



**MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DOS RIOS MADEIRA E
TOCANTINS**

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

Luis Eduardo de Oliveira Floriano (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: eduardo.floriano@inpe.br

Daniel Andres Rodriguez (CCST/INPE, Orientador)

E-mail: daniel.andres@inpe.br

Rita de Cássia Silva von Randow (CCST/INPE, Colaboradora)

E-mail: rita.vonrandow@inpe.br

CACHOEIRA PAULISTA

JULHO DE 2014

**MODELAGEM DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DAS BACIAS DOS RIOS MADEIRA E
TOCANTINS**

Luis Eduardo de Oliveira Floriano

Relatório final de projeto de iniciação científica apresentado como pré-requisito para conclusão das atividades previstas no cronograma 2013/2014 no Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais junto ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq)

Orientador: Daniel Andres Rodriguez

Colaboradora: Rita de Cássia Silva von Randow

CACHOEIRA PAULISTA

JULHO DE 2014

RESUMO

A construção de barragens e reservatórios têm o intuito de sanar a falta de recursos naturais de uma região, além de incentivar o desenvolvimento e suprir as necessidades da população, gerando dessa forma, empregos, aproveitando o potencial hidroelétrico dos rios, diminuindo os impactos de eventos extremos como secas e enchentes, entre outros. Contudo, as mudanças climáticas globais podem alterar a disponibilidade hídrica dos rios que alimentam esses reservatórios e barragens, afetando seus níveis e conseqüentemente sua capacidade de gerar energia elétrica. Por isso, analisar os impactos das mudanças climáticas globais na produção de água é de extrema importância para prever se o potencial de energia hidroelétrica previsto para a usina será mantido. O objetivo deste trabalho é avaliar os impactos das mudanças climáticas nas bacias dos Rios Madeira e Tocantins, estimando a dimensão das variações nas vazões, temperatura e precipitação, além do impacto das vazões perante o potencial energético. Os resultados foram gerados através de simulações hidrológicas com o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) desenvolvido pelo INPE, que passou por diversos ajustes em seus parâmetros, afim de tornar aceitável a correlação entre as vazões simuladas pelo modelo com as vazões observadas, fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Para realizar as projeções, foram utilizados cenários de mudanças climáticas do modelo Eta, para o período histórico (1970-1990) e futuro (2011-2070), período que inclui a vida útil dos reservatórios. Os cenários climáticos fornecem forçantes de precipitação, velocidade do vento, radiação, ponto de orvalho, temperatura e pressão, sendo que cada cenário apresenta níveis de sensibilidades climáticas diferentes. Com estes resultados, foi possível avaliar os impactos potenciais das mudanças climáticas no regime de vazões. O cálculo da produção de energia foi aplicado para os reservatórios Estreito do Tocantins e São Salvador na bacia do rio Tocantins e Lajeado e Santo Antônio na bacia do rio Madeira, todos eles sendo reservatórios de fio d'água. Os resultados apresentam uma importante dispersão na magnitude dos potenciais impactos na produção de energia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Hidrelétricas da Bacia do Rio Tocantins.....	12
Figura 2: Hidrelétricas da Bacia do Rio Tocantins.....	14
Figura 3: Desenho de uma Usina Hidrelétrica.....	15
Figura 4: Bacia dividida em células interligadas pela rede de drenagem.....	17
Figura 5: <i>Sub-Bacias do Tocantins</i>	18
Figura 6: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M1 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070.....	23
Figura 7: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M2 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070.....	23
Figura 8: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M3 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070.....	23
Figura 9: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M4 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070.....	24
Figura 10: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina	25
Figura 11: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Descarreto	25
Figura 12: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí.....	25
Figura 13: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina	26
Figura 14: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Descarreto	26
Figura 15: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí.....	26

Figura 16: Hidrograma de Vazão para a Bacia 04 – Carolina	28
Figura 17: Hidrograma de Vazão para a Bacia 05 – Descarreto	29
Figura 18: Hidrograma de Vazão para a Bacia 09 – Tucuruí	29
Figura 19: Comparação entre os dados de vazão observados e simulados pelo modelo forçado com dados meteorológicos observados, sendo a) parte do escoamento alto da FDC (MWH); b) parte do escoamento baixo da FDC (MWL); c) inclinação da FDC para valores intermediários de escoamento (QSM) e d) diferença entre as estações seca e chuvosa (SEASON).....	31
Figura 20: Diferença das estatísticas (dados observados menos simulados pelo MHD com dados observados) para o período de calibração	32
Figura 21: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados observados versus climáticos para o período de 1970-1990	33
Figura 22: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados do climáticos para o período de 1970-1990 versus 2011-2040.....	34
Figura 23: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados do climáticos para o período de 1970-1990 versus 2041-2070.....	35
Figura 24: Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina.....	36
Figura 25: Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a Descarreto	36
Figura 26: – Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resultados das funções objetivas da bacia do Rio Tocantins para suas respectivas sub-bacias.....	28
Tabela 2- Resultados das funções objetivas da bacia do Rio Madeira para suas respectivas sub-bacias	30
Tabela 3- Potencial Energético previsto para as Usinas do Rio Tocantins e Madeira para os períodos histórico (1970-1990) e futuro (2011-2070).....	37

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agencial Nacional das Águas

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

FDC - Flow Duration Curve

HADCM3 - Hadley Center Coupled Model

HADGEM2 – Hadley Centre Global Environment Model version 2

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPSL - Institute Pierre Simon Laplace

MHD - Modelo Hidrológico distribuído

MIROC - Model for Interdisciplinary Research on Climate

NCEP - National Center for Environmental Prediction

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN - Sistema Interligado Nacional

