

MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO XINGU

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Fábio Rosindo Daher de Barros (Fatec, Bolsista PIBIC/CNPq)
fabio.barros@inpe.br

Daniel Andres Rodriguez (CCST/INPE, Orientador)
E-mail: daniel.andres@cptec.inpe.br

COLABORADORES

Lucas Garofolo Lopes (CCST/INPE)

Julho de 2015

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Nome: **Fábio Rosindo Daher de Barros**

Local de Trabalho: **CCST / INPE**

Título do Projeto: **Modelagem dos impactos das mudanças climáticas na operação dos reservatórios da bacia do rio Xingu**

Tipo de bolsa: **Bolsa PIBIC-IC**

Período: **Setembro/2014 a Julho/2015**

MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO XINGU

Fábio Rosindo Daher de Barros¹ (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)
Daniel Andres Rodriguez² (CCST/INPE, Orientador)
Lucas Garofolo Lopes³ (CCST/INPE, Colaborador)

RESUMO

Dada a importância da Bacia Amazônica, não só para o clima sul-americano como para o mundo, faz-se necessário os estudos de eventos climáticos presentes e futuros. Sendo um dos seus principais tributários, o rio Xingu possui uma bacia que estende-se por uma área de 531.250 km², equivalente a 13% da bacia Amazônica, sendo seu clima quente e úmido e seu relevo variado, com alturas desde 600 metros até 109 metros.

Este trabalho expõe as mudanças hidrológicas nas vazões da Bacia do rio Xingu decorrentes das mudanças climáticas, geradas pelo Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE) desenvolvido pelo Centro de Ciências do Sistema Terrestre. O modelo MHD foi alimentado com resultados dos cenários de mudanças climáticas desenvolvido no CPTEC-INPE com o modelo atmosférico Eta-INPE, e com dados de alguns dos modelos atmosféricos coordenados pelo CMIP5: MIROC5, HadGEM2, CSIRO-Mk3.6.0 e IPSL. Para simular o ciclo hidrológico, foram reunidas informações por meio de sensoriamento remoto, por exemplo: mapas de solo, vegetação e uso da terra; e mapas topográficos digitais terrestre. A calibração do MHD-INPE foi realizada de acordo com os postos fluviométricos selecionados para o estudo, apresentando resultados satisfatórios para o desenvolvimento.

Analisando as climatologias obtidas no período de 1970 à 1990, percebe-se que os membros do ETA-CPTEC adiantaram em um mês o ciclo sazonal, antecipando as secas para Agosto e as cheias para Fevereiro, enquanto que os restantes dos modelos representam adequadamente este ciclo. Por outro lado, todas as simulações apresentam cheias menos volumosas e estiagens mais volumosa em relação à observação.

Para o período futuro, de 2011 à 2100, todas as projeções mostram um decréscimo nas descargas, exceto o modelo IPSL, que supera as vazões do período presente. Os

¹ Aluno do Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas- **E-mail: fabio.barros@inpe.br**

² Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: daniel.andres@cptec.inpe.br**

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre - **E-mail: lucas.garofolo@inpe.br**

modelos alimentados pelo *Hadley Center* mantiveram a sazonalidade do período presente. A variabilidade entre os modelos tende a incrementar até o final do século, aumentando o grau de incerteza dos resultados.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. BACIA DO RIO XINGU	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS	5
4.1. DADOS OBSERVADOS	5
4.2. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO DE LARGA ESCALA	6
4.2.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	6
4.3. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA	7
4.4. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELOS ATMOSFÉRICOS GLOBAIS	8
4.5. GERAÇÃO HIDRELÉTRICA	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
5.1. DELIMITAÇÃO DA BACIA	11
5.2. CALIBRAÇÃO	11
5.3. CLIMATOLOGIAS	12
5.4. GERAÇÃO HIDRELÉTRICA	14
6. CONCLUSÃO	17
7. REFERÊNCIAS	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica da região hidrográfica do Xingu no Estado do Pará	4
Figura 2 - Delimitação das sub-bacias da Bacia do Rio Xingu.....	11
Figura 3 - Climatologias de Belo Monte para os períodos a) 1970 a 1990; b) 2011 a 2040; c) 2041-2070 e d) 2071-2100.	14
Figura 4 - Percentual de potencial energético para projeções futuras em relação ao presente para cada modelo utilizado.	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das estações fluviométricas da bacia.	5
Tabela 2 - Dados das funções objetivo	12

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANA - Agência Nacional de Águas
- CPC - Centro de Previsão Climática (*Climate Prediction Center*)
- CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- GCM - *General Circulation Model*
- HadCM3 - *Hadley Center Coupled Model*
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- MHD - Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- NOAA - Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)
- NCEP - Centros Nacionais de Previsão Ambiental (*National Centers for Environmental Prediction*)
- SRES - Relatório Especial de Cenários de Emissão (*Special Report on Emissions Scenarios*)
- SCE-UA - Algoritmo de Embaralhamento de Evolução Complexa (*Shuffled Complex Evolution*)
- UHE - Usina Hidroelétrica

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Amazonas, estende-se por cerca de 7 milhões de km², contemplando 5 países, mais de 7 mil afluentes e é a maior bacia fluvial do mundo. Com descarga média anual do rio Amazonas de 175 mil m³/s, a Bacia Amazônica representa 1/5 da água que é exultada ao oceano por todos os rios do planeta. Devido a esta dimensão, a bacia Amazônica é foco de estudos e pesquisas de diversas áreas, desde engenharias até ciências socioeconômicas.

