

## ESTIMATIVA DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM BACIAS DO ATLÂNTICO LESTE

*Thiago Balisa Santana<sup>1</sup>; Benedito Cláudio da Silva<sup>2</sup> & Afonso Henriques Moreira Santos<sup>3</sup>*

**Resumo** – Projeções de oferta e demanda de energia no Brasil mostram que o país precisa expandir urgentemente seu parque gerador, sob o risco de ter o crescimento econômico restringido pela falta de energia. Além disso, muitos estudos demonstram evidências fortes de que os cenários de mudanças climáticas estão se tornando realidade e podem comprometer a disponibilidade hídrica para a geração hidrelétrica. Tais possibilidades indicam que é urgente, e necessário, o desenvolvimento de metodologias e ferramentas para avaliação dos possíveis impactos das mudanças do clima sobre a geração hidrelétrica no Brasil. Em atendimento a essa necessidade, no presente trabalho apresenta-se a estimativa de impactos de cenários de mudanças climáticas sobre as bacias dos Rios Doce, Jequitinhonha.

**Palavras-Chave** – Mudanças climáticas, Modelo Eta, Bacias do Atlântico Leste

## ESTIMATION OF IMPACTS OF CLIMATE CHANGE AT THE EAST ATLANTIC BASINS

**Abstract** – Projections of supply and demand for energy in Brazil show that the country urgently needs to expand its generating, at the risk of having economic growth constrained by lack of energy. Furthermore, many studies show strong evidence that climate change scenarios are becoming reality and can compromise the availability of water for hydroelectric generation. These possibilities indicate that it is urgent and necessary to develop methodologies and tools for assessment of possible impacts of climate change on hydropower generation in Brazil. In response to this need, this paper presents the estimated impacts of climate change scenarios on the basins of the Rivers Doce, Jequitinhonha.

**Keywords** – Climate Changes, Eta Model, East Atlantic Basins

### 1. INTRODUÇÃO

A maior parte das decisões tomadas no planejamento dos recursos hídricos possui forte dependência do conhecimento antecipado das condições atmosféricas e hidrológicas, para diferentes escalas de tempo e espaço.

Previsões climáticas em escala de anos ou décadas à frente são essenciais no auxílio do planejamento ou estabelecimento de políticas sobre os recursos hídricos, em especial quando se envolve o planejamento hidroenergético. Embora o clima tenha sempre variado de modo natural, os

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá– UNIFEI, Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG, 37500-903. (35) 3629 1411, thiagobalisa@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Itajubá– UNIFEI, Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG, 37500-903. (35) 3629 1411, silvabenedito@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Itajubá– UNIFEI, Av. BPS, 1303 – Itajubá / MG, 37500-903. (35) 3629 1455, afonsohms@gmail.com

resultados de pesquisas e simulações sofisticadas vêm evidenciando que as emissões excessivas de gases de efeito estufa ao longo das décadas podem provocar mudanças permanentes e irreversíveis no clima IPCC (2001).

Essas previsões climáticas em escala global são feitas por meio de modelos numéricos de alta complexidade, que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos (IPCC, 2007c). Atualmente, o IPCC utiliza 25 Modelos de Circulação Global (GCM), que fornecem todas as principais variáveis climáticas.

## 2. MODELOS ATMOSFÉRICOS ANALISADOS

O Relatório de Avaliação do IPCC, que atualmente se encontra na sua quarta versão, descreve os avanços feitos na compreensão dos fatores humanos ou naturais que causam a mudança do clima, as observações da mudança do clima, processos climáticos e atribuição, e estimativas da mudança do clima projetada para o futuro. O termo *mudança do clima* usado pelo IPCC refere-se a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devida à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Baseia-se em avaliações feitas em pesquisas anteriores do IPCC e incorpora novas descobertas dos últimos anos (IPCC, 2007a; IPCC, 2007b).

Os modelos Atmosféricos ou modelos climáticos são modelos matemáticos tridimensionais no espaço que consideram os principais processos que governam os movimentos da atmosfera e dos oceanos. Para isso, é resolvida uma série de equações que descrevem os fluxos de energia, momento, conservação de massa e leis dos gases (IPCC, 2007c). A superfície terrestre e dos oceanos é dividida ou representada por uma grade de células regulares, e cada ponto de grade ou célula é composta por várias camadas ou níveis verticais na atmosfera, e todas essas células e camadas se comunicam entre si, fornecendo todas as principais variáveis climáticas, como a precipitação, umidade relativa, radiação solar, velocidade dos ventos, pressão atmosférica, temperatura, entre outras, tanto para o período passado quanto para o período futuro.

