

ANÁLISE DAS PROJEÇÕES DE VAZÕES SOBRE AS PRINCIPAIS BACIAS DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO USANDO DADOS PROVENIENTES DO CMIP5 PARA O CENÁRIO RCP8.5 PARA O SÉCULO XXI

Cleiton da Silva Silveira^{1*}, Francisco de Assis de Souza Filho¹, Victor Costa Porto¹,
Samuellson Lopes Cabral¹ & Wictor Edney Dajtenko Lemos¹.

RESUMO --- As projeções de vazões para as bacias brasileiras que possuem plantas produtoras de hidroeletricidade foram obtidas usando as precipitações dos modelos globais do CMIP5 (que serão utilizadas no quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC-AR5) para o período de 2010 a 2098 do cenário RCP8.5. 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-Mothieth*. 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 1950 a 1999. Os modelos do CMIP5 concordam em termos de impacto sobre o setor elétrico nas regiões Norte e Nordeste no período de 2010 a 2039, mostrando que o fluxo pode ser reduzido nesta região. Quanto ao setores Sul e Sudeste/Centro-oeste a divergência entre modelos indica bastante incerteza nestas regiões, porém sugerem uma margem na qual o planejamento de infraestrutura deve ocorrer. Estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de vazões e podem ser usada para adoção de políticas de gestão.

Palavras-Chave: CMIP5. Setor elétrico do Brasil. Mudanças climáticas.

ABSTRACT --- The flow projections for Brazilian basins with hydroelectric power plants were obtained using the precipitation from global models of the CMIP5 for the period of 2010 to 2098 for the RCP8.5 scenario. 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 1950 to 1999. The CMIP5 models agree in terms of the impact on the electrical sector in the North and Northeast sectors in the period 2010 to 2039, showing the flows may be reduced in this region. Regarding the Southeast/Midwest and South 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. This information defines the bounds for potential future flow scenarios and can be used for the adoption of management policies.

Keywords: CMIP5, Brazilian Power Sector, Climate Change

¹ Universidade Federal do Ceará: *cleitonsilveira16@yahoo.com.br

1. 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 conseqüentemente, em toda a economia nacional.

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.

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 sócio-econômicos e ambientais (IPCC, 2007 a e b). Desde 1988, quando foi criado IPCC, foram publicados quatro relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas. Espera-se que algumas das questões científicas que surgiram durante a preparação do quarto relatório do IPCC possam ser tratadas no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), para a publicação do Quinto Relatório (AR5, prevista para publicação no final de 2013).

O objetivo deste trabalho é analisar as projeções dos modelos globais do CMIP5 (publicados pelo quinto relatório do IPCC-AR5) para o cenário RCP8.5 para o século XXI, buscando identificar tendências nas variações interanuais nas bacias que compõe o setor elétrico do Brasil utilizando o modelo chuva-vazão *Soil Moisture Accounting Procedure* (SMAP).

2. METODOLOGIA

A metodologia divide-se, basicamente, em quatro etapas. A primeira consiste em obter as evaporações a partir dos modelos do IPCC-AR5, usando o método de *Penman-Motheith*. A segunda consiste na obtenção das precipitações médias dos modelos para bacia de interesse, 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. A quarta etapa consiste em avaliar os resultados das projeções utilizando algumas métricas. Desta forma, é possível quantificar a sensibilidade da oferta à variabilidade e às mudanças climáticas.

2.1. O Sistema Interligado Nacional (SIN)

Na Figura 1 são mostradas as bacias monitoradas pelo Operador Nacional de Sistemas (ONS), todas inseridas em território brasileiro, com exceção da bacia de Santo Antônio. 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. 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. Assim, 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.