A bacia do rio Xingu, uma das principais sub-bacias da bacia Amazônica, possui aspectos marcantes em suas características geográficas e físicas que estão fortemente atreladas ao clima e as mudanças climáticas, pois a mesma corta dois importantes biomas brasileiros: Cerrado e Amazônia. Tendo sua extensão totalmente em solos brasileiros, dividida entre o Estado do Pará e Mato Grosso, com vazões atingindo a casa 8000 m³/s, possui potencial energético estimado em 5 mil MW.

A geração de energia elétrica na bacia Amazônica tem sido objetivo de estudo cada vez mais frequente. Trabalhos sobre projeções climáticas indicam um futuro com queda nas tendências de chuvas (Chou et al, 2015), tornando o sistema hidroelétrico mais sensível, haja visto que variações das precipitações estão diretamente correlacionadas com as descargas (Chiew, 2006).

Esta tendência de queda nas vazões pode ser vista na bacia do rio Tapajós. Utilizando oito GCM sob projeções de mudanças climáticas do SRES A1B e RCP4.5, Mohor et al (2015) indica um decréscimo na produção anual de energia devido as mudanças na precipitação e a limitação na capacidade máxima de produção instalada.

Porém, segundo Siqueira Júnior (2015), não há um consenso entre os modelos quando se trata de produção de energia. O modelo de regime regional sobre projeções do cenário SRES A1B apresenta um decréscimo no potencial de produção energética relacionado à queda nas descargas. Em contra partida, os modelos coordenados pelo CMIP5, no geral, apresentam um incremento na geração de energia.

Este trabalho foi confeccionado a fim de compreender os efeitos das mudanças climáticas globais na operação dos reservatórios e produção de energia da bacia do rio Xingu. Para atingir o propósito deste trabalho, através de simulações com o modelo hidrológico MHD-INPE alimentado com dados provenientes do modelo atmosférico regional Eta-INPE sob projeções climáticas futuras do cenário SRES A1B (IPCC, 2007) e modelos atmosféricos globais coordenados pelo *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* no cenário RCP 4.5 (IPCC, 2013).

Foram realizadas comparações das projeções presentes e futuras, 2011 a 2100, tendo como objetivo mensurar as alterações decorrentes das mudanças climáticas de caráter sazonal, variabilidade dos valores máximos e mínimos e estabilidade de valores médios. Levando em conta a análise das médias de longo prazo, avaliou-se a variabilidade energética futura em relação ao potencial hidráulico para a geração de energia firme estabelecida no presente.

2. OBJETIVO

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo estudar os efeitos das mudanças globais na operação dos reservatórios da bacia do rio Xingu.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Calibrar o Modelo Hidrológico Distribuído desenvolvido pelo INPE para modelar as vazões das bacias do Rio Xingu;

Analisar os impactos das mudanças climáticas na produção de energia em barragens do rio Xingu em simulações com o modelo hidrológico MHD/INPE;

Fornecer subsídios para avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas nas políticas de operação das barragens.

3. BACIA DO RIO XINGU

Com 7,68% do continente sul americano e cerca 13% da Bacia Amazônica, a bacia do rio Xingu (Figura 1) possui uma área de drenagem de aproximadamente 531.250 km², situando entre dois biomas brasileiros: Cerrado e Amazônia com relevo variando de aproximadamente 600 metros no alto Xingu, a 15 metros no baixo Xingu.

A nascente do rio principal está localizada na serra do Roncador, no Mato Grosso, encontrando seus principais afluentes no Estado do Pará, os rios: Bacajá, Caeté, Chiche, Curuá, Fresco, Irirí e Ximxim. A bacia do rio Xingu é dividida entre dois estados brasileiros, Mato Grosso e Pará, tendo sua maior parte na região Norte e um potencial hidroelétrico de aproximadamente 5.140 MW.

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia, baseado nas “Normais Climatológicas - 1961-1990” (INMET,2008), a climatologia das temperaturas do ar na região, apresenta valores de temperatura média compensada anual entre 24 e 28°C, temperatura máxima anual entre 28 e 30 °C e temperatura mínima anual entre 18 e 24 °C Segundo Lucas et al.(2006), os valores de precipitação na bacia variam de 1500 a 2500 mm/ano, obtendo vazão média anual de 7966m³ s. Os valores de umidade relativa de ar permanecem acima de 80% em quase todos os meses do ano (Lucas et al., 2009).