Os modelos Atmosféricos podem ser enquadrados ou classificados de duas formas, modelos globais (ou GCM) e modelos regionais. Os modelos globais são modelos que representam ou simulam as variações e as interações climáticas em escala global, com uma grade de centenas de quilômetros, ou seja, eles apresentam uma escala não muito refinada, e os modelos regionais são uma parte dos modelos globais gerados a partir do método chamando de *downscaling*, ou seja, eles representam apenas uma parte do globo, como um continente ou um país, por exemplo. A sua vantagem é que a sua grade é bem menor se comparada com um modelo global, na casa das dezenas de quilômetros, reduzindo o tempo de processamento. A maior parte dos modelos regionais é baseada em modelos globais.

Os modelos Atmosféricos que foram utilizados neste trabalho serão listados na Tabela 1. Dentre os modelos utilizados, apenas o modelo Eta é um modelo regional, os demais modelos são modelos globais.

Tabela 1. Modelos Atmosféricos utilizados.

Número	Modelo	Origem	Número	Modelo	Origem
1	Eta-40km CTL	CPTEC/INPE*	6	NCAR-CCSM3 (NCCSM)	EUA
2	Eta-40km MED	CPTEC/INPE	7	MPIM:ECHAM5 (MPEH5)	Alemanha
3	Eta-40km LOW	CPTEC/INPE*	8	MRI-CGCM2.3.2 (MRCGCM)	Japão
4	Eta-40km HIG	CPTEC/INPE*	9	HadCM3	RU
5	Eta-20km CTL	CPTEC/INPE*	10	GFDL:CM2 (GFCM21)	EUA

\* *downscaling* dinâmico das projeções do modelo HADCM3, realizado por meio do modelo Eta.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

No presente trabalho serão analisadas três das principais grandes bacias dentro da delimitação da bacia do Atlântico Leste, sendo as bacias do rio Doce, do Rio Jequitinhonha e do Rio Mucuri.

A bacia do Rio Doce possui uma área de drenagem de aproximadamente 83.400 km<sup>2</sup>, sendo que 86% dessa área estão dentro do Estado de Minas Gerais e o restante se encontra dentro do Estado do Espírito Santo. A precipitação média anual dentro da bacia varia entre 900 a 1500 mm, o clima varia de tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes na parte mais alta da bacia e clima quente com chuvas de verão ao longo da bacia.

A bacia do Rio Jequitinhonha possui uma área de drenagem de aproximadamente 69.600 km<sup>2</sup>. A precipitação média anual dessa bacia é a que apresenta a maior variação entre as demais, que vai de 600 a 1600 mm. O clima dentro da bacia varia um pouco, sendo semiárido, na parte mais alta da bacia, com o período de seca superior a seis meses por ano, e semiúmido na parte mais baixa da bacia.

### 4. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste na aplicação de um modelo Hidrológico chuva-vazão para representar a resposta de bacias hidrográficas sob o efeito do clima do presente e do futuro, ou seja, gerar cenários de vazões futuras em usinas hidroelétricas dentro das bacias analisadas. O clima do presente e do futuro é representado pelos modelos Atmosféricos. O modelo Hidrológico utilizado para simulação das vazões de cada bacia é o MGB-IPH. O modelo é composto pelos seguintes módulos: balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula e escoamento na rede de drenagem. (COLLICHONN, 2001).

Os cenários futuros foram divididos em períodos de 30 anos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Além disso, foi gerado um cenário que represente o clima presente, 1961-1990, para calibração e validação dos dados simulados.

No entanto, os modelos Atmosféricos ou modelos climáticos não conseguem representar perfeitamente o clima do presente e seus resultados apresentam erros. Estes erros são sistemáticos (bias) e causados por uma imperfeita conceptualização dos fenômenos e processos que governam o clima e pela influência da discretização espacial dos modelos (TEUTSCHBEIN e SEIBERT, 2012). Nesse sentido, a etapa de remoção de bias nas variáveis climatológicas resulta de vital importância, evitando que erros intrínsecos aos modelos climáticos sejam propagados para a modelagem hidrológica influenciando os valores das vazões obtidas no local de implantação das usinas hidrelétricas de interesse para este estudo.

