNANDES, 2012; MILLY et al., 2005; TOMASELLA et al., 2009).

Milly et al. (2005) utilizaram resultados de simulações de 12 modelos climáticos em estudo que utilizou cenário de emissão A1B do CMIP3 e projeções para o período 2041-2060. Os resultados mostraram que há concordância dos modelos para o aumento da vazão (entre 10% e 40% - valores médios dos 12 modelos) na bacia do Paraná-Prata e redução da vazão (até 20% - valores médios dos 12 modelos) no leste da Amazônia e Nordeste do Brasil.

Tomasella et al. (2009) apresentaram simulações para a bacia do rio Tocantins, para o cenário A1B do CMIP3, usando o modelo regional ETA (com resolução 40 km) com condições de contorno do modelo global *Hadley Centre* (HadCM3). As séries de precipitação e temperatura do ar foram utilizadas como dado de entrada para o Modelo hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH). Para o período de 2080-2090, a redução da vazão na bacia é da ordem de 30%, com a possibilidade de alcançar até 60% no período de estiagem. Segundo os autores, o estudo indica que o impacto não é uniforme para o ano inteiro e que pode variar a depender das características físicas da sub-bacia

analisada.

Já no trabalho de Mello et al. (2008), foi realizado o *downscaling* das precipitações mensais para os anos de 2001 a 2099 para a bacia hidrográfica do rio Paracatu, simulados pelo modelo de circulação geral do HadCM3. As precipitações interpoladas serviram como entrada em um modelo do tipo precipitação-vazão, que possibilitou a estimativa das vazões mínimas em 21 estações fluviométricas distribuídas na bacia. Para o cenário A2, verificou-se tendência de aumento na disponibilidade hídrica em todas as estações fluviométricas, variando de 31 a 131% até 2099. Para o cenário B2, não foi verificada nenhuma tendência significativa.

Dentre os modelos conceituais disponíveis para a realização de estudo de séries hidrológicas com intervalo de tempo mensal, de distribuição livre e código aberto, destacam-se os modelos concentrado *Soil Moisture Accounting Procedure* - SMAP (LOPES et al., 1981) e o modelo semi-distribuído para Grandes Bacias - MGB (COLLISCHONN et al., 2007). No entanto, segundo Guilhon et al. (2007), apesar do modelo MGB possuir uma melhor representação dos processos dinâmicos da água no solo, ele requer um número muito maior de informações, e seus resultados para as bacias dos rios Paraná e Paranaíba foram muito próximos dos resultados obtidos com as previsões do modelo SMAP.

O objetivo deste trabalho é analisar as projeções dos modelos globais do CMIP3 (publicados pelo quarto relatório do IPCC-AR4) para os cenários A1B, A2 e B1 para o século XXI, buscando identificar tendências nas variações interanuais e mudanças na sazonalidade nas bacias que compõem o setor elétrico do Brasil utilizando o modelo hidrológico SMAP.

2. METODOLOGIA

A metodologia divide-se, basicamente, em três etapas. A primeira consiste em obter as evapotranspirações potenciais a partir dos modelos do IPCC-AR4, usando o método de *Penman-Motheith*. A segunda consiste na obtenção das precipitações dos modelos para bacia de interesse usando interpolação para uma grade de pontos pré-definida em cada bacia, para posterior correção estatística para remoção de viés usando a função de distribuição gama. Já na terceira etapa obtém-se as vazões usando o modelo hidrológico SMAP, tendo como dados de entrada as evapotranspirações e precipitações corrigidas. Desta forma, a partir da estimação das variáveis evapotranspirações, precipitação e vazão, é possível quantificar a sensibilidade da oferta à variabilidade e as (às) mudanças climáticas.

2.1. Região de Estudo

Na Figura 1 são mostradas as bacias monitoradas pelo Operador Nacional de Sistemas (ONS). Com exceção da bacia de Santo Antônio, todas estão completamente inseridas em território brasileiro. O amplo sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil - Sistema Interligado Nacional (SIN) - implica numa grande diversidade de regiões, que possuem influências climáticas de vários fenômenos meteorológicos.