Figura 1 - Localização geográfica da região hidrográfica do Xingu no Estado do Pará

Fonte: <http://www.aquariodesaopaulo.com.br/en/images/animais/mapa/raia-agua-doce.jpg>

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DADOS OBSERVADOS

Os dados hidrometeorológicos observados utilizados na elaboração deste trabalho foram obtidos da base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, As informações sobre as estações fluviométricas da bacia (Tabela 1) foram obtidos da Agencia Nacional de Águas – ANA.

Os dados de precipitação no período 1970-1990 foram utilizados na correção dos erros sistemáticos nos campos de precipitação simulados pelos modelos utilizados. As informações de descarga nas estações fluviométricas no mesmo período permitem a avaliação do desempenho do modelo hidrológico na simulação de vazões no tempo presente.

Tabela 1 - Dados das estações fluviométricas da bacia.

SB	Estação	ID - ANA	Rio	LAT	LON	Área (km ²)
1	Cajueiro	18650000	Rio Curuá	-54.550	-5.650	35600
2	UHE São Felix	18470000	Rio Xingu	-51.950	-6.750	210000
3	Pousada Matrinxa	18415000	Rio Culuene	-53.050	-13.550	11600
4	Laranjeiras	00554001	Rio Bacajá-	-54.250	-5.750	58700
5	Jus. Rio Preto	01052002	Rio Xingu-	-52.150	-10.050	12000
6	Boa Esperança	00252000	Rio Fresco -	-51.750	-6.750	42400
7	Aldeia Bacajá	18870000	Rio Bacajá	-51.450	-4.950	12800
8	Cipaúba	18880000	Rio Bacajá	-51.550	-3.750	24700
9	Pedra do Ó	18700000	Rio Iriri	-53.950	-4.550	122000
10	UHE Pombal	18514000	Rio Xingu	-52.550	-5.950	266000
11	Belo Horizonte	18520000	Rio Xingu	-52.850	-5.350	281000

12	Altamira	18850002	Rio Xingu	-52.150	-3.250	448000
13	Belo Monte	18900000	Rio Xingu	-51.750	-3.150	482000

4.2. MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO DE LARGA ESCALA

O modelo MHD-INPE foi desenvolvido a partir do MGB-IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas (COLLISCHONN et al.,2007) alterando as rotinas de estimativas de evaporação e de separação de fluxos. A parametrização do MHD-INPE combina a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) com os 8 princípios utilizados no TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica.

O Modelo Hidrológico Distribuído utiliza informações geomorfológicas, fluviométricas, meteorológicas e da configuração de sua rede de drenagem da bacia para executar simulações (PAIVA, 2014).

A bacia é subdividida em células regulares, comunicadas por canais de drenagem representando a rede de drenagem da mesma. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo, que resultam da combinação da vegetação, do tipo do solo e do uso da terra. O MHD-INPE gera valores diários de vazão para as sub-bacias divididas, além de usar dados observados para corrigir possíveis erros sistemáticos e calibrar os valores.

4.2.1. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

A calibração do MHD-INPE foi realizada de acordo com os postos fluviométricos selecionados para o estudo, isto é, aqueles com mais informações disponíveis no período entre 1970-1990. Utilizando o algoritmo SCE-UA, um algoritmo genético, baseado na teoria de simplex, que tem o objetivo de providenciar uma ferramenta robusta para ser usada na modelagem da vazão e erosão (SANTOS et al.,2002).

Para mensurar os efeitos da calibração, foram utilizadas funções-objetivo capazes de avaliar esse processo: o coeficiente de Nash Sutcliffe das vazões diárias (NSE) (Eq. 1) , o coeficiente de correlação das vazões diárias (R2) (Eq. 2), o coeficiente de correlação dos

logaritmos das vazões diárias (NSLog) (Eq. 3) e o erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (ΔV) (Eq. 4):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QO_i - QP_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QO_i - \overline{QO})^2} \quad (1)$$

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)} (1 - R^2) \quad (2)$$

$$NSLog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Log}(QO_i) - \text{Log}(QP_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Log}(QO_i) - (\overline{\text{Log}(QO)}))^2} \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n QP_i}{\sum_{i=1}^n QO_i} - 1$$

4.3. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS REGIONAIS DO MODELO ATMOSFÉRICO ETA

O modelo Eta é utilizado operacionalmente no CPTEC/INPE desde 1997 para o prognóstico de tempo (CHOU, 1996) com base na qual foi desenvolvida uma versão para uso em estudos de mudanças climáticas que requerem integrações de longo prazo (PESQUERO et al. 2009; CHOU et al. 2012; MARENGO et al. 2012). O modelo utiliza a coordenada vertical ETA (MESINGER et al, 1984). As equações dinâmicas são resolvidas através do esquema modificado de Mesinger (1974), os termos de inércia gravidade através de Janjic (1979) e o método de Arakawa é utilizado na diferenciação espacial, permitindo a

conservação de entropia e energia (JANJIC 1984; MESINGER 1984; MESINGER et al. 1988).