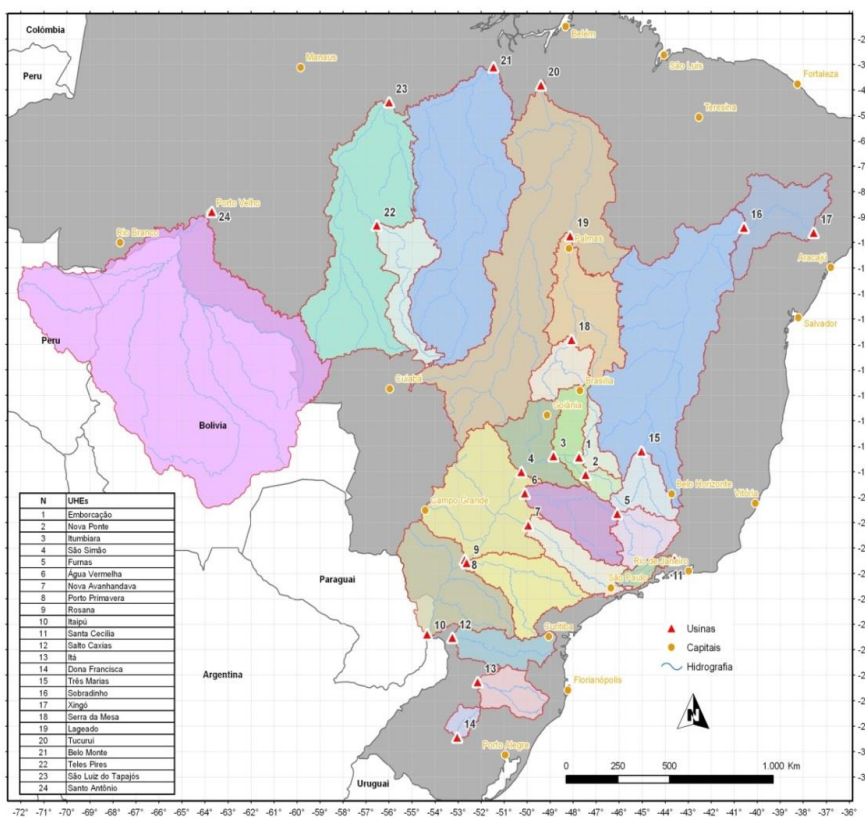


Figura 1 – Bacias do setor elétrico brasileiro utilizadas no trabalho.

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.*, 2001) (NEW *et al.*, 2001). O conjunto de dados utilizado corresponde à precipitação mensal (entre os anos de 1950 e 1999), com resolução de 0,5 graus para o continente (CRU TS 3.0).

2.3. Modelos do CMIP5

Os dados provenientes do CMIP5 são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para confecção dos relatórios dos IPCC (conforme Tabela 1), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX. Para cada modelo serão considerados diferentes membros, conforme disponibilizados pelo CMIP5.

Como parte da fase preparatória para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$. Neste trabalho será usado o cenário RCP8.5 para análise das projeções do século XXI.

Tabela 1 – Modelos do CMIP5 analisados.

Modelos	Instituição
bcc-csm1-1	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>
BNU-ESM	<i>College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University</i>
CanESM2	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>
CESM1-BGC	<i>Community Earth System Model Contributors</i>
CSIRO-Mk3-6-0	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence</i>
GFDL-ESM2M	<i>NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
HadGEM2-AO	<i>National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration</i>
HadGEM2-CC	<i>Met Office Hadley Centre</i>
HadGEM2-ES	<i>Met Office Hadley Centre</i>
IPSL-CM5A-LR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
IPSL-CM5A-MR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
MIROC5	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>
MIROC-ESM	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>

Fonte: Disponível em: <<http://pcmdi3.llnl.gov/esgcat/home.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

2.4. Cálculo das vazões médias

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.

Para este trabalho foi usado o SMAP em sua versão mensal, Para o uso deste modelo chuva-vazão as precipitações dos modelos do CMIP5 são corrigidas estatisticamente usando a função de distribuição gama a partir das precipitações do CRU e as evaporações de entrada são obtidas a partir do método de Penman-Monteith.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) é usado o método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998). Como dados de entrada são utilizados para o cálculo de evapotranspiração de referência as temperaturas máximas e mínimas mensais dos modelos do CMIP5.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 2 são mostrados os extremos inferiores e superiores de anomalia na média percentual anual nas vazões modeladas para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 para o cenário RCP 8.5 em relação ao período de 1950 a 1999 dos modelos globais do CMIP5. Os modelos mostram maior dispersão no terceiro período, isto é associado, muito provavelmente ao fato da incerteza das projeções serem função do tempo.

Para as bacias do setor Sudeste/Centro-Oeste o conjunto de modelos analisados sugerem uma maior possibilidade de redução nas vazões no período de 2010 a 2039, visto que a média entre as projeções de vazões dos modelos é aproximadamente -10% com desvio padrão em torno de 9% para a maioria das bacias desse setor. Para os demais períodos há uma maior dispersão entre os modelos com desvio de superiora 10% em todas as bacias. Porém, os modelos sugerem margens que vão desde um aumento de 3% até reduções de aproximadamente 40% no período de 2040 a 2069 nas bacias de Emborcação, Nova Ponte, Itumbiana e São Simão.