UHE – Usina Hidroelétrica

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO.....	8
1.1 – OBJETIVOS.....	10
1.1.1 - OBJETIVO GERAL.....	10
1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
2- ÁREA DE ESTUDO.....	11
2.1 - BACIA DO RIO TOCANTINS.....	11
2.2 – BACIA DO RIO MADEIRA.....	13
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1 - USINA HIDRELÉTRICA.....	14
3.2 - ENERGIA FIRME.....	16
4- METODOLOGIA	17
4.1 - MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO.....	17
4.2 - MODELO REGIONAL Eta	19
4.3 – DOWNSCALING DINÂMICO DOS DADOS DO MODELO Eta	19
4.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DESEMPENHO DO MODELO E DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	20
5- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
5.1- CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS	22
5.2- CALIBRAÇÃO DO MODELO	27
5.3 – VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS DO PERÍODO HISTÓRICO	31
5.4 – CENÁRIOS HIDROLÓGICOS	32
5.6- EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO POTENCIAL ENERGÉTICO	37
6- CONCLUSÃO.....	38
7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1- INTRODUÇÃO

A Energia Hidrelétrica desempenha um papel fundamental no cenário energético do Brasil. Ela é responsável por 84% da energia elétrica gerada em todo o País (MMA, 2007), fornecendo o benefício de uma energia limpa e econômica. Desde a década de 70, o país vem investindo na expansão da geração elétrica hídrica, colocando o Brasil em uma posição de destaque em relação ao combate das mudanças climáticas.

O setor elétrico brasileiro é dividido em quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Norte e Nordeste, que caracterizam a divisão geográfica do País. Estes quatro subsistemas formam o SIN – Sistema Interligado Nacional, sendo que mais de 85% da capacidade instalada de geração de eletricidade no País são hidrelétricas com grandes reservatórios localizados em diferentes bacias hidrográficas e interligados por extensas linhas de transmissão (MMA. 2007).

As obras das usinas hidrelétricas, de uma forma geral, produzem grandes impactos sobre o meio ambiente, que são vistos ao longo do tempo de operação da usina, assim como ao longo do espaço físico envolvido. Os impactos mais significativos ocorrem nas fases de construção e operação da usina, que podem até mesmo afetar no andamento da própria obra.

As bacias dos Rios Tocantins e Madeira são de grande importância no cenário energético brasileiro. A bacia do Rio Tocantins constitui em um importante pólo de geração de energia, devido principalmente à sua localização geográfica. Ela vem sendo intensamente explorada, chegando a utilizar 90% de seu potencial inventariado. Isso leva à importância da bacia do Rio Amazonas, em especial a bacia do Rio Madeira, onde possui um alto potencial energético a ser explorado, e vem sendo alvo de grandes investimentos por parte do governo.

O aproveitamento hidrelétrico, embora não tenha a característica de consumir as águas do rio, acarreta em sensíveis alterações no regime natural das vazões, não só pelo efeito de regularização, mas também, pela possibilidade de variações bruscas das vazões, segundo as regras operacionais adotadas, baseadas nos critérios de operação do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, com exceção dos aproveitamentos que trabalham a fio d'água. (ANA, 2006) As usinas ainda proporcionam outros benefícios como o controle de cheias, turismo, navegação, abastecimento, irrigação, entre outros.

As mudanças ambientais globais podem afetar drasticamente a disponibilidade hídrica em reservatórios e barragens, prejudicando seus níveis e conseqüentemente sua capacidade de gerar energia elétrica. Dessa forma, é de extrema importância prever se o potencial de energia hidroelétrica previsto para essas usinas hidrelétricas será mantido, podendo ser analisado também se há viabilidade em manter as políticas de operação dos reservatórios atuais ou implementar novas políticas que resultem em benefício para o sistema como um todo.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas na geração de energia nas bacias dos rios Tocantins e Madeira. Devido à grande dificuldade encontrada para calibrar o modelo hidrológico para a bacia do Rio Tocantins, não foi possível desenvolver toda a metodologia proposta, a análise da produção energética para o período futuro foi simplificada e os resultados para o Rio Tocantins foram comparados com os resultados encontrados no trabalho de Siqueira Jr. (2014) para o Rio Madeira.

1.1 – OBJETIVOS

1.1.1 - OBJETIVO GERAL

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo estudar os efeitos das mudanças climáticas e seu impacto na produção de energia nas bacias dos Rios Tocantins e Madeira.

1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar o Modelo de Grandes Bacias desenvolvido pelo INPE para modelar as vazões das bacias do Rio Tocantins;

- Realizar simulações hidrológicas aplicando o Modelo Hidrológico Distribuído e utilizando os dados meteorológicos do modelo atmosférico Eta como entrada para o modelo;

- Analisar as simulações e fornecer subsídios para avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas na produção de energia dos reservatórios.

2- ÁREA DE ESTUDO

2.1 - BACIA DO RIO TOCANTINS

A bacia do Tocantins é a maior bacia totalmente brasileira, os rios que formam sua bacia se deslocam do Planalto Central no sentido Norte-Sul em direção ao Oceano Atlântico, atravessando regiões de relevo e vegetação variável (Tucci et al., 2000). Ela também é considerada uma das mais importantes bacias do país, possuindo área de 918.273 km² que equivale a 11% da área do território nacional, estendendo-se pelos estados de Tocantins (34,2%), Goiás (26,8%), Pará (20,8%), Mato Grosso (14,3%), Maranhão (3,8%) e Distrito Federal (0,1%) (MMA, 2006a).

A maior parte da bacia situa-se na região Centro-Oeste, abrangendo os rios Araguaia e Tocantins, tendo um regime hidrológico bem delimitado, com a época de cheia entre os meses de outubro e abril.

A nascente do rio tocantins localiza-se no Planalto de Goiás, sendo formado pelos rios Almas e Maranhão, com uma extensão de 1960km até sua foz no Oceano Atlântico. Seu principal tributário é o rio Araguaia, com 2600 km de extensão (MMA, 2006a).