Três esquemas de convecção estão disponíveis com opções no modelo: Betts-Miller-Janjic (BETTSANDMILLER 1986; JANJIC 1994), Kain-Fritsch (KAIN 2004) e Kain-Fritsch com fluxo de momentum (BASTOS 2007). A micro física de nuvens é resolvida de acordo com Ferrier et al. (2002) e a transferência radiativa com o esquema GFDL (LACISAND HANSEN 1974; SCHWARZKOPFAND FELS 1991). O modelo utiliza o esquema de Mellor-Yamada 2.5 para a representação das trocas turbulentas na vertical (MELLORAND YAMADA 1982; JANJIC2002; MESINGER 2010), e a teoria de Monin-Obukhov na simulação das trocas de energia na camada limite superficial (ZILITINKEVICH, 1995; JANJIC, 1994; MESINGER et al. 1996). O modelo de superfície utilizado é o NOAH, originalmente desenvolvido por Pan e Mahrt (1987), e modificado por Chen(1997) e Ek (2003).

Para este trabalho foram utilizadas informações das downscaling dinâmico de quatro membros do *Hadley Center Coupled Model* (CHOU et al., 2011) desenvolvido com o modelo Eta para o período histórico (1970-1990) e as projeções para o futuro (2011-2099). Estas informações são utilizadas para alimentar o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias – MHD-INPE.

4.4. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DE MODELOS ATMOSFÉRICOS GLOBAIS

Os modelos atmosféricos utilizados nesse trabalho foram escolhidos com base em alguns modelos utilizados pelo CMIP5 (IPCC, 2007) no *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

Um deles é a nova versão do *Model for Interdisciplinary Research on Climate*, conhecido como MIROC. Desenvolvido pelo *Center for Climate System Research* (CCSR) da Universidade de Tokyo, o modelo encontra-se na versão 5, que diferente da sua versão anterior, obteve uma atualização das parametrizações do modelo para aumentar a resolução, porém com o mesmo tempo de execução que o MIROC3. Esta versão é baseada no núcleo dinâmico espectral e incluem novas metodologias físicas (NUMAGUTI et al. 1997),

mostrando melhorias na precipitação, campos atmosféricos e na simulação do El Niño (WATANABE, 2010).

Utilizou-se também o CSIRO-Mk3.6.0, atualização do GCM CSIRO-Mk3.5. Com uma melhora na resolução norte-sul reforçada nos oceanos comparada ao anterior, é capaz de simular interações sazonais tropicais e extratropicais (COLLIER et al., 2011). Na versão utilizada neste trabalho, uma das melhorias foi no regime de radiação, onde houve uma inclusão de um sistema de aerossol interativo (ROTSTAYN et al., 2010), permitindo o estudo de impactos de um número de agentes aerossóis no clima global.

O IPSL-CM5B, também utilizado neste trabalho, é um Earth System Model (ESM) que permite a execução de um conjunto de modelos com diferentes graus de complexidade, vários números de componentes, processos e resoluções diferentes. Foram acrescentadas algumas metodologias desde a sua versão anterior, o IPSL-CM4A, sendo estas: a inclusão dos processos necessários para o estudo da química do clima e interações climáticas biogeoquímica, aumentando a resolução vertical da estratosfera, como cita Dufresne (2011).

Por último foi também incorporado ao estudo o *Hadley Center Global Environmental Model2*, conhecido como HadGEM2. Projetado no intuito de simular e obter o grau de evolução centenária nas escalas do clima, incluindo retorno biogeoquímico, no qual a versão anterior, o HadGEM1 não possuía (COLLINS et al., 2011).

4.5. GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Através das análises climatológicas, foi realizado uma análise para mensurar o potencial de geração energética futura. Os dados de potencia máxima instalada multiplicado pelo valor de queda livre e a descarga média resultam na Energia Firme (MW). As informações utilizadas para gerar os dados de produção energética histórica foram os da futura UHE Belo Monte, sendo esse o exutório da bacia modelada neste trabalho.

Para analisar os impactos na produção de hidroenergia futura calculou-se as diferenças entre a produção histórica com base nas descargas médias do período 1970 a

1990 e os períodos futuros: 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2100. Esse método foi empregado para cada modelo e cenário utilizado no trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. DELIMITAÇÃO DA BACIA

Dentre os processos realizados, foi gerada uma base de dados geomorfológicos e hidroclimáticos para a bacia do rio Xingu. Esta, que se definiu pela modelagem da Bacia (Figura 2). As sub-bacias foram delimitadas a partir das coordenadas das estações disponibilizadas pelo portal HidroWeb, vistas na Tabela 1. O critério utilizado na escolha dos pontos das estações foi à existência de uma série consistente de vazão.