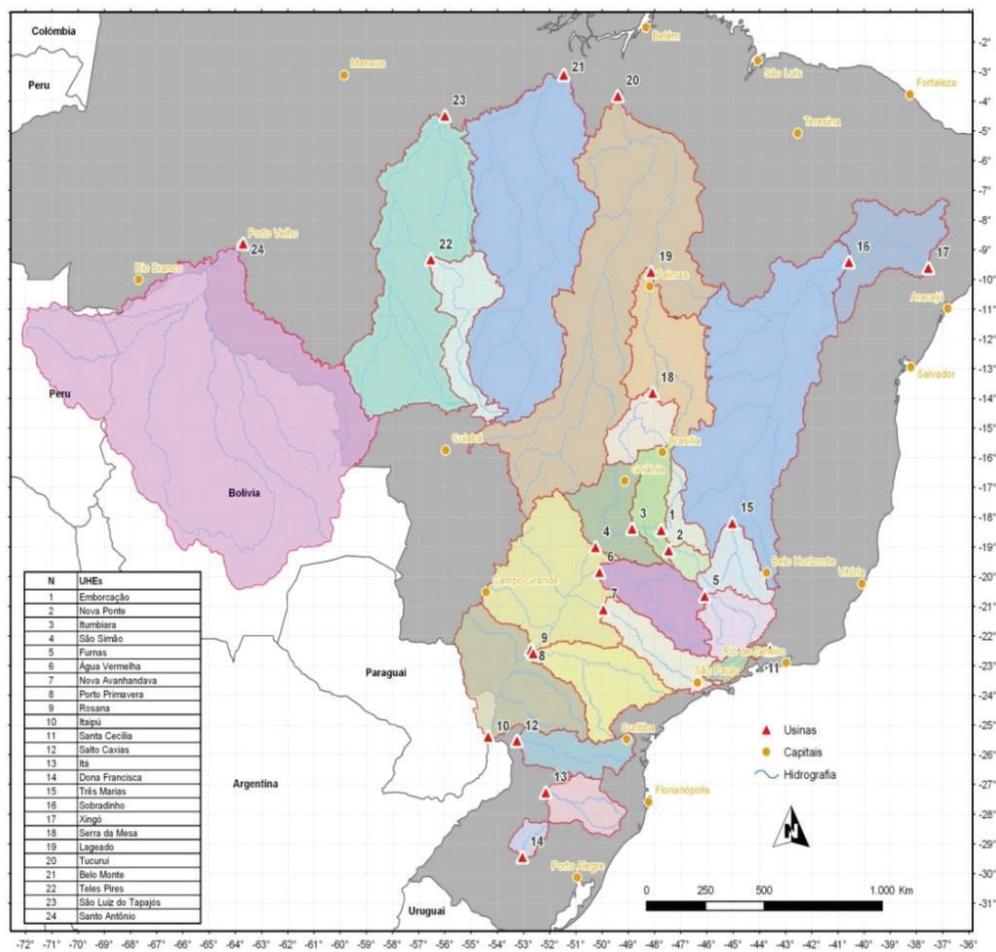


Figura 1 - Bacias do setor elétrico brasileiro utilizadas no trabalho

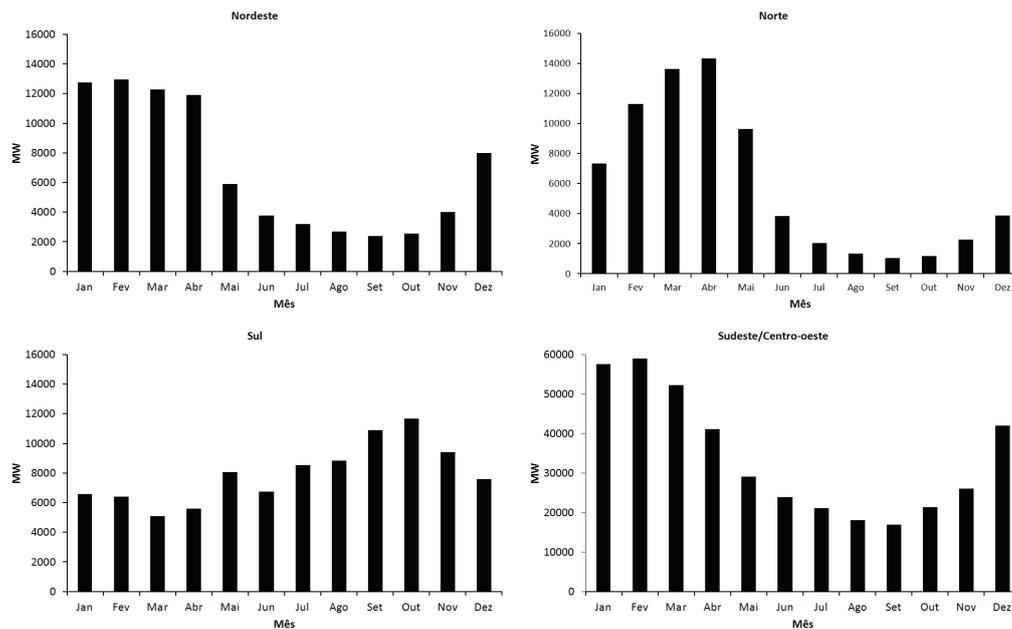


Figura 2 – Energia Natural Afluente em MW (a unidade usada é relação entre a energia gerada e o tempo de funcionamento das instalações) dos sub-sistemas do setor elétrico brasileiro no período de 2002 a 2011. Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)- http://www.ons.org.br/historico/energia_natural_afluente_out.aspx#

Devido a isso, várias bacias possuem comportamentos sazonais distintos (conforme Figura 2), a fim de se aproveitar ao máximo os recursos energéticos existentes no País e a sazonalidade hidrológica própria de cada região. O sistema é dividido em quatro subsistemas: Região Sudeste/Centro-Oeste, Região Sul, Região Norte e Região Nordeste. Estes subsistemas são interligados por uma extensa malha de transmissão que possibilita a transferência de excedentes energéticos e permite a otimização dos estoques armazenados nos reservatórios das usinas hidroelétricas.

Na Figura 2 é mostrada a energia natural afluenta para os quatro subsistemas do SIN. Existe uma complementariedade hidrológica existente entre as Regiões Sudeste/Centro-Oeste e Sul. A distribuição das energias naturais afluentes médias mensais mostra que os respectivos períodos secos e úmidos não são coincidentes nessas regiões. A natureza do Sistema Interligado Nacional faz com que exista um acoplamento espacial e temporal das decisões tomadas na sua operação energética.

O setor Nordeste é formado pelas bacias de Sobradinho e Xingó. O Nordeste brasileiro possui um ciclo anual bem definido de precipitações, onde predominam dois períodos distintos: o período de chuva e o período seco (CAVALCANTI et al., 2009). O período chuvoso concentra-se entre dezembro e julho e o principal sistema produtores de chuva é a zona de convergência intertropical-ZCIT seguido de sistemas secundários tais como: linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala e efeitos de brisas, proximidade das frentes frias e os vórtices ciclônicos de ar superior.

O setor Norte é formado pelas bacias Serra da Mesa, Lajeado, Tucuruí, Belo Monte, Teles Pires, São Luiz do Tapajós e Santo Antônio. A sazonalidade da região Norte é praticamente coincidente com a região Nordeste, onde, durante o período chuvoso, as vazões de Tucuruí são extremamente elevadas, indicando que parte da energia gerada pode ser levada para outra região. O principal sistema climático causador de chuvas que influencia nessa região é a zona de convergência do Atlântico Sul.

A região Sudeste/Centro-oeste é a de maior demanda do país e importar energia de outras regiões a maior parte do ano. A região Sudeste é composta pelas bacias: Emborcação, Nova Ponte, Itumbiana, São Simão, Furnas, Água Vermelha, Nova Avanhandava, Porto Primavera, Rosana, Santa Cecília, Três Marias. Esta região também é bastante influenciada pela zona de convergência do Atlântico Sul.

A região Sul é formada pelas bacias de Itaipú, Salto Caxias, Itá e Dona Francisca. Esse setor possui grande variabilidade de armazenamento e a região Sudeste/Centro-oeste é extremamente dependente desta região. Esta região é bastante influenciada por frentes frias.

2.2. Dados observacionais

A base de dados observacionais utilizadas para fazer a correção estatística gama para precipitação é proveniente da *University of East Anglia/Climate Research Unit* (CRU) (NEW et al., 1999; NEW et al., 2001) e os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O conjunto de dados do CRU corresponde à precipitação mensal entre os anos de 1931 e 1999, com resolução de 0,5 graus para o continente, sendo usado para a correção estatística dos modelos globais do IPCC-AR4. Enquanto os dados do INMET correspondem à série de precipitações mensais de 1997 a 2007, sendo utilizado para a validação e calibração dos parâmetros do modelo chuva-vazão.

2.3. Modelos do IPCC

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

Tabela 1 - Relação dos modelos Globais do CMIP3

Designação do Modelo	Instituição ou Agência; País	Cenários disponíveis	Rodadas disponíveis
BCCR-BCM2	<i>Bjerknes Centre for Climate Research, Universidade de Bergen; Noruega</i>	A1B e B1	<i>run1</i>
CSIRO-MK3	<i>CSIRO; Austrália</i>	A1B e B1	<i>run1</i>
INM-CM3.0	<i>Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science; Rússia</i>	A1B, B1 e A2	<i>run1</i>
GISS-AOM	<i>Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS); Estados Unidos</i>	A1B e B1	<i>run1</i>
MIROC3.2-HIRES	<i>CCSR/ NIES/ FRCGC; Japão</i>	A1B e B1	<i>run1</i>
MIROC3.2-MEDRES	<i>CCSR/ NIES/ FRCGC; Japão</i>	A1B, B1 e A2	<i>run1, run2 e run3</i>

usados apenas aqueles modelos que disponibilizaram temperatura máxima e mínima do ar, visto que o cálculo de evapotranspiração potencial sugerido neste trabalho (seção 2.5) só seria possível usando essa informação.

2.3.1 Cenários do século XXI

Para avaliação das projeções para o século XXI 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.

2.4. O modelo SMAP

O modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* – SMAP (LOPES et al., 1981) é do tipo conceitual, determinístico e de estrutura concentrada. Este modelo faz parte da grande família dos modelos hidrológicos de cálculo de umidade do solo. Sua estrutura é relativamente simples, cujos parâmetros são relacionados com parâmetros físicos médios da bacia.