A bacia do Tocantins possui uma área de drenagem de 757000 km², com precipitação média de 1869 mm e vazão média igual a 13624 m³/s. Sua evapotranspiração real é de cerca de 1371 mm (MMA, 2006a). O Clima na região é predominantemente tropical, com temperaturas elevadas, na ordem de 26° C, possui dois períodos climáticos bem definidos: o chuvoso, que abrange os meses de outubro a abril e o seco, de maio a setembro, onde apresenta baixa umidade relativa do ar.

A região do Tocantins-Araguaia é uma das mais importantes regiões hidrográficas do Brasil, devido a sua localização e seu potencial hidrelétrico, que apresenta um total de 26.285 MW (potencial estimado mais potencial

inventariado). Somente a usina de Tucuruí é responsável pelo abastecimento de energia elétrica de 96% do estado do Pará e 99% do estado do Maranhão (ANA, 2005).

O potencial hidrelétrico instalado na Região Hidrográfica totaliza 6981 MW, distribuídos por 28 centrais hidrelétricas. Entre as hidrelétricas destacam-se as usinas de Tucuruí, Estreito Tocantins, Luís Eduardo Magalhães (Lajeado), Peixe Angical, São Salvador, Serra da Mesa e Cana Brava, que são apresentados na figura 1:

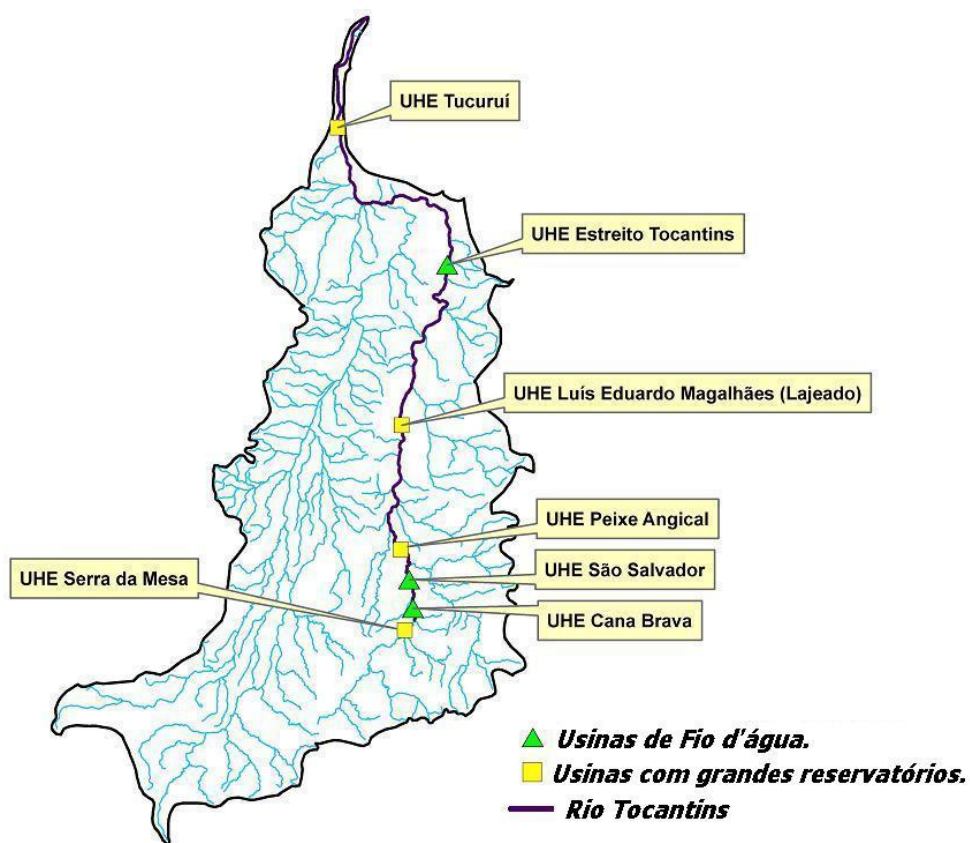


Figura 1: Hidrelétricas da Bacia do Rio Tocantins

2.2 – BACIA DO RIO MADEIRA

A bacia do rio Madeira está localizada na região amazônica, abrangendo os estados de Rondônia e Amazonas. Ela representa 23% do total da bacia amazônica, estendendo-se pelos países da Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%).

Seu clima é considerado quente e úmido, apresentando uma média de chuvas anuais na faixa de 2460mm (MMA, 2006b), Sua época de cheia ocorre entre os meses de março e dezembro, com temperaturas variando entre 25° e 29°C.

O Rio Madeira é considerado um dos mais importantes contribuintes para o rio Amazonas, possuindo uma área de drenagem de aproximadamente 1324727 km² e vazão média de 31200 m³/s⁻¹, que corresponde a 15% da vazão média Amazônica (MMA, 2006b).

A bacia do rio Madeira ainda possui um grande potencial energético a ser explorado, de aproximadamente 13144 MW, segundo dados do Ministério de Minas e Energia.

Duas grandes Usinas de geração de energia localizam-se na bacia, conforme a figura 2, são elas: UHE Jirau, com potencial energético de 3900MW, e UHE Santo Antonio, com potencial energético de 3580 MW, ambas localizadas no município de Porto Velho em Rondônia e sob responsabilidade do consórcio Furnas Centrais Elétricas S/A.