No setor Sul há uma grande variação espacial nas anomalias de vazões, com as bacias N. Avanhadava e Porto Primavera indicando sinais distintos das bacias Salto Caxias, Itá e D. Francisca, principalmente no período de 2010 a 2039.

Para as bacias de Salto Caxias, Itá e D. Francisca a maioria dos modelos indica possibilidade de aumento nas vazões nos três períodos, com média das anomalias anuais sendo positiva nos três períodos. Enquanto em N. Avanhadava e Porto Primavera no período de 2010 a 2039 os modelos analisados indicam maior possibilidade de reduções nas vazões anuais, sendo que a média entre as anomalias de vazões na bacia Porto Primavera indica os maiores valores absolutos, com diminuições da ordem de 20% no terceiro período.

Na bacia de Itaipu a média entre as anomalias indica maior possibilidade de reduções nas vazões médias anuais nos três períodos, principalmente no período de 2010 a 2039 onde a média dos modelos é -6,5% com desvio padrão de 7,4%. Nos demais períodos é importante destacar a margem de possibilidades, visto que os modelos de maior e menor anomalia divergem bastante, respectivamente, 24,9% e -41,1% no período de 2070 a 2098.

No setor Nordeste os modelos indicam bastante incerteza na bacia do Xingó, com desvio padrão entre as anomalias apontando valores superiores a 30% nos três períodos, não havendo convergência a respeito dos resultados dos mesmos. Porém, em Sobradinho, os modelos sinalizam reduções nas vazões no período de 2010 a 2039, divergindo apenas em magnitude. Já em Três Marias os modelos sinalizam a possibilidade de leve aumento, de até aproximadamente 8% no período de 2070 a 2098, a reduções de maior magnitude, de até 25% em cada período.

Tabela 2 – Anomalias percentuais máximas e mínimas de vazões anuais sinalizadas pelo conjunto de modelos CMIP5 usados no experimento para os períodos de 2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098 (em ordem de cima para baixo) em relação ao período de 1950 a 1999 para as bacias da ONS.

Bacias	2010-2039				2040-2069				2070-2098			
	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV	MAX	MIN	MED	DESV
Emborcação	3,5	-28,6	-12,3	9,1	3,0	-36,6	-14,4	11,6	4,3	-54,9	-20,4	16,7
Nova Ponte	5,0	-27,5	-11,8	9,4	2,7	-33,4	-12,8	11,6	7,2	-52,1	-17,3	16,5
Itumbiana	3,4	-29,4	-13,2	8,8	1,2	-38,6	-16,1	11,7	1,0	-57,5	-23,7	16,1
São Simão	1,5	-34,2	-14,9	9,5	-0,4	-44,4	-18,5	13,2	-2,2	-65,6	-27,7	18,3
Furnas	2,9	-20,2	-7,3	7,5	7,5	-25,5	-5,4	10,7	11,8	-33,4	-8,1	15,8
Água Vermelha	2,4	-26,3	-11,1	7,8	7,5	-33,5	-11,5	12,2	8,5	-43,5	-15,5	16,5
N. Avanhandava	2,9	-28,7	-10,1	8,8	11,4	-38,5	-10,5	14,9	12,1	-45,7	-14,2	19,9
Porto Primavera	-2,7	-34,0	-13,5	8,1	3,5	-43,9	-16,1	14,3	10,1	-55,9	-23,3	18,3
Rosana	5,7	-22,0	-2,9	7,1	16,1	-27,8	-4,5	13,8	29,6	-38,7	-3,4	19,2
Itaipú	3,9	-26,0	-6,5	7,4	15,4	-34,4	-9,8	14,3	24,9	-41,1	-12,0	19,1
Santa Cecília	3,7	-21,6	-6,0	7,3	10,3	-28,1	-3,8	11,6	16,6	-35,8	-5,7	16,4
Salto Caxias	17,0	-11,6	3,4	6,4	23,3	-19,9	3,9	12,6	39,3	-23,0	10,6	18,1
Itá	21,6	-11,5	6,1	8,8	41,6	-21,6	9,4	18,8	70,4	-18,2	18,3	26,8
D. Francisca	24,8	-11,3	6,5	11,2	40,2	-22,9	7,1	21,4	60,7	-21,6	16,0	28,9
Três Marias	2,7	-27,5	-10,8	9,1	4,5	-31,2	-10,9	10,5	8,2	-47,6	-15,5	16,4
Sobradinho	-3,3	-45,4	-18,7	12,6	11,3	-54,7	-18,5	18,3	31,1	-65,7	-22,9	24,5
Xingó	56,7	-63,5	-16,7	34,8	190,8	-68,6	-1,1	88,6	395,7	-89,5	7,0	139,9
Serra da Mesa	2,8	-34,6	-14,6	12,0	8,1	-45,1	-18,2	16,5	9,7	-59,7	-27,2	20,1
Lajeado	-1,2	-43,6	-16,7	13,3	20,7	-51,6	-15,7	20,7	26,0	-53,6	-21,4	22,6
Tucuruí	2,9	-42,2	-15,7	13,7	31,6	-55,5	-18,5	24,0	38,7	-72,0	-30,2	30,8
Belo Monte	-0,8	-40,4	-17,7	10,9	19,4	-61,8	-26,7	19,8	11,0	-78,3	-43,5	23,7
Teles Pires	-2,4	-19,9	-9,6	5,6	1,6	-32,3	-13,1	9,6	-4,1	-42,8	-21,3	11,6
S. L. Tapajós	2,5	-18,7	-8,3	5,9	0,8	-30,3	-13,0	9,5	-4,4	-41,3	-21,7	12,7
Santo Antônio	-6,2	-28,5	-14,5	6,9	-7,0	-49,5	-24,0	13,8	-12,8	-69,7	-35,2	19,0