Três metodologias diferentes foram aplicadas. No caso dos dados de precipitação do modelo Eta, foi utilizada a metodologia de remoção de bias denominada mapeamento quantil-quantil (*Quantile-Quantile mapping*), enquanto que nas variáveis climatológicas: temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa, vento em superfície e radiação solar, a metodologia utilizada é denominada de escalonamento linear (*Linear scaling*). Nos valores de todas as variáveis fornecidas pelos modelos globais foi aplicada a metodologia denominada taxa de câmbio (*Delta change*). A escolha de diferentes metodologias para os diferentes conjuntos de dados foi baseada na análise dos comportamentos dos erros e também em função da discretização espacial e temporal dos dados.

A metodologia de remoção de bias denominada Mapeamento quantil-quantil (*Quantile-Quantile mapping*) é baseada na comparação das curvas de probabilidade acumulada (curvas que

mostram a probabilidade da variável ser menor ou igual a um determinado valor) da variável observada e da variável estimada por um modelo climático no período atual (1961 a 1990) e futuro. Em Bárdossy and Pegram (2011), a metodologia é descrita com maiores detalhes.

A metodologia de remoção de bias denominada Escalonamento linear (*Linear Scaling*) é baseada no cálculo de um coeficiente de correção a partir das diferenças entre as normais climatológicas observadas e estimadas pelos modelos climáticos no período atual (1961 a 1990). Esse mesmo coeficiente é posteriormente utilizado na remoção de bias nos demais períodos futuros. Em Lenderink *et al.* (2007), a metodologia é apresentada com maiores detalhes.

A metodologia de remoção de bias denominada Taxa de câmbio (*Delta Change*) é baseada no cálculo das anomalias entre os valores estimados pelos modelos climáticos no período atual e no período futuro. O valor da anomalia é posteriormente utilizado para perturbar a série observada da variável no período atual gerando a série corrigida a ser utilizada nos períodos futuros. Essa metodologia foi aplicada somente nos casos dos dados dos modelos globais. Essa metodologia é bem conhecida na literatura e pode ser encontrada em Gellens e Roulin (1998), por exemplo.

Feitas todas as remoções de bias, os dados são interpolados para a grade do modelo Hidrológico, que por sua vez fornece as séries de vazões sob os efeitos dos cenários climáticos futuros.

## 5. RESULTADOS

Para o presente trabalho serão analisados os dados referentes às vazões afluentes futuras de apenas uma usina hidrelétrica (UHE) para cada bacia.

### 5.1. Bacia do Rio Doce – UHE de Mascarenhas

Na bacia do Rio Doce, a usina Mascarenhas está localizada mais a jusante do rio, por isso sendo a mais representativa. Em todas as demais usinas dentro da bacia, os resultados são bastante semelhantes.

Nas vazões geradas para a usina Mascarenhas, durante o primeiro período do cenário futuro de 2011 a 2040 (Figura 1), nota-se que há uma divergência entre os modelos com relação ao modelo de referência (Eta 1961 1990 CTL), principalmente no período úmido. O modelo MRCGCM é o que apresenta maiores valores de vazões médias mensais. Os maiores valores de vazão são apresentados, em geral, nos meses de Dezembro e Janeiro. Os cenários do modelo Eta são os que apresentam as menores vazões, sendo que o modelo Eta 40 km MED apresenta as menores descargas em todos os períodos.

No intervalo entre 2041-2070 (Figura 1), os modelos GCM apresentam uma queda nas vazões em relação ao período passado, aproximando-se mais das vazões do modelo de referência (Eta 1961 1990 CTL). Os modelos Eta 40 km CTL, Eta 40 km HIG e o Eta 20 km CTL apresentaram uma forte queda das vazões se comparados com as simulações do período anterior. O modelo Eta 40 km MED continua apresentando as menores vazões entre todos os modelos. O que chama a atenção é uma seca mais prolongada simulada pelo modelo GFCM21.