O SMAP, em sua versão mensal, utiliza em seu esquema conceitual dois reservatórios lineares representando o solo (camada superior) e o aquífero, como pode ser visualizado na Figura 3a. A cada evento de precipitação (P) é realizado um balanço de massa. Uma parcela de (P) é transferida como escoamento superficial (Es). Este cálculo é feito através da equação do “*Soil Conservation Service*” (SCS) para escoamento superficial. A lâmina restante da precipitação subtraída do escoamento superficial ($P - E_s$) sofre perda por evaporação em nível de evaporação potencial (E_p), logo a lâmina remanescente ($P - E_s - E_p$) é adicionada a um reservatório que representa a camada superior do solo. Neste, a umidade é atualizada ao longo do tempo através das perdas por evapotranspiração real (E_r) que dependem do nível do reservatório (R_{solo}) e da capacidade de saturação do solo (Sat). Outra saída deste reservatório é a recarga no reservatório subterrâneo (Rec) onde é utilizado o conceito de capacidade de campo ($Cape$) para determiná-la. Este terceiro reservatório também é linear e o nível de água existente (R_{sub}) é deplecionado a uma taxa constante de recessão do escoamento básico (K), resultando em escoamento básico (Eb). A soma do escoamento superficial e básico fornece a vazão no ponto de controle da bacia.

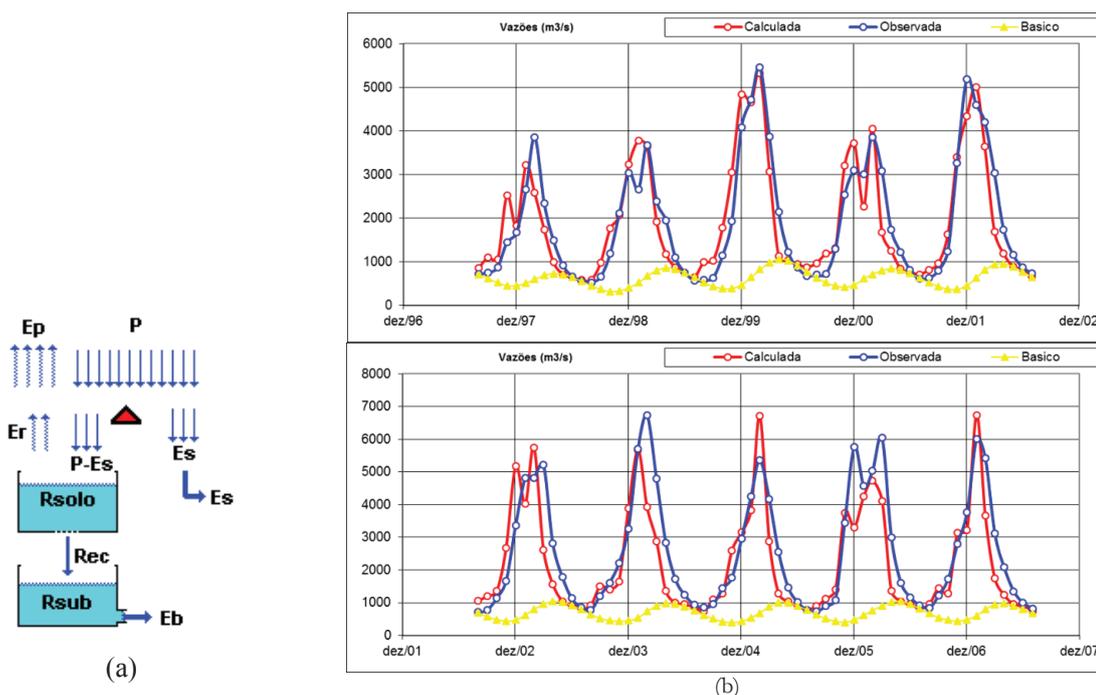


Figura 3 –(a)Esquema conceitual do modelo chuva-vazão SMAP. (b)Gráfico de calibração e validação do modelo SMAP no rio Teles Pires

O SMAP mensal possui quatro parâmetros: capacidade de saturação do solo (Sat); parâmetro que controla o escoamento superficial (PEs); coeficiente de recarga, parâmetro relacionado com a permeabilidade na zona não saturada do solo (Crec); taxa de deplecionamento (K) do nível (Rsub) que gera o escoamento de base (Eb); Outras duas variáveis de estado precisam ter seus valores inicializados: taxa de umidade do solo inicial (TUin) que determina o nível inicial do reservatório do solo (Rsolo); valor do escoamento de base inicial (EBin) que define o valor inicial do reservatório subterrâneo (Rsub).

Nesta aplicação o modelo SMAP teve desempenho satisfatório. Em intervalo de tempo mensal o modelo trabalha com a chuva acumulada de cada mês, sendo mais relevante o aspecto quantitativo da chuva média na bacia do que a distribuição espacial de cada evento de chuva. Por esta razão seu uso em grandes bacias é adequado e os resultados correspondem bem às características médias das bacias. A calibração foi efetuada para o período setembro de 1997 a agosto de 2002 e a validação para setembro de 2002 a agosto de 2007. A Figura 3b apresenta a calibração e validação do modelo SMAP no rio Teles Pires.

As variáveis de estado iniciais dos reservatórios do solo e subterrâneo TUin e EBin foram ajustadas manualmente para equiparação da vazão observada e calculada no primeiro intervalo de tempo de cada período de calibração. O parâmetro K foi estimado pela recessão dos hidrogramas observados. Os parâmetros Sat, Pes e Crec foram calibrados por um procedimento semiautomático utilizando-se a ferramenta *Solver* do *Excel* seguido de um refinamento manual por tentativa e erro. A função objetivo para o *Solver* foi maximizar o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe*, sendo o ajuste manual final baseado na visualização dos gráficos de comparação entre a vazão observada e calculada. Esse procedimento foi efetuado para cada sub-bacia e nos períodos de validação foi exigido um bom ajuste visual e coeficientes de *Nash-Sutcliffe* acima de 0,8.

Para o uso deste modelo chuva-vazão as precipitações dos modelos do IPCC-AR4 são corrigidas estatisticamente

usando a função de distribuição gama (conforme seção 2.5) e evaporações de entrada são obtidas a partir do método de *Penman-Monteith* (conforme seção 2.6).

2.5 Correção estatística

Um modelo probabilístico muito atraente para a representação de variáveis hidrológicas que apresentam versatilidade de formas e coeficientes de assimetria das variáveis é a distribuição gama. Esse modelo possui numerosas aplicações bem sucedidas em modelagem de vazões, porém, a distribuição gama também pode ser aplicada para análises de precipitação de duração diárias, semanais, mensais e anuais. Para o presente trabalho a correção estatística via função gama é feita nas séries de precipitações mensais dos modelos do IPCC-AR4.

Para a correção gama foi utilizado um ajuste de viés seguindo os seguintes passos:

- 1º - Ajuste da distribuição gama para os dados observados;
- 2º - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos para o século XX para identificar o problema no ajuste do viés;
- 3º - Ajuste da distribuição gama para os dados de precipitação dos modelos do século XXI;
- 4º - Correção das precipitações do século XX e XXI.