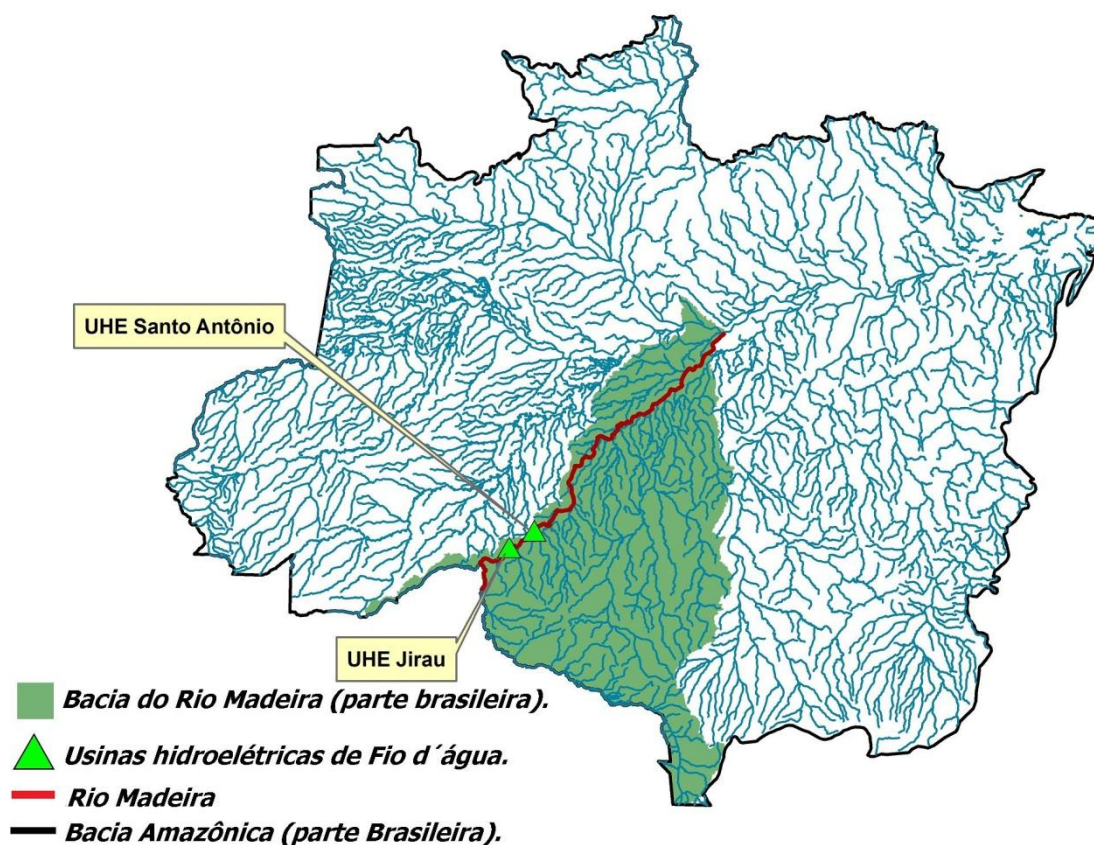


Figura 2: Hidrelétricas da Bacia do Rio Tocantins

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 - USINA HIDRELÉTRICA

A Usina Hidrelétrica é responsável por captar a energia cinética dos rios e transformá-la em energia elétrica, através de um gerador. Para produzir energia elétrica, é necessário integrar a vazão do rio, o volume de água e os desníveis do rio.

A estrutura da usina é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro. A barragem é responsável por represar as águas do rio, interrompendo seu percurso e

formando um reservatório, criando os desníveis para alimentar os geradores, além de regular a vazão dos rios em períodos de estiagem ou chuva. O sistema de captação e adução é formado pelos canais que ligam o rio até a casa de força, neles são instaladas as turbinas, que através do movimento resultante da passagem do rio, transformam energia cinética em energia elétrica. Após essa transformação, a água do rio é retornada ao seu leito pelo chamado canal de fuga. Já a função do vertedouro é regular a saída de água do reservatório sempre quando seus níveis excedem o limite recomendado, seja por excesso de vazão ou precipitação, evitando assim enchentes ao redor do reservatório. Essa estrutura pode ser vista na Figura 3.

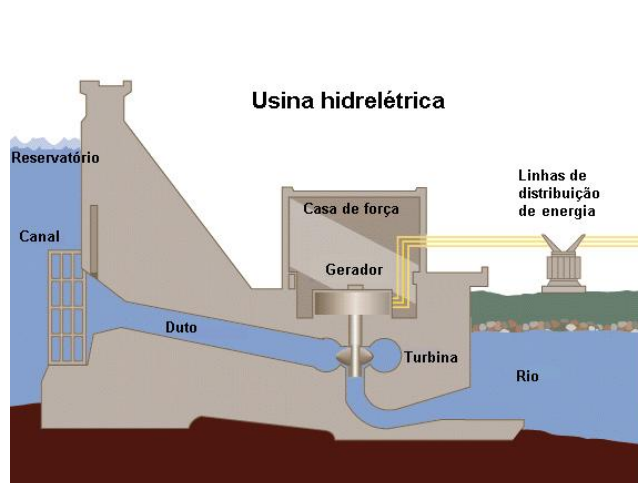


Figura 3: Desenho de uma Usina Hidrelétrica

As Usinas Hidrelétricas podem ser classificadas como fio d'água ou de grandes reservatórios. As usinas de fio d'água são aquelas que utilizam a velocidade do rio para alimentar seu gerador, desse modo, diminuindo os impactos sobre o rio e a região do reservatório. Já as usinas de grande reservatórios são aquelas formadas por uma barragem responsável por represar as águas do rio, desse modo, criando os desníveis necessários para alimentar o gerador. Nesse trabalho, será avaliado os impactos das mudanças climáticas globais sob a produção de energia das usinas hidrelétricas de fio d'água.

3.2 - ENERGIA FIRME

A Energia firme de um sistema corresponde à maior carga que esse sistema pode atender sem ocorrência de déficits nas piores condições hidrológicas registradas no histórico de afluições naturais (MME, 2007).