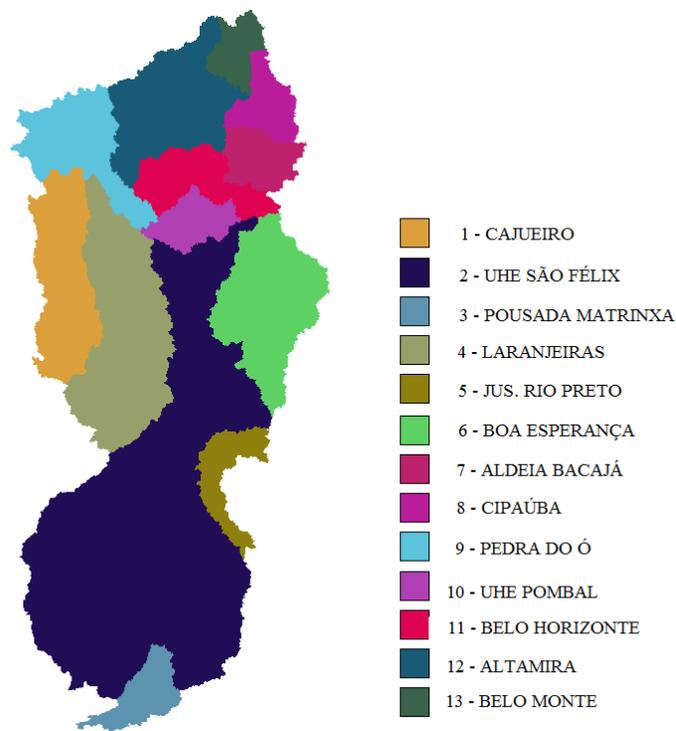


Figura 2 - Delimitação das sub-bacias da Bacia do Rio Xingu.

5.2. CALIBRAÇÃO

Após o processo de calibração, obtêm-se os valores das funções objetivo, dispostos na Tabela 1 para cada sub-bacia. Pode-se observar que os valores do coeficiente Nash-Sutcliffe das vazões diárias (NSE) estão dentro da faixa considerada ótima em todas

as sub-bacias. O coeficiente NSLog obteve valores aceitáveis na maioria das sub-bacias, apenas na 7 e 8 corresponderam de forma mediana a calibração.

O coeficiente R² de correlação das vazões diárias, obteve valores suscetivelmente admissíveis, assim como o coeficiente de erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (ΔV), onde os valores apresentaram-se satisfatórios para todas as sub-bacias.

Tabela 2 - Dados das funções objetivo

SUB-BACIA	NSE	NSLOG	R2	ΔV
1	0.8380	0.8169	0.8386	-0.0244
2	0.8722	0.8951	0.9158	0.1102
3	0.8073	0.8405	0.8099	0.0329
4	0.8909	0.9297	0.8921	0.0111
5	0.8506	0.8418	0.8509	0.0042
6	0.8788	0.9244	0.8793	-0.0091
7	0.8516	0.6613	0.8553	0.0719
8	0.8474	0.5643	0.8576	0.0980
9	0.9127	0.8978	0.9140	0.0220
10	0.9169	0.9247	0.9195	0.0135
11	0.912	0.9265	0.9203	0.0625
12	0.9243	0.9189	0.9301	0.0645
13	0.8793	0.8459	0.9369	0.1903

5.3. CLIMATOLOGIAS

Quanto ao desempenho dos modelos para o presente (figura 3.a), pode-se observar que nas cheias os membros ETA-CTL e M2, do modelo regional ETA-INPE adiantam em um mês o pico, enquanto o modelo global CSIRO-MK3 o atrasa em um mês. Durante a estiagem, os modelos globais respondem de modo satisfatório no tocante às vazões mínimas, ocorrendo no respectivo mês de Setembro acompanhando a Linha Base. Ao passo que os membros do modelo regional ETA-INPE, assim como nas cheias, adiantam em um mês o período mais seco, ocorrendo em Agosto.

Quanto aos valores de cheia exibidos pelos modelos utilizados, todos apresentam subestimativa da vazão máxima em relação à Linha Base. Os membros obtidos a partir dos dados do modelo ETA-INPE subestimam os valores de vazões mais acentuadamente que os

corresponde aos GCMs. Enquanto as cheias exibem leve decréscimo, a estiagem se apresenta mais volumosa que a Linha Base, com o comportamento inverso entre os modelos: os membros do ETA apresentam valores maiores e os GCMs menores.

Percebe-se que durante a transição da cheia para estiagem ocorre uma dispersão dos valores de vazão. Os membros do RCM ETA-INPE apresentam um comportamento com valores abaixo do esperado, enquanto a maioria dos modelos globais se mostra mais acentuada, porém, todos os modelos exibem uma seca mais volumosa que a Linha Base. No período da seca para próxima descarga, apenas os modelos coordenados pelo CMIP5 mostram comportamento condizente com a Linha Base.