A Figura 4 descreve a relação entre a probabilidade acumulada e a precipitação. O mapeamento da probabilidade foi utilizado para correção do viés da precipitação mensal baseando-se em duas funções de distribuição acumulativa (FDA), sendo uma a função obtida por meio de dados modelados e a outra função obtida por meio de dados observados. Cada FDA encaixa-se com uma distribuição gama, salvando os parâmetros de forma e escala.

Maiores detalhes da correção estatística utilizada podem ser encontrados em Fernandes (2012).

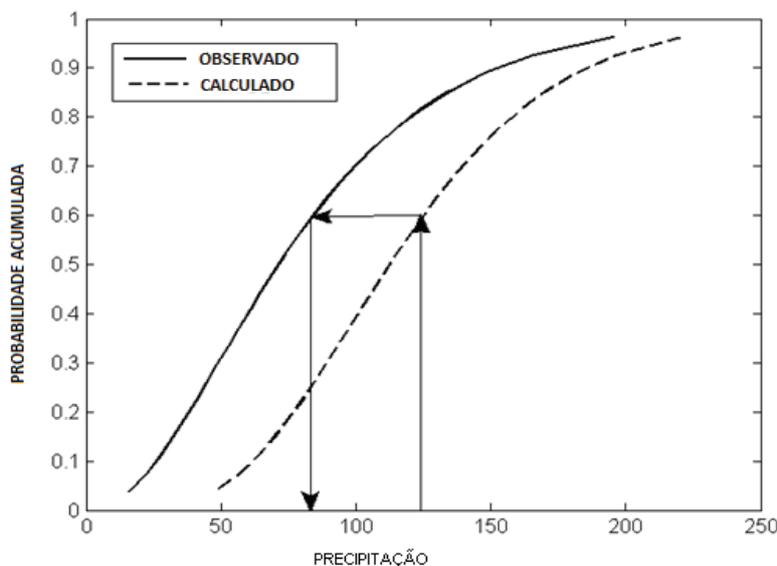


Figura 4 – Correção de viés usando a função de distribuição gama

2.6. Modelo de Estimativa de Evapotranspiração Penman-Monteith

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) é usado o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), serão usados como dados de entrada deste método as temperaturas máxima e mínima de cada modelo climático global e as demais variáveis são baseadas no clima presente (1931 a 1999). Segundo este método a evapotranspiração de referência é dada segundo a equação 1:

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

Onde: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia-1); R_n 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); e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão de vapor atual (kPa); (e_s - e_a) é o déficit de saturação de vapor (kPa); Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura (kPa °C-1); γ (kPa oC-1) é a constante psicrométrica.

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 ET_o Penman-Monteith (ET_o). Através deste conjunto de dados é possível estimar diversas variáveis. Conforme equações a seguir.

A constante psicrométrica é dada pela equação 2:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (2)$$

Sendo a pressão atmosférica (P_{atm}) dada pela equação 3 (em kPa):

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

Onde z é a altitude em relação ao nível do mar (m). é dado pela equação 4,

$$\Delta = \frac{4098 \left(0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T+237,3} \right)}{(T+237,3)^2} \quad (4)$$

exp é a base do logaritmo natural e T é a média da temperatura do ar (°C), que pode ser calculada pela equação 5,

$$e^\circ(T) = 0,6108 * \exp \frac{17,27 * T}{T+237,3} \quad (5)$$

Onde e^o(T) é a pressão de saturação de vapor (kPa) em determinada temperatura do ar T (°C). A pressão de vapor na saturação, equação 6,

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (6)$$

e

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

Onde R_{ns} é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre (MJ m² dia⁻¹); R_{nl} é a radiação de onda longa líquida que sai da superfície terrestre (MJ m² dia⁻¹).

$$R_{ns} = 1 - \alpha(R_s) \quad (8)$$

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);

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max}K^4 + T_{min}K^4}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann (4,903 x 10⁻⁹ MJ m² dia⁻¹); T_{máx}K é a temperatura máxima absoluta durante período de 24 h (K); T_{mín}K é a temperatura mínima absoluta durante período de 24 h (K); R_s é a radiação solar medida ou calculada (MJ m² dia⁻¹); R_{so} é a radiação de céu claro medida ou calculada (MJ m² dia⁻¹), e calculada pela Equação 10:

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

Onde z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m) e R_a é a radiação extraterrestre (MJ m² dia⁻¹).

Allen et al. (1998) assume que a temperatura mínima é muito próxima do ponto de orvalho o ar deve estar próximo da saturação com vapor d'água e a umidade relativa deve está muito próxima de 100%. Esta temperatura é utilizada para estimativa da pressão de vapor real (e_a), neste caso:

$$e_a = e^\circ(T_{min}) = 0,611 \exp \left(\frac{17,27T_{min}}{T_{min}+237,3} \right) \quad (11)$$

Onde e_a é a pressão de vapor real (kPa); (T_{mín}) é a pressão de saturação de vapor na temperatura mínima (kPa) e T_{mín} é a temperatura mínima (°C);

Segundo Allen et al.(1998), o grau de cobertura de nuvens de uma localidade é que estabelece a diferença entre a temperatura máxima e mínima. Com pouca cobertura de nuvens as temperaturas são mais elevadas durante o dia em razão da transparência atmosférica à radiação solar que chega, e temperaturas mais baixas a noite em razão de menos radiação de onda longa refletida que é absorvida pela atmosfera. Isto proporciona um maior T_{max} e um menor T_{min}. Já em dias nublados, T_{max} é um pouco menor por conta da radiação absorvida e refletida pelas nuvens. Da mesma forma, T_{min} também será um pouco mais alta, devido à cobertura de nuvens que opera como uma coberta que diminui a radiação de onda longa líquida refletida. Assim, o cálculo da radiação baseia-se pela diferença entre as temperaturas máxima e mínima:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (12)$$

Onde R_s é a radiação solar ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); R_a é a radiação extraterrestre ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$); T_{max} é a temperatura máxima ($^{\circ}C$); T_{min} é a temperatura mínima ($^{\circ}C$) e k_{R_s} é o coeficiente de ajuste ($^{\circ}C^{-0.5}$);

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 2 são mostrados os extremos inferiores e superiores de anomalia na média percentual anual mostrada pelos modelos para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099 em relação ao período de 1931 a 1999 dos modelos globais do CMIP3.

Para as bacias do setor Sudeste/Centro-oeste os modelos sugerem uma maior possibilidade de redução nas vazões, visto que as projeções de vazões dos modelos para estas bacias encontram-se entre aproximadamente 0% e 4% de anomalia negativa na maioria das bacias em cada período de 30 anos.

No setor Nordeste os modelos indicam bastante incerteza, não havendo convergência a respeito dos resultados dos mesmos (conforme mostrado SILVEIRA et al., 2013 (b)). Na bacia do Xingó, por exemplo, os modelos apontam anomalias que indicam desde um máximo de aumento de aproximadamente 25% nos três períodos, assim como cenários que indicam reduções de vazões de aproximadamente 25% para o cenário B1.

Já as bacias do setor Norte apresentam margens de máximos e mínimos levemente distintos entre si. Enquanto a Bacia Tucuruí apresenta projeções que possuem máximo de anomalia positiva de aproximadamente 3,5% e a mínima negativa de 7% nos três períodos, a bacia de Teles Pires apresenta margens entre 13% positivo e 8% negativa.

Quanto às bacias do setor Sul do Brasil, a bacia de Itaipu apresenta extremos inferiores e superiores de anomalia na média percentual anual de vazões, respectivamente, 1% e -3%.