Para a avaliação da energia firme, deve ser considerado dois critérios: Sistema de Referência e Período Crítico. De acordo com o Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (MME, 2007) o Sistema de Referência é definido como um conjunto de usinas geradoras de energia elétrica em relação ao qual os benefícios energéticos das alternativas de divisão de queda em exame devem ser quantificados. Já o Período Crítico de um sistema é definido como o período histórico hidrológico em que os reservatórios desse sistema são plenamente utilizados, sem a ocorrência de déficits.

Sendo assim, a Energia Firme é definida como a energia média gerada pela(s) usina(s) ao longo do período crítico do sistema de referência.

A energia firme de cada usina pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$E_{fi} = 0,0088 \times H_{lmi} \times Q_{lmi} \quad (1)$$

Onde:

E_{fi} = Energia firme do aproveitamento i em MW médios;

H_{lmi} = Queda Líquida média do aproveitamento i , em metros;

Q_{lmi} = Descarga Líquida média do período crítico do aproveitamento i , em m^3/s ;

0,0088 = Coeficiente correspondente ao produto da massa específica da água ($1.000 \text{ kg}/m^3$), pelos rendimentos da turbina (0,93) e do gerador (0,97), pela aceleração da gravidade ($9,81 \text{ ms}/s^2$) e pelo fator 10^{-6} que permite expressar a energia em MW médios.

4- METODOLOGIA

4.1 - MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO

Para realizar as projeções da disponibilidade hídrica nas bacias sob o impacto das mudanças climáticas foram feitas simulações hidrológicas com o MHD-INPE, utilizando-se cenários de mudanças climáticas do modelo Eta-CPTEC.

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) fornece valores diários de vazão e evapotranspiração para a bacia como um todo e para suas respectivas células. Ele considera as sub-bacias limitadas como células regulares conectadas uma à outra por canais que representam a rede de drenagem, conforme a Figura 4. Os fluxos de água gerados na célula são guiados para os canais usando um reservatório linear simples e a troca de fluxos entre as células é resolvida exclusivamente através da rede de drenagem utilizando o algoritmo de Muskingum-Cunge (Tomasella e Rodriguez, 2014).

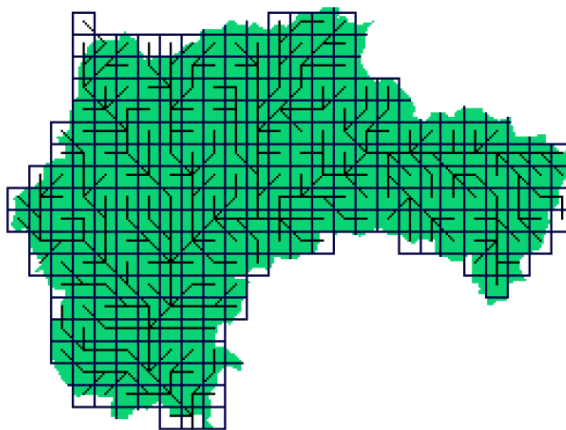


Figura 4: Bacia dividida em células interligadas pela rede de drenagem

Neste trabalho, desenvolveu-se um processo de calibração do MHD-INPE para bacia do Tocantins. Para efeitos de calibração, a bacia foi subdividida em 9 sub-bacias (Figura 5). A calibração é feita para aproximar ao máximo as vazões simuladas das observadas, e isso é feito para cada sub-bacia através de ajustes feitos nos seus parâmetros de solo de forma que se possa afirmar que o modelo é capaz de simular a vazão daquelas sub-bacias. O processo é feito comparando-se os dados resultantes da simulação feita pelo MHD-INPE utilizando a interpolação de dados meteorológicos históricos com os dados de vazão observados das estações fluviométricas, disponibilizados pela Agencia Nacional das Águas (ANA). O Modelo MHD-INPE utiliza o método de calibração automática Shuffled Complex Evolution Algorithm (SCE-UA) (Duan et al., 1994) aplicado à duas funções objetivas Nash-Sutcliffe (NS) e o logaritmo Nash-Sutcliffe (NashLog), onde ele ajusta valores dos parâmetros para que os resultados das vazões assemelhem-se com os observados. Os ajustes foram considerados satisfatórios para valores de Nash > 0.5 de acordo com Moriasi et al. (2007). Esse modo de calibração é utilizado conjuntamente com a calibração manual, na qual são verificados os comportamentos de variáveis do ciclo hidrológico, como armazenamento de água no solo, evapotranspiração, comparação gráfica entre hidrogramas simulados e observados, além do fechamento do balanço hídrico. São aceitáveis valores discrepantes dos dados observados até 10%.

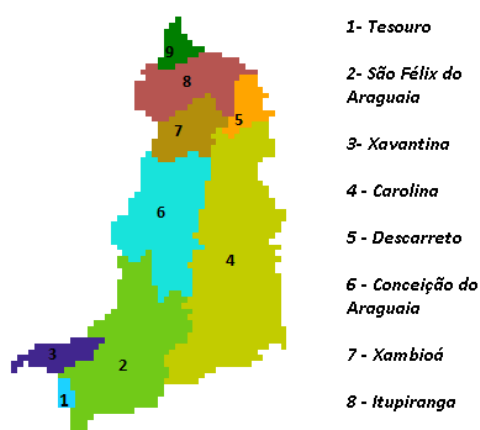


Figura 5: Sub-Bacias do Tocantins

4.2 - MODELO REGIONAL Eta

O modelo regional Eta simula com maiores detalhes fenômenos associados a frentes, orografia, brisa marítima, tempestades severas, enfim, sistemas organizados em mesoscala. Ele foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e se tornou operacional no National Center for Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger et al, 1988)

O modelo Eta faz um downscaling dinâmico do cenário A1B do modelo Global do NCEP, gerando quatro membros (M1, M2, M3 e M4) que representam diferentes sensibilidades climáticas. Serão utilizadas as simulações geradas para o período histórico (1961 à 1990) e para projeções futuras (2011-2040 e 2041-2070), que englobam o período de vida útil das hidrelétricas estudadas neste trabalho.