Nas análises das projeções futuras, no período 2011 a 2100, as Figuras 3 b,c e d, apesar de mostrar uma grande variabilidade entre os modelos em cada período, se comparado a evolução individual, até 2100, no geral, os modelos matem um comportamento estável no tocante das alterações nas vazões. As poucas variações comportamentais que ocorrem até o final do século, são perceptíveis pela suavização das vazões máximas e uma manutenção dos volumes na estiagem. As sazonalidades mantiveram-se estáveis em relação aos valores futuros e apenas o membro M2 do modelo regional ETA-INPE antecipou tanto para cheia quanto para seca em dois meses no último período. Nota-se no decorrer do tempo uma diminuição entre o intervalo dos valores máximos e mínimos, perdendo sua característica sazonal. Isto é um reflexo da diminuição dos valores de enchentes e da manutenção dos de seca.

O modelo global IPSL, foi o único modelo a acompanhar, no futuro, a Linha Base, seja em suas características sazonais ou em valores mais próximos ao presente como um todo. O mesmo também respondeu em uma peculiaridade referindo-se no aumento das vazões a partir do primeiro terço de 2011- 2100. Esse comportamento opõe-se aos resultados obtidos para todos os outros modelos, sejam regionais ou globais, haja visto que, os outros modelos, nenhum mostrou aumento excedente aos do Linha Base.

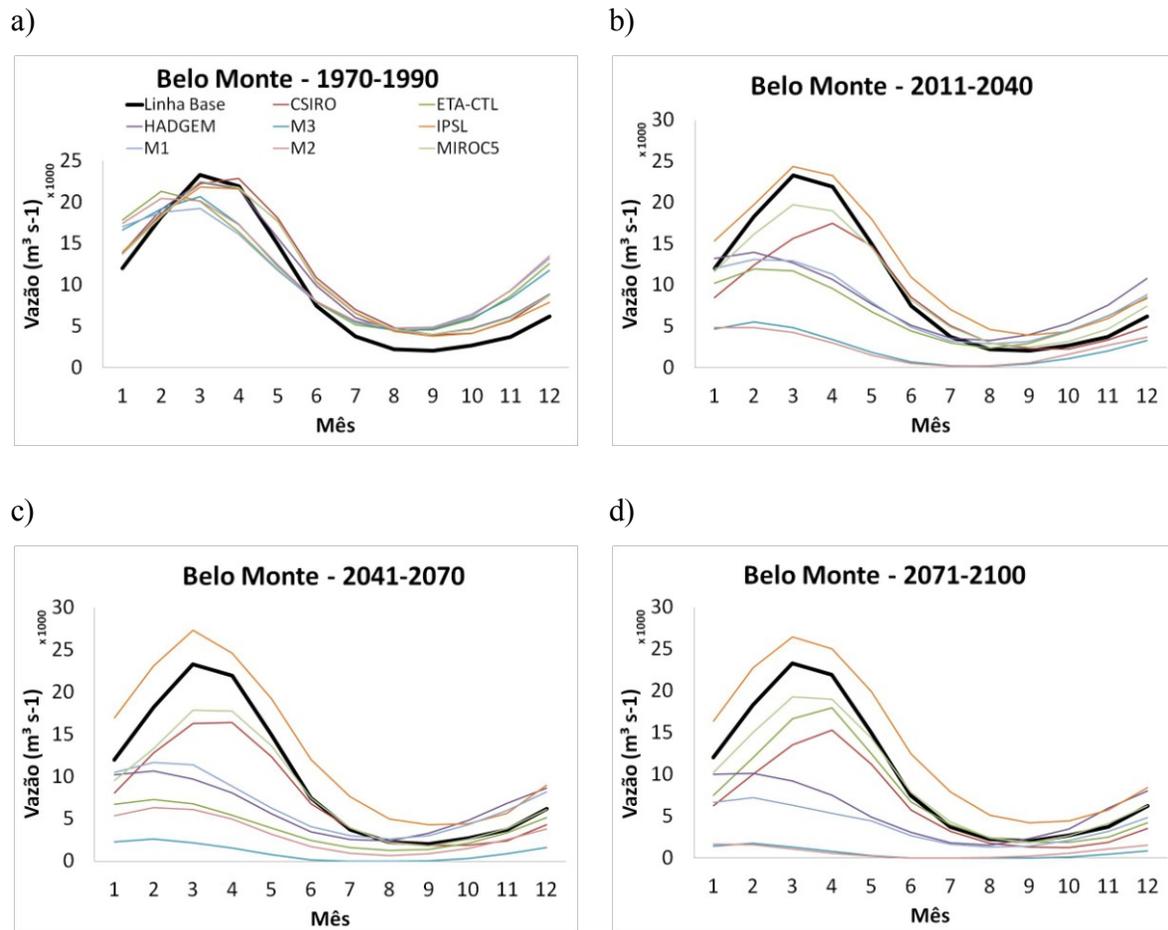


Figura 3 - Climatologias de Belo Monte para os períodos a) 1970 a 1990; b) 2011 a 2040; c) 2041-2070 e d) 2071-2100.