No período de 2071 a 2099 (Figura 1), percebe-se que a diminuição das vazões são ainda mais expressivas que nos períodos anteriores. O modelo HADCM3 é o único modelo Global que simulou vazões abaixo do modelo de referência em todos os meses. O modelo Eta 40 km MED continua sendo o que simulou as menores descargas, seguido do modelo Eta 40 km HIG. Os meses

de Dezembro e Janeiro são caracterizados por apresentarem as maiores descargas por todos os modelos.

De acordo com a Tabela 2, é possível inferir que para a usina Mascarenhas, as simulações apresentam diferenças nas variações das maiores e menores descargas representadas, respectivamente, pelos percentis 10% e 90%, assim como nas médias. No entanto, na maioria dos modelos é mostrada uma diminuição das variações até o final do século.

Em geral, as projeções apontam uma diminuição tanto das descargas médias como das associadas aos percentis 10% e 90%. As maiores discrepâncias ocorrem entre as simulações do modelo Eta e dos modelos GCM, principalmente para o primeiro período analisado (2011-2040).

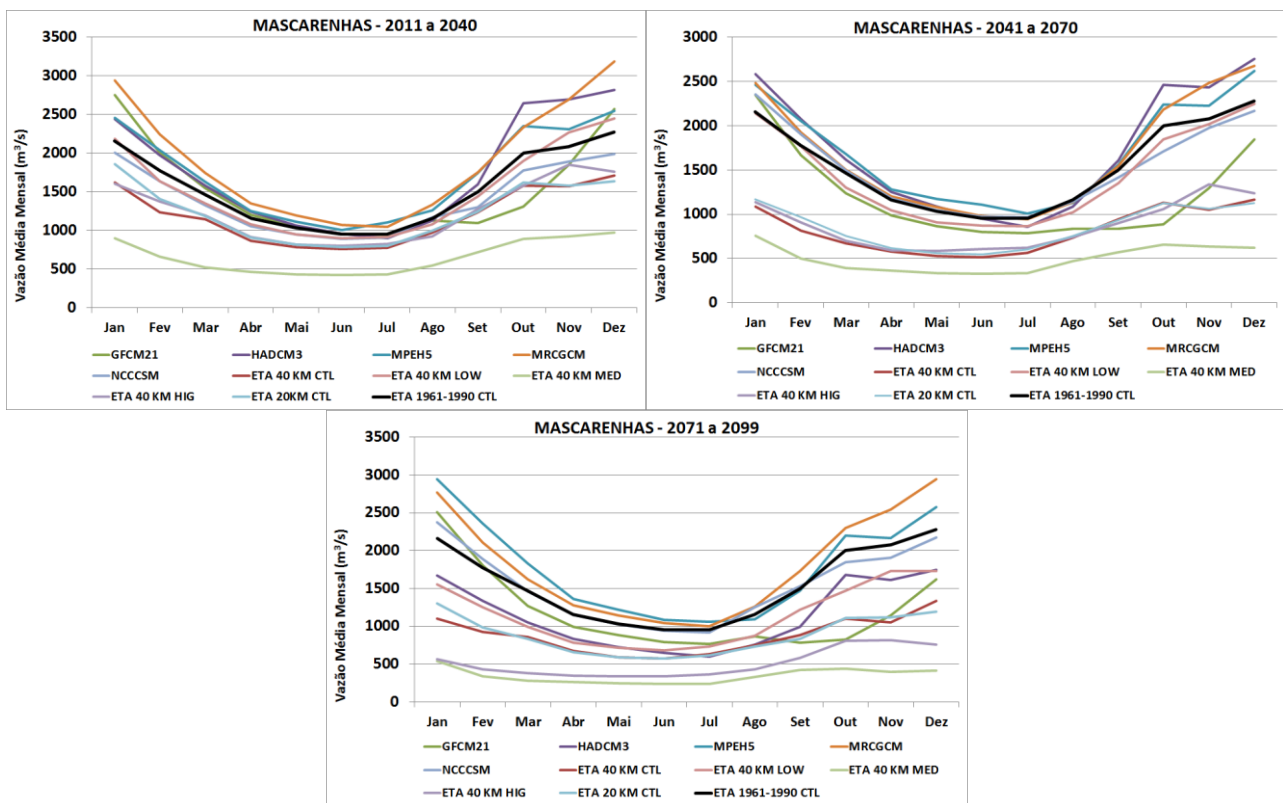


Figura 1 -Vazões médias mensais calculadas pelo MGB para todos os modelos em Mascarenhas, para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099.