Os cenários climáticos do Eta possuem informações diárias de precipitação e outras variáveis meteorológicas. Para alimentar o MHD-INPE as variáveis utilizadas são: velocidade do vento, radiação global incidente, temperatura de ponto de orvalho, temperatura do ar e pressão atmosférica.

4.3 – DOWNSCALING DINÂMICO DOS DADOS DO MODELO Eta

O Modelo MHD necessita que os dados meteorológicos que serão utilizados em sua execução sejam preparados corretamente, delimitando a área de estudo, realizando o controle de qualidade e formatando os arquivos de forma a serem lidos pelo modelo.

Os dados do modelo Eta foram recortados para a área da bacia do rio Tocantins, e foi utilizada uma interpolação linear das variáveis para uma resolução do modelo (20km).

Após o ajuste dos dados, eles precisaram passar por uma análise para garantir sua consistência. A qualidade dos dados foi estudada através de análises estatísticas e da visualização dos campos, identificando possíveis erros nos dados.

Os Dados Meteorológicos provenientes do downscaling do modelo Eta que serviram de entrada para o MHD-INPE foram corrigidos com a utilização dos dados observados. Para os dados de precipitação, os erros sistemáticos foram corrigidos utilizando a transformação Q-Q, proposta por Bárdossy e Pegram, onde são comparadas duas retas de distribuição probabilística (FDC), uma para os dados gerados do downscaling dinâmico do modelo Eta, e outra para os dados observados, considerando o mesmo ponto da grade.

Para os demais dados meteorológicos, os erros sistemáticos foram corrigidos utilizando a metodologia de Delta Change (Hay et al. 2000), onde é deslocado a média dos dados observadas com a diferença média dos dados simulados entre o período de tempo observado correspondente e o período futuro desejado para uma área específica.

4.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DESEMPENHO DO MODELO E DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A análise estatística é utilizada para estudos de impactos baseando-se nas anomalias encontradas entre a simulação do período histórico, utilizando dados observados, e as simulações do período futuro, descrevendo sua evolução ao longo do tempo.

As Curvas de Duração de Vazão, (FDC's para a abreviação em inglês) representam a duração na qual uma determinada vazão foi igual ou superior ao longo do período de registro histórico. Pontos de vistas hidrológicos estatísticos e determinísticos coexistem em uma FDC: os determinísticos referem-se a uma FDC como uma representação do comportamento hidrológico de uma determinada bacia, como resultado da interpolação do regime climático,

tamanho, morfologia e permeabilidade da bacia; os estatísticos referem-se a uma FDC como a função de probabilidade excedente da corrente de vazão. A FDC fornece uma visão gráfica simples, porém abrangente, de toda variabilidade histórica geral associada com a corrente de vazão em um rio da bacia. (CASTELLARIN, 2014)

De acordo com Ley et al. (2011), são utilizados quatro índices na análise da FDC, que são descritos a seguir.

$$\textit{Seasonality} = \frac{\textit{média estação chuvosa} - \textit{média estação seca}}{\textit{média geral}} \quad (2)$$

$$\textit{QSM} = \frac{\textit{0.8 quantile} - \textit{0.2 quantile}}{\textit{mean}} \quad (3)$$

$$\textit{MWH} = \frac{\sum_1^H Qh}{H} \quad (4)$$

1 a H, vazões com probabilidade de excedência < 2%.

$$\textit{MWL} = \frac{\sum_1^L Ql}{L} \quad (5)$$

1 a L, vazões com probabilidade de excedência entre 70 e 95%

Onde Seasonality representa as diferenças entre as vazões do período chuvoso e o período seco, QSM a inclinação da FDC para valores intermediários de escoamento, MWH a vazão da parte superior da FDC e MWL, que corresponde a vazão da parte inferior da FDC.

Ao comparar as FDC's das vazões resultantes da simulação com dados observados e com dados dos modelos climáticos, pode-se, portanto, validar a utilização dos modelos climáticos sobre a bacia, com suporte dos índices mencionados anteriormente.

5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados da modelagem hidrológica sobre as bacias dos Rios Madeira e Tocantins. Para avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre essas bacias foi feito um trabalho de correção de erros sistemáticos nos dados meteorológicos proveniente dos modelos climáticos que alimentaram o modelo hidrológico. Dentre os dados corrigidos, precipitação e temperatura serão apresentados para exemplificar os resultados obtidos pela correção adotada. O modelo hidrológico simulou valores de vazão para os períodos histórico e futuro, onde foram comparados com os dados observados provenientes da ANA. Serão apresentadas as simulações para 3 sub-bacias escolhidas na bacia do Rio Tocantins, onde encontram-se hidrelétricas de fio d'água.

5.1- CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS

As figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam os gráficos de precipitação média de toda a bacia do Tocantins, antes e após a correção, para os cenários climáticos M1, M2, M3 e M4 do período histórico (1970-1990) e do período futuro (2011-2050). É possível ver pelos gráficos do período de 1970-1990 que os valores obtidos do downscaling do Eta, antes de passarem pela correção, possuem uma notável diferença em relação aos dados observados, após a correção dos dados, é possível ver que os valores são melhores ajustados aos dados observados.

No período Futuro (2011-2070), é possível notar que os dados de precipitação não corrigidos, durante a estação chuvosa, apresentam um aumento em relação aos dados observados do período histórico, enquanto que os dados corrigidos indicam uma considerável diminuição da precipitação, principalmente no período de 2041-2070.