*Max: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com maior valor para Bacia, cenário e período em questão.

*Min: Indica a anomalia na vazão anual do modelo do CMIP5 com menor valor para Bacia, cenário e período em questão.

*Med: Indica a anomalia média da vazão anual entre os modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão.

*Desv: Indica desvio padrão entre as anomalias da vazão anual dos modelos do CMIP5 para Bacia, cenário e período em questão.

Na Figura 2 é mostrado o impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos (2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP 8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para as bacias de Furnas, Itaipu, Sobradinho e Tucuruí. No período de 2010 a 2039 os modelos indicam reduções em Sobradinho e Tucuruí associados a pequenas reduções ou normalidade em Furnas e Tucuruí.

As rodadas do modelo MIROC_ESM, CANESM2_r11p1, GISS-e2-r_r11p1 e o modelo GFDL-ESM2M_r1p1l1 indicam reduções nas principais bacias de cada setor para todos os períodos, principalmente no setor Nordeste. Estes modelos sugerem que é necessário um maior investimento em infraestrutura hídrica, uma maior participação de energia proveniente de termelétricas na matriz de energia elétrica brasileira e/ou um maior investimento em fonte de energias renováveis (como eólica e solar) para que a redução na oferta não possa impactar a geração de energia e os níveis de garantia do século XX possam ser mantidos no século XXI.

Enquanto isso o modelo IPSL-CM5ALR mostra redução nas vazões no primeiro período para a maioria das bacias do SIN, seguido por aumento nas vazões nos setores Norte e Nordeste para todos os períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2099. Essa configuração sugere que no período de 2010 a 2039 o sistema deve passar por dificuldade de atendimento a demanda e nos demais períodos analisados sugere que estratégias sejam tomadas afim de atender a oferta do principal centro econômico brasileiro, as regiões Sul e Sudeste. Dentre elas, transferência de energia do setor Norte para os setores em escassez ou um maior investimento em infra-estrutura hídrica na região.

Já o modelo HadGEM2-ES e HadGEM2-CC sugerem impactos significativos nas bacias do setor norte, com uma possível tendência negativa nessa região.