Tabela 2. Vazão nos percentis 10%, 90% e média em  $m^3/s$ , para a usina de Mascarenhas. Referente aos períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099.

Modelo Climático	Período 2011 a 2040			Período 2041 a 2070			Período 2071 a 2099		
	10%	90%	Média	10%	90%	Média	10%	90%	Média
<b>Eta 40km CTL</b>	2080.2	533	970.7	1448	334	648.9	1507.5	448.6	732
<b>Eta 40km LOW</b>	2647.9	726.5	1291.4	2617.2	677.9	1159.5	2083.4	517.5	925.3
<b>Eta 40km MED</b>	1129.5	320.1	537.3	890	253.9	419.9	617.3	177.2	276.5
<b>Eta 40km HIG</b>	2215	569.1	1045.1	1524.4	368.7	725.9	826.4	254.3	425.6
<b>Eta 20km CTL</b>	2160.5	516.4	1021.5	1483.4	376.3	694.9	1434.5	466.2	737.5
<b>GFCM21</b>	2638.2	781.7	1297.9	2091.3	621	980.2	1983.8	620.8	977.8
<b>HADCM3</b>	3239.5	786	1419.6	3121.1	790.1	1414.9	2054.3	538.6	929.1
<b>MPEH5</b>	3048.8	842.2	1481.3	2918.9	852.4	1462.5	3059.7	863.1	1489.2
<b>MRCGCM</b>	3419.7	909	1568.3	2996.1	804.2	1385.5	3239	860.9	1482.4
<b>NCCSM</b>	2374.2	719.7	1236.8	2632.4	793.6	1332	2718.1	781.4	1324.7



## 5.2. Bacia do Rio Jequitinhonha – UHE de Itapebi

Na bacia do Rio Jequitinhonha, a usina de Itapebi está localizada mais a jusante, por isso sendo mais representativa. Em todas as demais usinas dentro da bacia, os resultados são bastante semelhantes.

Durante o primeiro período do cenário futuro de 2011 a 2040 (Figura 2), nota-se que há uma coerência entre os modelos com relação ao modelo de referência (Eta 1961 1990 CTL) para o período de estiagem. Já para o período úmido, há uma maior variação entre os modelos, sendo que a maioria deles simula uma redução das vazões. O modelo Eta 40 km MED é o mais crítico, reduzindo drasticamente as vazões no período úmido.

Para o período entre 2041-2070 (Figura 2), há diferenças entre as simulações dos modelos. As vazões dos modelos GCMs, em geral, estão maiores que as do modelo de referência nos meses de janeiro e dezembro, nos demais meses eles se aproximam bastante do modelo de referência. Já para as vazões dos modelos Eta, as vazões estão bem abaixo do modelo de referência, principalmente no período de estiagem.

O período de 2071 a 2099 será apresentado na Figura 2. As vazões dos modelos GCMs apresentam um aumento, em todos os meses, bem significativo em relação ao período anterior, principalmente nos meses de dezembro e janeiro. Os modelos Eta apresentam uma redução ligeiramente mais acentuada em relação ao período anterior. O modelo Eta 40 km MED é o mais crítico, apresentando um período de estiagem mais longo e mais severo que os outros modelos.