5.4. GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Para o período de 2011 a 2040, observa-se a queda mais brusca na produção energética (Figura 4), membros do modelo regional ETA-INPE caracterizam a maior queda, atingindo valores de no mínimo de 33% no potencial de geração energética e podendo até chegar aos valores de 80% por parte dos membros M2 e M3. Já por parte dos modelos globais coordenados pelo CMIP5, para o mesmo período, MIROC5, CSIRO e HadGEM2 descrevem, uma queda na Energia firme de no máximo 17% e no mínimo 28%.

No segundo terço do século, pode-se observar que há modelos apontando para uma queda de produtividade maior que no primeiro terço. Por exemplo, no membro ETA-CTL o maior valor de perda de geração energética ocorre neste período e com valor de 65% em relação ao potencial atual. O modelo global MIROC5 apontou uma queda de 28% para o mesmo período.

Ao final do século, constata-se que neste período a maioria dos modelos apresenta uma queda mais expressiva, visto que, como dito anteriormente, ETA-CTL e MIROC5 obtêm a maior queda na produção no segundo terço. Os demais modelos, com exceção do modelo global IPSL, tem seus máximos de perda operacional neste mesmo período. Com quedas que vão de 23% a 95% de produtividade como segue na Figura 4.

O único modelo que não aponta para a perda de produtividade energética foi o modelo global IPSL. Opondo-se a todos os outros resultados, foi o único que indica um aumento no potencial de produção de energia elétrica, acompanhando os resultados obtidos na análise climatológica.

É notório que as características dos modelos e cenários levam a resultados que colocam os grupos de coordenação de modelos a uma segregação, visto que os membros do modelo ETA-INPE possuem uma forte tendência a uma grave estiagem ainda neste primeiro quarto de século. Com relação aos modelos coordenados pelo CMIP5 obtém-se projeções menos pessimistas no tocante a produção energética ou como o IPSL, que mostrar um incremento no potencial de energia firme.

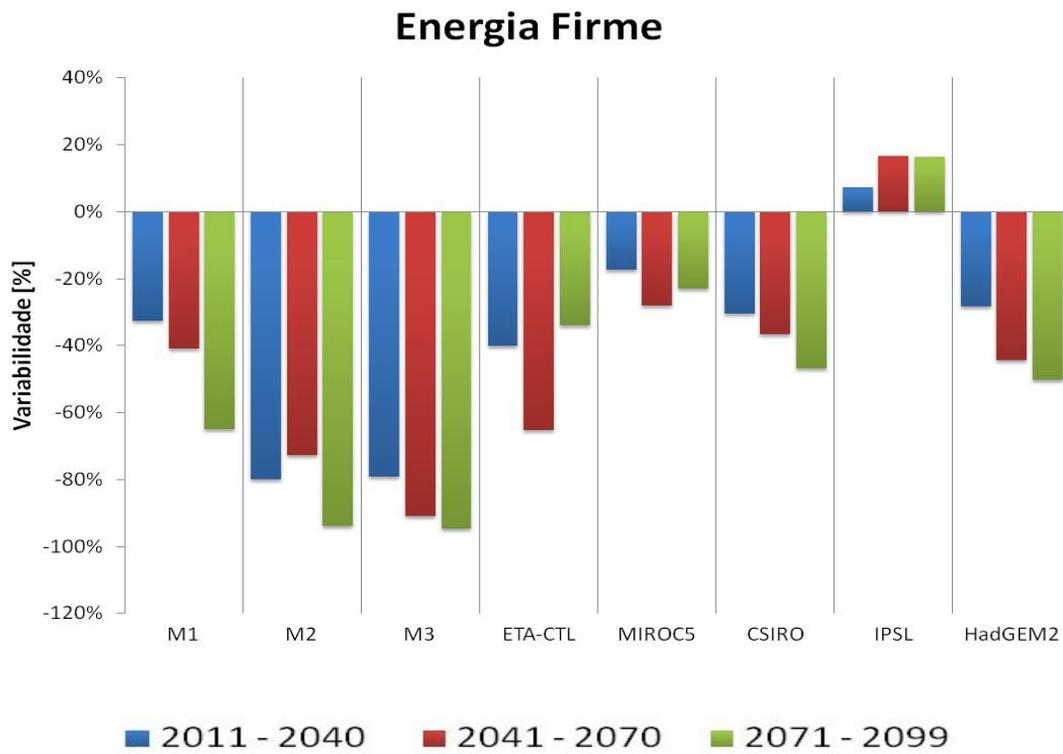


Figura 4 - Percentual de potencial energético para projeções futuras em relação ao presente para cada modelo utilizado.

6. CONCLUSÃO

O modelo hidrológico MHD-INPE, alimentado com dados observados, obteve sucesso em simular as vazões observadas nas 13 sub-bacias, com bons ajustes na calibração.

Os valores de vazão obtidos na simulação dos modelos globais e regionais corresponderam de maneira pouco variável à Linha Base. Os membros dos modelos regional Eta-INPE resultaram em valores médios de vazão que tangem a realidade. Diferente dos modelos globais utilizados no IPCC, onde os mesmos apresentaram um grau de realidade mais condizente à Linha Base. Pode-se concluir que os membros do Eta-INPE executados juntamente com o modelo hidrológico, tendem a atrasar as características sazonais.