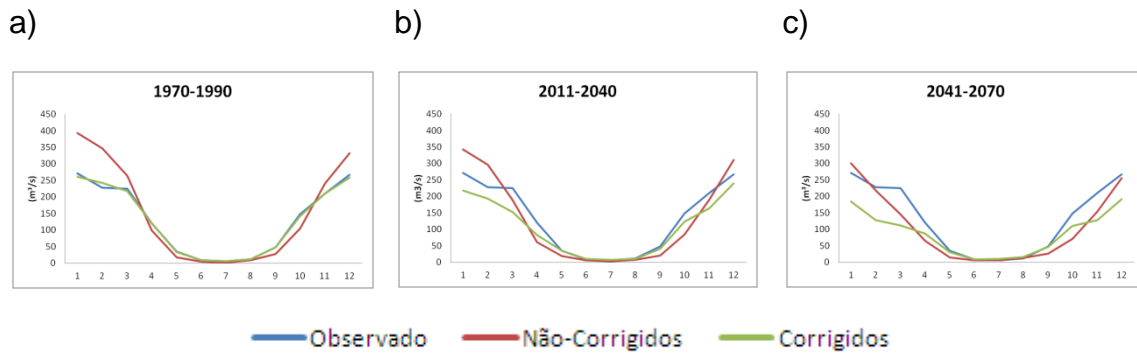


Figura 6: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M1 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070

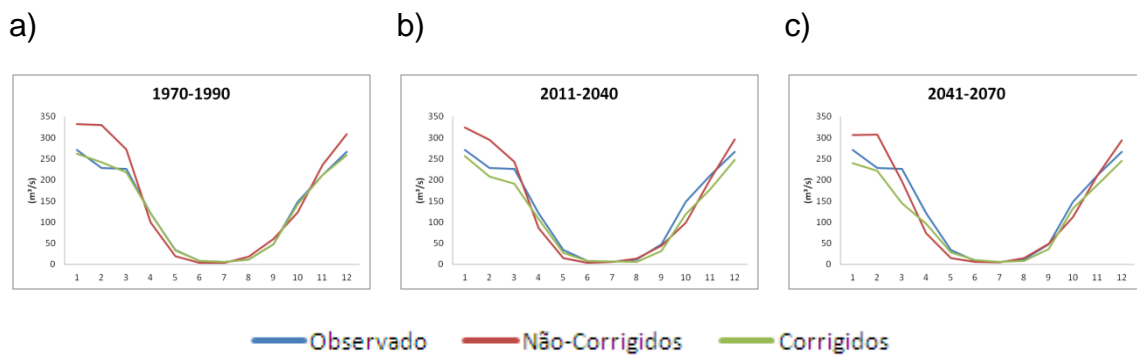


Figura 7: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M2 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070

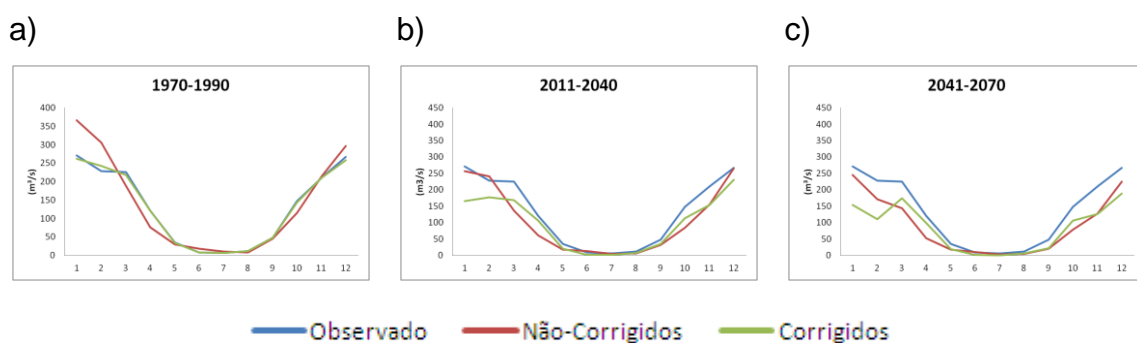


Figura 8: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M3 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070

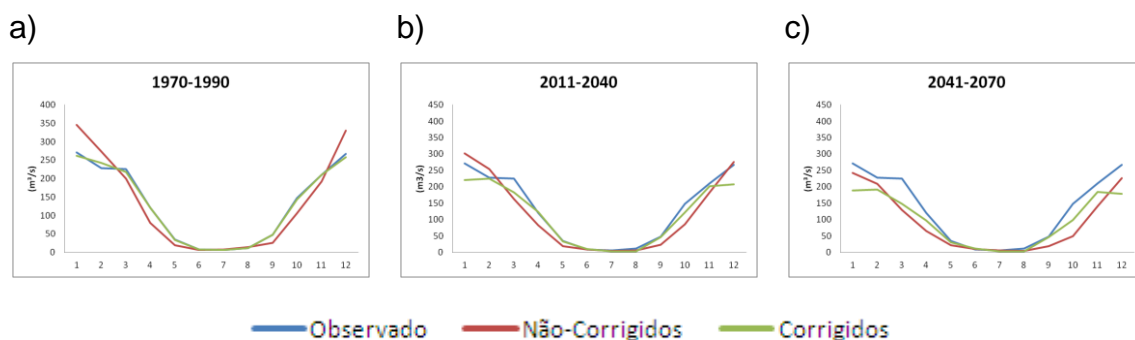


Figura 9: Média mensal de precipitação da bacia Tocantins do cenário M4 para os períodos a) histórico, b) 2011-2040 e c) 2041-2070

A seguir são apresentadas as climatologias mensais da precipitação e temperatura após a correção a fim de mostrar as diferenças dessas variáveis entre os cenários.