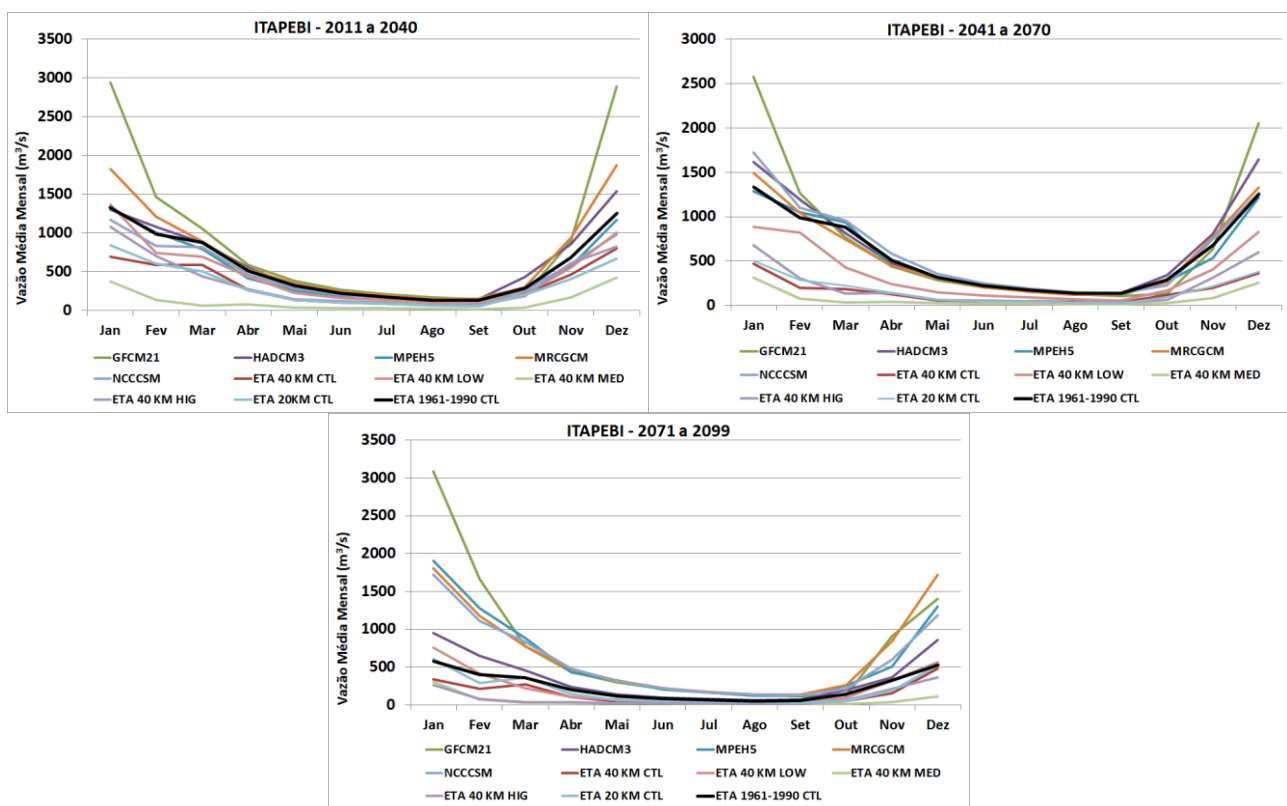


Figura 2. Vazões médias mensais calculadas pelo MGB para todos os modelos em Itapebi, para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099.

De acordo com a Tabela 3, é possível inferir que para a usina Itapebi, as simulações apresentam diferenças nas variações das maiores e menores descargas representadas,

respectivamente, pelos percentis 10% e 90%, assim como nas médias. No entanto, nos modelos Eta apresentam uma diminuição gradativa das mesmas até o final do século. Já para os modelos GCM, oscilam um pouco, mas com uma tendência de ligeiro aumento.

As vazões extremas (percentil 10% e 90%), do final do século, para alguns modelos GCM, ficaram mais intensas em relação aos períodos anteriores. Para os modelos Eta, há uma redução bem significativa nessas vazões, principalmente para o modelo Eta 40 km MED e Eta 40 km HIG.

Tabela 3. Vazão nos percentis 10%, 90% e média em m<sup>3</sup>/s, para a usina de Itapebi. Referente aos períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099.