Tabela 2 – Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP3 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099 (em ordem de cima para baixo) em relação ao período de 1931 a 1999 para as bacias da ONS

Bacias	Cenários						Bacias	Cenários					
	A1B		A2		B1			A1B		A2		B1	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min		Max	Min	Max	Min	Max	Min
Emborcação	0,1	-3,6	-2,0	-2,9	-1,3	-3,3	Rosana	0,9	-2,1	0,2	-2,0	0,8	-2,7
	0,0	-3,3	-3,1	-4,2	-1,1	-3,0		0,5	-2,4	-0,4	-2,7	1,2	-3,3
	0,1	-5,4	-3,7	-6,3	-1,2	-4,1		1,3	-2,5	-0,6	-3,2	1,4	-2,2
Nova Ponte	0,3	-4,1	-2,0	-2,9	-0,8	-4,3	Itaipu	0,9	-2,5	-0,5	-1,1	0,4	-2,7
	0,3	-3,7	-2,8	-4,5	-0,6	-4,1		0,1	-2,1	-1,1	-1,9	0,5	-2,6
	0,1	-5,9	-4,6	-6,8	-0,3	-4,1		0,7	-2,7	-1,5	-3,0	1,4	-2,5
Itumbiana	0,5	-4,2	-0,9	-2,3	0,6	-2,5	Santa Cecília	1,5	-4,7	-1,0	-1,7	0,7	-4,5
	0,0	-5,0	-1,9	-3,2	0,5	-2,6		1,5	-3,8	-0,9	-3,9	2,2	-5,2
	-0,3	-7,4	-2,5	-5,0	0,5	-2,8		0,2	-6,0	-2,5	-5,2	2,2	-4,3
São Simão	0,8	-4,2	-1,4	-2,7	1,1	-4,7	Salto Caxias	1,9	-2,0	1,1	-1,3	1,9	-1,0
	-0,1	-5,1	-1,8	-3,4	1,7	-4,9		1,1	-2,5	0,0	-2,0	2,7	-2,7
	-0,5	-7,0	-2,9	-6,8	1,6	-4,0		2,9	-2,3	-0,1	-2,1	3,2	-1,5
Furnas	1,1	-4,2	-1,7	-3,1	0,3	-5,4	Itá	2,7	-1,6	2,4	-0,5	4,5	0,1
	1,4	-3,8	-2,7	-4,6	0,0	-5,3		1,7	-2,1	0,8	-0,8	5,6	-1,7
	0,5	-6,3	-4,2	-6,8	0,9	-4,1		5,0	-2,0	1,3	-0,9	6,5	-0,1
Água Vermelha	0,4	-3,1	-1,6	-2,6	-0,9	-3,0	D. Francisca	3,7	-0,2	2,6	-0,8	4,4	-5,5
	0,5	-2,8	-2,3	-3,8	-0,3	-3,2		2,3	-2,1	-0,4	-3,9	3,5	-4,3
	0,2	-4,3	-3,0	-5,4	0,2	-3,4		6,6	-1,9	0,1	-2,9	2,7	-6,8
N. Avanhandava	0,7	-2,8	-1,5	-2,2	0,0	-3,5	Três Marias	0,7	-4,5	-2,2	-4,3	-0,6	-6,7
	0,5	-2,6	-2,0	-3,4	0,7	-3,4		1,1	-4,1	-3,7	-6,2	-0,6	-6,9
	0,4	-3,6	-3,0	-4,8	1,5	-3,2		0,3	-7,0	-5,5	-9,1	0,1	-6,3
Porto Primavera	0,3	-3,8	-0,9	-1,8	-0,1	-2,2	Sobradinho	1,0	-11,0	1,3	-10,6	-0,2	-10,3
	-0,1	-4,0	-0,8	-2,3	-0,2	-1,7		1,3	-10,4	1,7	-10,0	1,7	-9,3
	-0,3	-5,0	-1,5	-2,9	-0,1	-2,0		1,3	-11,7	0,2	-11,1	1,5	-10,7

Continua...

Tabela 2 – Continuação...

Bacias	Cenários					
	A1B		A2		B1	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Xingó	1,2	-23,7	30,8	-24,3	24,4	-22,6
	2,6	-23,9	20,2	-26,0	21,0	-23,1
	4,7	-24,6	15,1	-23,5	19,5	-23,2
Serra da Mesa	0,8	-3,2	-0,9	-2,4	-0,4	-3,2
	0,3	-3,8	-2,2	-3,3	-0,3	-3,3
	0,6	-5,1	-4,1	-5,4	-0,3	-3,6
Lageado	0,6	-3,6	-0,8	-3,1	0,2	-2,6
	0,7	-4,0	-1,8	-3,7	-0,1	-2,8
	1,2	-5,5	-3,2	-5,8	0,5	-3,7
Tucuruí	3,7	-6,6	3,6	-6,2	3,2	-6,1
	3,1	-7,0	3,7	-6,5	3,5	-6,4
	3,9	-8,4	3,3	-7,6	3,4	-7,2
Belo Monte	3,0	-5,6	3,1	-5,5	3,0	-5,3
	3,4	-5,4	3,9	-5,0	3,8	-4,8
	4,1	-6,5	3,7	-5,8	3,8	-5,3
Teles Pires	13,1	-6,3	13,0	-6,0	11,4	-5,8
	12,6	-7,0	13,2	-6,9	11,5	-6,4
	13,2	-8,4	12,9	-8,0	11,5	-7,0
S. L. Tapajós	2,1	-4,8	2,1	-4,5	1,9	-4,6
	2,1	-5,1	2,4	-4,7	2,1	-4,7
	2,5	-6,0	2,4	-5,2	2,1	-5,0
Santo Antônio	1,8	-1,4	1,5	-1,3	1,8	-1,3
	2,5	-1,2	2,0	-0,9	2,3	-0,9
	2,4	-1,8	2,4	-1,7	2,4	-1,2

Na Figura 5 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário A2 em relação ao século XX (1931-1999) para as bacias de Furnas, Itaipu, Sobradinho e Tucuruí.

Os modelos disponíveis convergem em relação ao impacto em Furnas e indicam que as vazões tendem a diminuir nessa bacia. Essa redução sugerida pelos modelos é superior a 2% em cada período de 30 anos, sendo sinalizado reduções maiores no final do século XXI. Segundo estes modelos é provável que ao final do século a diminuição total nas vazões seja em aproximadamente 10%.

Em Itaipu, apesar dos modelos indicarem diminuição nas vazões, a magnitude percentual destas reduções é bem inferior a Furnas, atingindo valores inferiores a 1% no período de 2010 a 2039 e aproximadamente 2,5% para todos os modelos no período de 2070 a 2099.