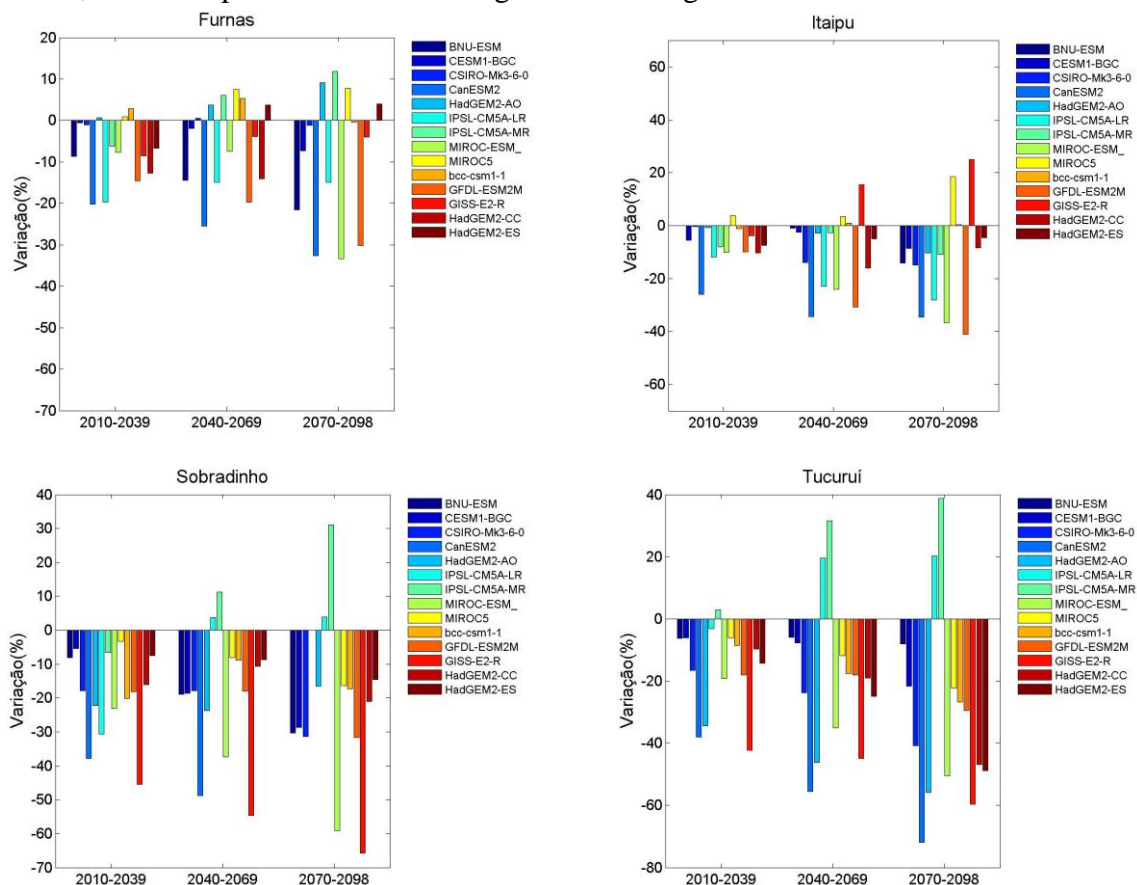


Figura 2- Impacto na média anual de vazões no século XXI em três períodos(2010 a 2039, 2040 a 2069 e 2070 a 2098) para os modelos do CMIP5 para o cenário RCP8.5 em relação ao século XX (1950-1999) para : (a) Furnas; (b) Itaipu; (c) Sobradinho e (d) Tucuruí.

4. CONCLUSÕES

Quanto às projeções dos modelos do CMIP5 analisados para o cenário RCP8.5 do século XXI, há divergências quanto o futuro da precipitação nas várias regiões do setor elétrico. Esse espalhamento pode estar associado à própria incerteza proveniente dos fenômenos meteorológicos que envolvem essa variável (a atmosfera é um sistema caótico, Lorenz, 1965) e/ou má representação dos fenômenos de micro e meso-escala que precisariam ser resolvidos numa grade de melhor resolução.

No setor Nordeste, os modelos divergem na bacia do Xingó nos três períodos analisados e convergem em na bacia de Sobradinho no período de 2010 a 2039 indicando que reduções devem acontecer nessa bacia.

No setor Norte, os modelos indicam uma maior possibilidade de reduções ou normalidade nas bacias desse setor no período de 2010 a 2039. A maioria dos modelos indica que o sinal mostrado em Sobradinho deve persistir nos períodos de 2040 a 2069 e 2070 a 2099, principalmente em Tucuruí.

Nos setores Sul e Sudeste/Centro-oeste os modelos sugerem uma maior possibilidade de reduções nas vazões ou leve aumento no período de 2010 a 2039. Nos demais períodos os modelos divergem, mas sugerem margens de planejamento.

As divergências dos modelos do CMIP5 analisados quanto às projeções demonstram o alto nível de incerteza existente nessas projeções. Entretanto, estas informações definem uma margem dos possíveis cenários futuros de precipitação do setor elétrico brasileiro, devendo ser usadas 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 regionais dos modelos do CMIP5, especialmente sobre áreas menores. Artificializar a redução destas incertezas pode induzir estratégias que levem àquilo que, em gerenciamento de risco, se conhece como grandes arrependimentos. Daí, estratégias robustas precisam considerar as incertezas no nível atual de conhecimento.

5. REFERENCIAS

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma, 1998.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2007: The physical science basis*. Cambridge, 18 p. 2007a.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press: Cambridge, 23 p, 2007b.
- 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, 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.
- NEW, M., LISTER, D., HULME, M., MAKIN, I.,: *A high-resolution data set of surface climate over global land areas*. **Climate Research** 21, 1-25, 2001.