Modelo Climático	Período 2011 a 2040			Período 2041 a 2070			Período 2071 a 2099		
	10%	90%	Média	10%	90%	Média	10%	90%	Média
<b>Eta 40km CTL</b>	943.7	42.4	143.2	407.4	7.0	57.6	439.8	6.7	49.4
<b>Eta 40km LOW</b>	1259.4	66.9	227.1	1004.3	35.6	162.8	611.7	16.7	80.4
<b>Eta 40km MED</b>	369.8	9.9	40.4	204.7	3.8	15.0	146.2	1.7	8.1
<b>Eta 40km HIG</b>	999.7	39.7	168.1	531.5	8.6	61.9	282.8	4.4	19.4
<b>Eta 20km CTL</b>	838.7	39.5	147.0	490.3	9.1	72.2	558.4	12.2	68.6
<b>GFCM21</b>	2481.4	129.7	402.5	1964.3	95.0	300.0	2037.4	98.9	301.6
<b>HADCM3</b>	1546.6	106.4	360.8	1669.6	105.1	343.7	871.9	45.2	163.4
<b>MPEH5</b>	1298.9	96.9	292.4	1362.9	94.6	317.7	1586.9	96.9	324.0
<b>MRCGCM</b>	1792.1	120.8	386.3	1448.1	94.8	323.4	1715.6	106.9	348.6
<b>NCCSM</b>	1153.9	92.3	294.9	1517.0	114.3	352.7	1419.8	100.8	325.6

## 6. CONCLUSÕES

Os modelos conseguiram captar bem a sazonalidade das vazões nas bacias, ou seja, os períodos de cheia e estiagem são coincidentes ou tem o mesmo comportamento.

De modo geral, os modelos apresentam uma tendência de redução das vazões médias mensais ao longo do século, sendo o último período (2071 a 2099) o mais crítico com algumas exceções.

Na bacia do Rio Doce, nos dois primeiros períodos, os modelos divergem um pouco, ou seja, alguns modelos apontam um ligeiro aumento das vazões e outros apontam uma redução mais significativa. Já no período de 2071 a 2099, os modelos são mais coerentes no comportamento das projeções (redução das vazões), porém uns são mais críticos que outros, principalmente os modelos Eta. As vazões de máximas e mínimas também sofrem uma redução, podendo variar um pouco dependendo do modelo e do período. Contudo, nota-se que as projeções dos modelos Eta são mais críticas se comparadas com os modelos globais.

Na bacia do Rio Jequitinhonha, nota-se que em todos os períodos os modelos apresentam coerência das projeções, principalmente no período da estiagem. As maiores diferenças estão nas projeções do período úmido, isso possivelmente deve-se ao fato de a bacia apresentar uma grande variação do comportamento da precipitação ao longo dos anos. Analisando as vazões máximas e mínimas, há uma divisão clara entre as projeções dos modelos globais e dos modelos Eta. Nos modelos Eta, as vazões apresentam uma tendência de redução das vazões ao longo do tempo. Já para os modelos globais, para o período de 2041 a 2070, as vazões apresentam uma redução em relação ao período anterior, com exceção do modelo HADCM3.

Para a bacia do Rio Mucuri, para o primeiro período os modelos, apresentam certa coerência entre as projeções. Ao passar do tempo, os modelos começam a divergir sobre o comportamento das vazões. Os modelos globais tendem a se manter próximos das vazões do modelo de referência. Os modelos Eta apresentam reduções das vazões ao longo do tempo, sendo o último período o mais

crítico. Nas vazões máximas e mínimas, os modelos Eta apresentam reduções bem mais acentuadas se comparados aos modelos globais.

Vale lembrar que os resultados das simulações das vazões, feitas pelo modelo MGB, são apenas projeções futuras, baseadas em cenários climáticos futuros simulados por dez modelos diferentes.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação dos Produtores Independentes de Energia – APINE pelo financiamento da pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS

BARDOSSY, A.; PEGRAM, G. 2011. Downscaling precipitation using regional climate models. *Water Resources Research*, v. 47. DOI:10.1029/2010WR009689.

COLLISCHONN, W. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. UFRGS, IPH, Porto Alegre. 194 p.

GELLENS, D.; ROULIN, E. 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, v. 210 (1-4), p. 242–258.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2001): Climate Change 2001: the scientific basis IPCC WG I, TAR. Cambridge Univ. Press, 881p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC: Climate Change 2007: The Physical Science Basis- Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, February 2007a.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC: Climate Change 2007: Impacts Adaptation and Vulnerability - Working Group II Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, April 2007b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE IPCC, QUARTO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS – QRA. Climate Change 2007: Synthesis Report, Valencia, November 2007c.

LENDERINK, G.; BUISSAND, A.; VAN DEURSEN, W. 2007. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, n. 3, p. 1145–1159.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, p. 12–29.