Em Tucuruí e Sobradinho os modelos divergem quanto as projeções de vazões para o século XXI. Enquanto o modelo INCM3-0-run1 indica vazões superiores a média do século XX, as rodadas do modelo MIROC3-2-MEDRES-run1 sugere vazões

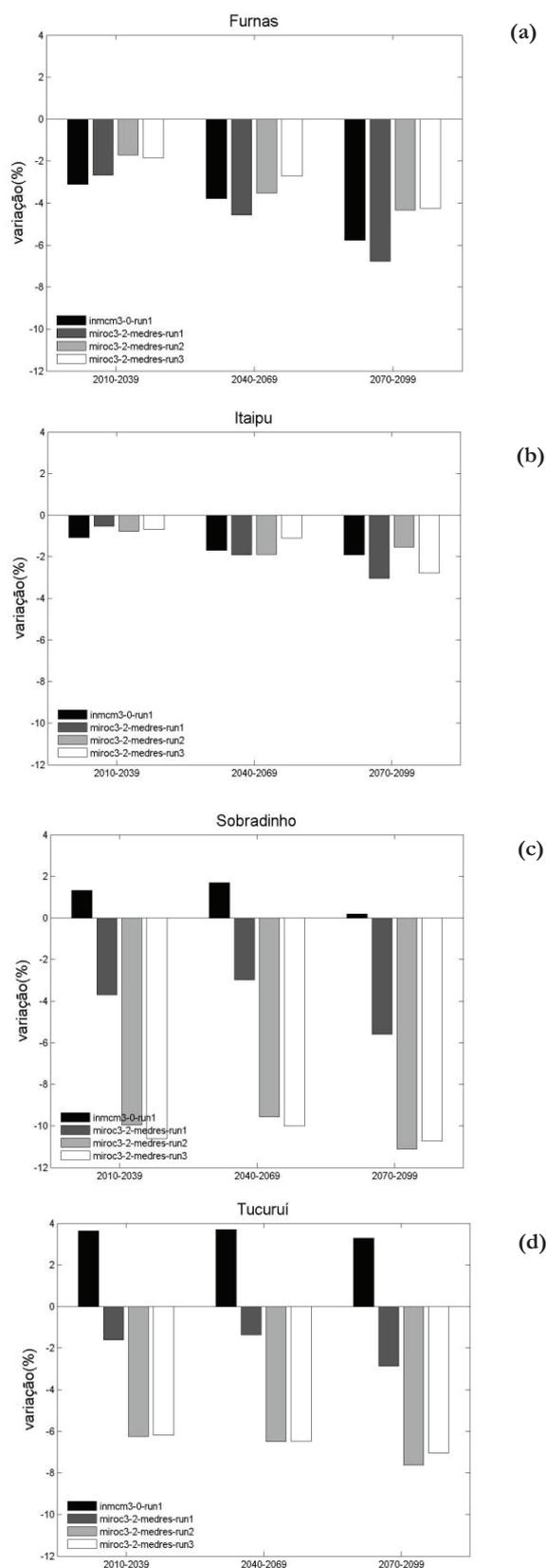


Figura 5- Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário A2 em relação ao século XX (1931-1999) para : (a) Furnas; (b) Itaipu; (c) Sobradinho e (d) Tucuruí

inferiores a média. Essa configuração sugere que os modelos possuem baixa previsibilidade para estas bacias e/ou a incerteza associada a essas regiões é bastante elevada.

Na Figura 6 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário B1 em relação ao século XX (1931-1999) para as bacias de Furnas, Itaipu, Sobradinho e Tucuruí.

A maioria dos modelos indicam que na bacia de Furnas as vazões tendem a diminuir nos três períodos de 30 anos, porém divergem quanto a magnitude da redução. Os modelos BCCR-BCM2-0-run1 e CSIRO-MK3-0-run1 não mostram impactos significativos, com reduções e/ou aumentos nos três períodos inferiores a 1%. As rodadas 1 e 2 do modelo GISS-AOM indicam reduções de aproximadamente 2% no período de 2010 a 2039, nos demais períodos de 30 anos as rodadas sugerem variações inferiores a 1%. Os demais modelos indicam reduções nos três períodos de 30 anos de 2,5% em média.

Em Itaipu, os modelos do cenário B1 mostram comportamento semelhante ao cenário A2, com maioria dos modelos sugerindo reduções de aproximadamente 2% em cada período de 30 anos.

Já em Sobradinho, no período de 2010 a 2039, todos os modelos do cenário B1 indicam redução nas vazões, diver-

gindo apenas em magnitude, variando entre 0,2% e 10%. Nos demais períodos, os modelos BCCR-BCM2-0-run1, CSIRO-MK3-0-run1, GISS-AOM-run1 e GISS-AOM-run2 indicam impactos de apenas $\pm 1\%$. O modelo INMCM3-0-run1 indica acréscimo nas vazões nos dois últimos períodos de 30 anos de aproximadamente 2%. Enquanto as variações do modelo MIROC-3-2-MEDRES-run1 sugerem reduções maiores do que 20% ao final do século XXI.

Em Tucuruí os modelos divergem quanto as projeções de vazões para o século XXI. Enquanto o modelo INCM3-0-run1 indica vazões superiores a média do século XX, as rodadas do modelo MIROC3-2-MEDRES-run1 sugere vazões inferiores a média. Essa configuração sugere que os modelos possuem baixa previsibilidade para estas bacias e/ou a incerteza associada a essas regiões é bastante elevada.

Assim como os modelos do cenário A2 do IPCC-AR4, a maioria dos modelos do cenário B1 convergem quanto ao impacto no setor elétrico na região sudeste/centro-oeste do Brasil, mostrando que possivelmente as vazões devem reduzir em até 5% em cada período de 30 anos em Furnas.

Na Figura 7 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário A1B em relação ao século XX (1931-1999) para as bacias de