Foram avaliados os impactos das mudanças climáticas globais no regime de vazões da bacia do Rio Xingu considerando dados dos modelos climáticos globais e membros do Eta-INPE. Nas projeções futuras os comportamentos são diversificados, porém, visivelmente mais sensíveis as mudanças climáticas dos cenários. Estas condutas ocorrem por parte das diferenças das características físico-meteorológicas de execução dos modelos e como visto no presente, os cenários que estão se baseando de cada um deles. Comportamentos de membros alimentados pelo mesmo centro ficam mais perceptíveis nas projeções futuras, mostrando uma queda muito mais acentuada nos valores de descarga nos modelos alimentados pelo *Hadley Center Coupled Model*. Porém, dados de modelos coordenados pelo CMIP5 também mostram divergências, devido a metodologias distintas de modelagem.

O fato de não ser possível concluir qual cenário é o mais apropriado, aumenta o grau de incertezas. Os resultados mostram uma queda na produção de energia em ambos os cenários na bacia do rio Xingu, restando a tomadores de decisão uma nova visão em se tratando do aproveitamento que uma UHE possa ter no futuro.

7. REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas (2013), **Hidroweb**. Base de dados hidrológicos, <http://hidroweb.ana.gov.br>
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. (1979), **A physically based variable contributing area model of basin hydrology**, Hydrological Sciences Bulletin, 24, 43-69.
- BEVEN, K. J. (1997), **Distributed Hydrological Modeling: Applications of the TOPMODEL Concept**. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- CHEN, F.; DUDHIA, J. (2001), **Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity**. Mon. Wea. Rev., 129, 569–585.
- CHIEW, F. H. S. (2006) **Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia**, Hydrological Sciences Journal, 51:4, 613-625, DOI: 10.1623/hysj.51.4.613
- Chou, S.C., et al., (2014) **Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios**. American Journal of Climate Change, 3, 512-525. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- COLLINS, M.; TETT, S.F.B.; COOPER, C. (2001), **The internal climate variability of a HadCM3, a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments**. Clim Dyn, 17:61–81, doi:10.1007/s003820000094
- COLLINS, W. J. *et al.* (2008), **Evaluation of the HadGEM2 model.**, HCTN 74, Met Office Hadley Centre Technical Note, Met Office, UK.
- COLLISCHONN, B., Allasia, D. G., Paz, A. R. **Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. , v.12, p.43 – 56, 2007
- DUFRESNE, J.L. *et al.* (2013), **Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5**. Clim Dyn, 40:2123–2165.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia .**Normais Climatológicas**, <http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=tmax>

IPCC, **Cambridge Univ. Press.** 2007

IPCC, **Cambridge Univ. Press.** 2013

Lucas et al., (2009) **Modelagem Hidrológica Determinística e Estocástica Aplicada à Região Hidrográfica do Xingu – Pará** - Revista Brasileira de Meteorologia

MARENGO J. A. (2008), **Water and Climate Change. Estudos Avançados** (USP.Impresso), v. 22, p. 83-96.

MARENGO, J.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, LM.; PESQUERO, JF.; SOARES, WR.; SANTOS, DC.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, DJ.; GOMES, JL.; BUSTAMANTE, JF.; TAVARES, P. (2011a), **Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. Climate Dynamics**, 38:1829–1848. DOI 10.1007/s00382-011-1155-5

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. (2011b), **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. Geophysical Research Letters**, v. 38, L12703, doi:10.1029/2011gl047436

MARENGO, J. A.; BETTS, R. (Coords.) *et al.* (2011c), **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia.** Disponível em <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/relatorio_port.pdf>.

MESINGER, F., Z. I. JANJIC, S. NICKOVIC, D. GAVRILOV, E D. G. DEAVEN, 1988: **The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment.** Mon. Wea. Rev., 116, 1493-1518.

MOHOR, G.S, et al., (2015) **Exploratory analyses for assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant.** J. Hydrol.: Reg. Stud. (2015)

ROTSTAYN, L.D.; Collier, M.A.; Dix, M.R.; FENG, Y.; GORDON, H.B.; O'FARRELL, S.P.; SMITH, I.N.; SYKTUS, J.I. (2010), **Improved Simulation of Australian Climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with interactive aerosol treatment**. *Int. J. Climatol.* 30: 1067-1088, doi:10.1002/joc.1952

SIQUEIRA JÚNIOR et al., (2015) **Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin** -Springer DOI 10.1007/s10584-015-1338-x

WATANABE, M. *et al.* (2010), **Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity**. *Journal of Climate*, 23, 6312–6335. doi:10.1175/2010JCLI3679.1

Zhao, R.J. and Liu, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology. Highlands Ranch**: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.

ZHAO, R.J. **The Xinanjiang model applied in China**. *Journal of Hydrology*, v. 135, p.371–381, 1992.