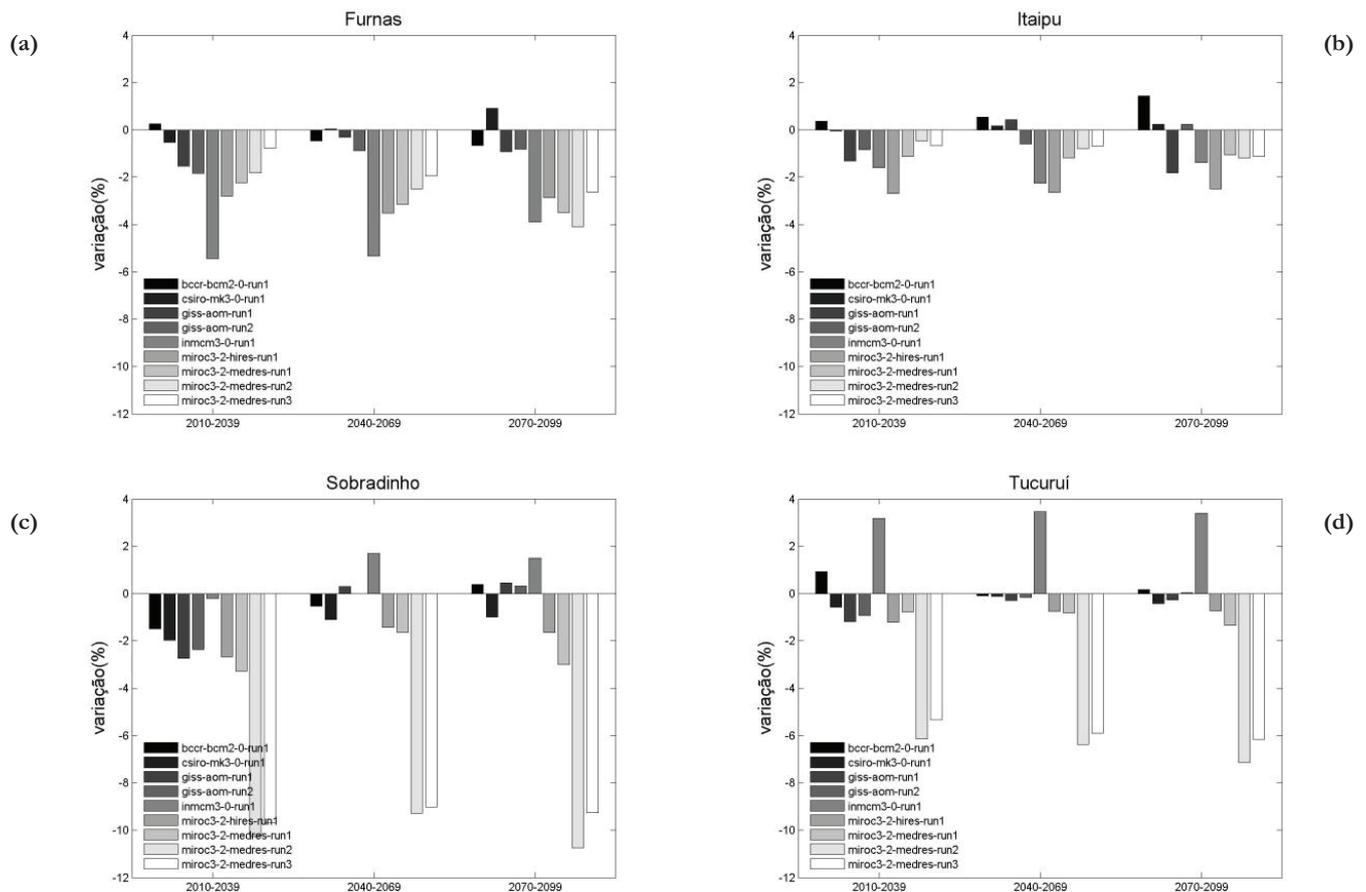


Figura 6- Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário B1 em relação ao século XX (1931-1999) para: (a) Furnas; (b) Itaipu; (c) Sobradinho e (d) Tucuruí

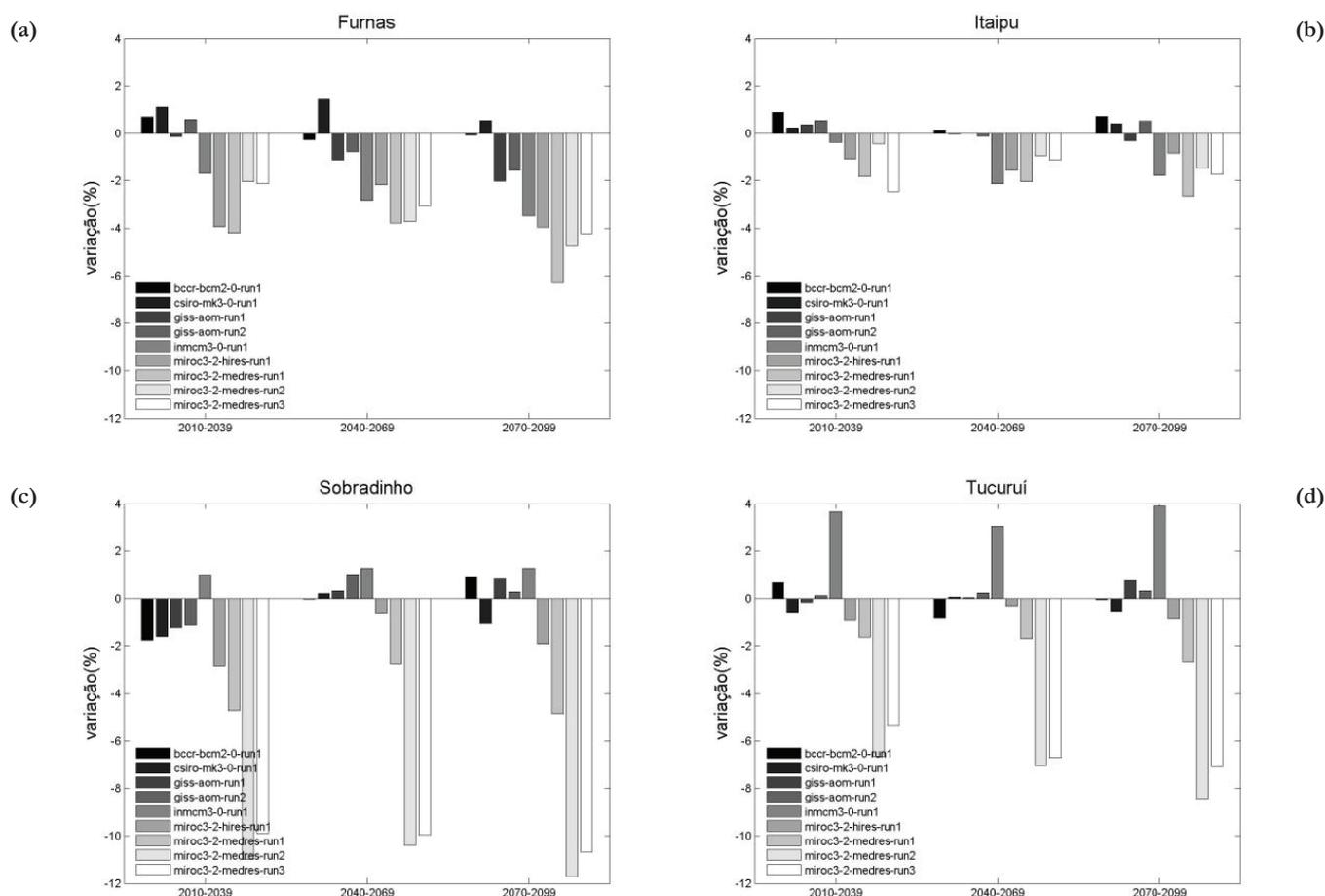


Figura 7- Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2099) para os modelos do CMIP3 para o cenário A1B em relação ao século XX (1931-1999) para :(a) Furnas; (b) Itaipu; (c) Sobradinho e (d) Tucuruí

Furnas, Itaipu, Sobradinho e Tucuruí.

Os modelos possuem comportamento muito semelhante aos demais cenários, com a maioria dos modelos indicando que nas bacias de Furnas e Itaipu as vazões tendem a diminuir nos três períodos de 30 anos, porém divergindo quanto a magnitude da redução.

Quanto a Sobradinho e Tucuruí os modelos indicam o mesmo sinal do cenário B1, porém intensifica o sinal da anomalia para maioria dos modelos e períodos.

CONCLUSÕES

A análise das projeções de vazões sobre as principais bacias do setor elétrico brasileiro foi realizada usando os dados provenientes do IPCC-AR4 para os cenários A1B, A2 e B1 para o século XXI para estimar as evapotranspirações e precipitações mensais para posterior transformação em vazões mensais por meio do modelo SMAP. As evapotranspirações foram calculadas com método Penman-Motheith e as precipitações dos modelos do IPCC-AR4 sofreram uma correção estatística para remoção de viés usando a função de distribuição gama. O modelo precipitação-vazão, o SMAP, foi calibrado para as bacias considerando o período de setembro de 1997 a agosto

de 2002 e a validação para setembro de 2002 a agosto de 2007. O conjunto de parâmetros calibrados do SMAP, em cada bacia, permaneceu o mesmo ao longo do processo de simulação das vazões do século XXI.

Os modelos do IPCC divergem quanto o futuro das vazões nas principais bacias para o setor hidroelétrico brasileiro. 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, 1965) e/ou má representação dos fenômenos micro e meso-escala que precisam ser resolvidos numa grade de melhor resolução.

No setor Sudeste/Centro-oeste os modelos indicam margens que sugerem uma maior possibilidade de reduções nas vazões. Já no setor Nordeste há uma maior incerteza entre os modelos, e não há convergência a respeito das projeções dos mesmos (conforme mostrado SILVEIRA et al., 2013(b)).

Os modelos do IPCC-AR4 convergem quanto ao impacto no setor elétrico na região sudeste/centro-oeste e Sul, mostrando que possivelmente as vazões devem reduzir em até 5% em cada período de 30 anos em Furnas e aproximadamente 4% até o final do século em Itaipu. Esta redução sugere bastante impacto na geração de energia nestes setores até o final do século XXI. Quanto ao setores Norte e Nordeste a divergência

entre modelos indica bastante incerteza nestas regiões, porém sugerem uma margem a qual o planejamento de infraestrutura deve ocorrer.

As rodadas do modelo MIROC3-2-MEDRES-run1 e o modelo MIROC3-2-HIRES-run1 indicam reduções nas principais bacias de cada setor para todos os cenários avaliados e períodos, principalmente no setor Nordeste. Enquanto isso o modelo INMCM3-0-run1 mostra aumento nas vazões nos setores Norte e Nordeste para todos os cenários e períodos de 30 anos.

As rodadas dos modelos GISS-AOM-run1, CSIRO-MK3-0-run1 e BCCR-BCM2-0-run1 mostraram flutuações em torno da média anual histórica de vazões, não sendo possível identificar os impactos destas configurações no Sistema Interligado Nacional (SIN).

As divergências dos modelos globais do IPCC-AR4 quanto às projeções demonstram um alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de vazões no setor elétrico brasileiro, podendo ser usada para adoção de políticas e gestão.

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.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M.. *Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO-Irrigation and Drainage Paper. Roma, 1998. p. 297.
- ALVES, B. C. C.; SOUZA FILHO, F. A.; SILVEIRA, C. S. Análise de tendência e Padrões de Variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional de Sistemas(ONS). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, p. 19-34, 2013.
- BANCO MUNDIAL, 2010. *Relatório sobre o desenvolvimento mundial de 2010: desenvolvimento e mudança climática/ Banco Mundial*. São Paulo. UNESP, 2010. p.418.
- CAVALCANTI, A. I. F.; FERREIRA, N.J.; DIAS, M.A.F.; SILVA, M.G.A.J.. *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo. Oficina de Textos, 2009. p. 280.
- COLLISCHONN, W. ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.. The MGB-IPH model for large-scale rainfall – runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COSTA, F. S.; MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO, J. M. Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V 12, n.3, 21-30, 2007.
- FERNANDES, W. S. *Avaliação do Impacto das Mudanças Climáticas na Oferta Hídrica da Bacia Hidrográfica do Reservatório Óros Usando os Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4*. 2012. 128f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2012.
- GUILHON, L. G.; 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.
- IPCC. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 2007a. p. 23.
- IPCC. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, 2007b. p. 18.
- LÁZARO, Y. M. C. *Avaliação dos modelos do IPCC – AR4 quanto à sazonalidade e à variabilidade plurianual de precipitação no século XX em três regiões da América do Sul - projeções e tendência para o século XXI*. 2011.182f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2011.
- LOPES, J.E.G.; BRAGA Jr., B.P.F.; CONEJO, J.G.L. Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v.2, p. 42-62, Fortaleza, 1981.
- LORENZ, E. N. A study of the predictability of a 28 –Variable Atmospheric Model. *Tellus*, v.17, n.3 p. 321-333, 1965.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. *Impacto das mudanças climáticas no Brasil e Possíveis Cenários Climáticos: Síntese do Terceiro Relatório do IPCC de 2001*. CPTEC-INPE, 2005. p. 29.
- MARENGO J.A., VALVERDE, MARIA C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. *Revista Multiciência Campinas*, n. 8, 2007.
- MELLO, E. L.; OLIVEIRA, F. A.; PRUSKI, F. F. Efeito Das Mudanças Climáticas Na Disponibilidade Hídrica Da Bacia De Paracatu. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 635-644, out./dez. 2008.
- MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A; VECCHIA, A.V.. Global pattern of trends in streamflow e water availability in

- a changing climate. *Nature*, v. 438, Novembro 2005.
- NEW, M.; HULME, M.; JONES, P.D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*. v.12, p.829-856, 1999.
- NEW, M.; LISTER, D.; HULME, M.; MAKIN, I. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*. v.21, p.1-25, 2001.
- NOBRE C. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança no clima. In: Brasil, Presidência da República. Núcleo de Assuntos Estratégicos. Mudança do clima: Negociações Internacionais sobre a Mudança do Clima. Brasília. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica. v. 1 parte 2, p. 147-216, 2005.
- SILVEIRA, C.S. ; SOUZA FILHO, F. A. ; CAMPOS, Y.M.L. Avaliação de desempenho dos modelos de mudança climática do IPCC-AR4 quanto a sazonalidade e os padrões de variabilidade interanual da precipitação sobre a região Nordeste do Brasil, bacia do Prata e Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 177-194, 2013a.
- SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; CABRAL, S.L. Análise das Projeções de Precipitação do IPCC-AR4 para os Cenários A1B, A2 e B1 para o Século XXI para Nordeste Setentrional do Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.18, n.2, p.117-134. 2013b.
- TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D.A.; CUARTAS, L.A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J.C.; MARENGO, J. *Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na bacia do rio Tocantins*. Convênio de Cooperação Técnico-Científica INPE-VALE. [S.l.], p. Convênio de Cooperação Técnico-Científica. 2009.

Analysis of flow projections in Brazilian basins with hydroelectric power plants using data from the IPCC-AR4 for the 21st century

ABSTRACT

The flow projections for Brazilian basins with hydroelectric power plants were obtained using THE precipitation from global models of the CMIP3 (in the fourth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC-AR4) for the period of 2010 to 2099 for the A1B, B1 and A2 scenarios. Flows were generated for the rain with the Soil Moisture Account Procedure (SMAP) hydrological model, which was initialized with statistically corrected precipitation from the monthly rain data of the Climatic Research Unit (CRU) and by the estimated evaporation according to the Penman-Monteith Method. The percentage impacts on average annual flows were analyzed for the periods from 2010 to 2039, 2040 to 2069 and 2070 to 2099 in comparison with the period from 1931 to 1999. The IPCC-AR4 models agree in terms of the impact on the electrical sector in the Southeast/Midwest and South regions, showing that the flows may be reduced up to 5% in each 30-year period in Furnas and approximately 4% by the end of the century in Itaipú. Regarding the North and Northeast sectors, the divergence of the models suggests great uncertainty in these regions; however, they suggest a range within which the planning of infrastructure must occur. The divergence of the IPCC-AR4 models regarding the projections indicates great uncertainty. However, this information defines the bounds for potential future flow scenarios and can be used for the adoption of management policies.

Keywords: *Flow projections. IPCC-AR4*