As climatologias mensais de precipitação do modelo Eta ajustaram-se bem aos valores da precipitação observados no período histórico após a correção dos erros sistemáticos, apresentando níveis baixos no período de seca (abril - outubro). No período futuro, as climatologias mensais de precipitação do modelo Eta, após a correção de bias, apresentaram uma diminuição da precipitação fora do período de estiagem em todos os membros, sendo a redução mais acentuada para os membros M1 e M3 no período de 2041-2070. A redução da precipitação ocorre da mesma forma para as 3 sub-bacias apresentadas (Figuras 10, 11 e 12). Espera-se que essa redução na precipitação seja vista na vazão dessas sub-bacias.

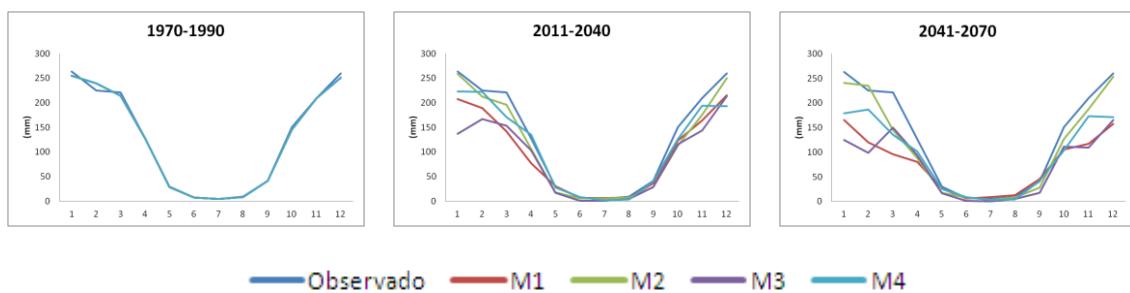


Figura 10: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina

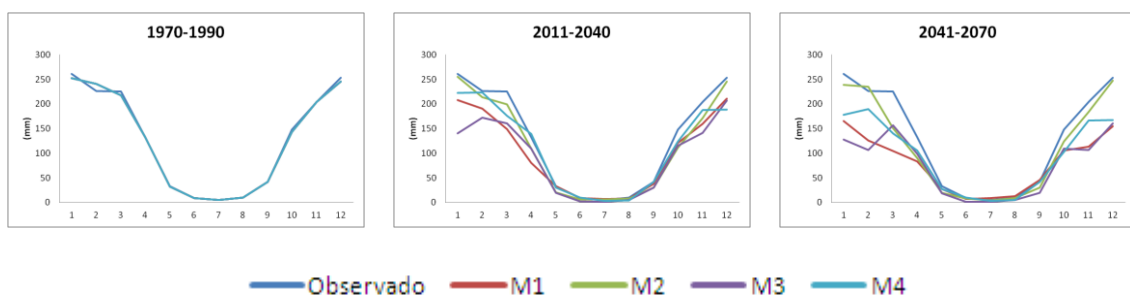


Figura 11: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Descarreto

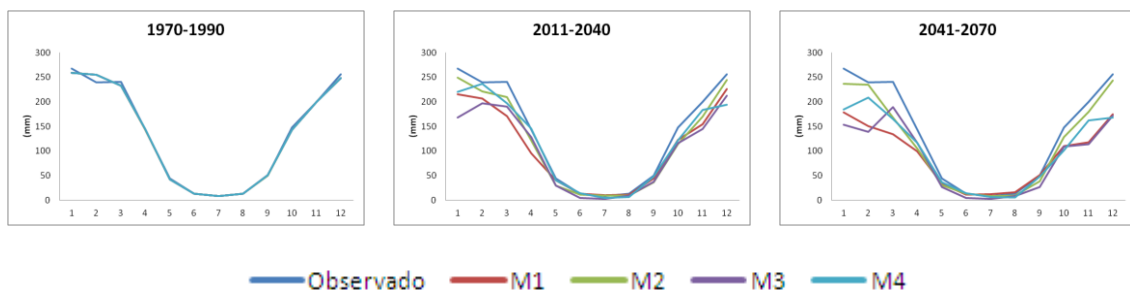


Figura 12: Climatologia mensal da precipitação do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí

As climatologias mensais da temperatura do modelo Eta após a correção mostram que os valores do período histórico se ajustaram bem aos valores observados, e no período futuro, todas as sub-bacias apresentaram um aumento considerável de temperatura, com os cenários M1, M3 e M4 apresentando as taxas mais elevadas. Esse aumento da temperatura pode vir

a influenciar diretamente o aumento da evapotranspiração, resultando na diminuição das vazões (Figuras 13 a 15).

É possível notar também o desaparecimento da sazonalidade durante o período de 2041-2070, em todos os quatro cenários, para todas as sub-bacias.

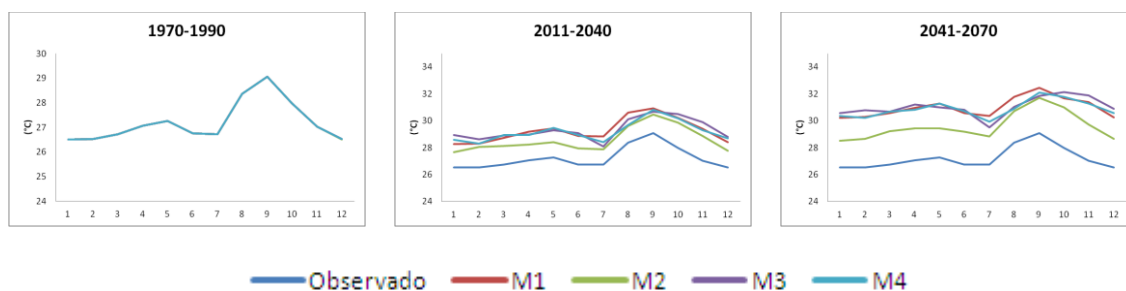


Figura 13: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina

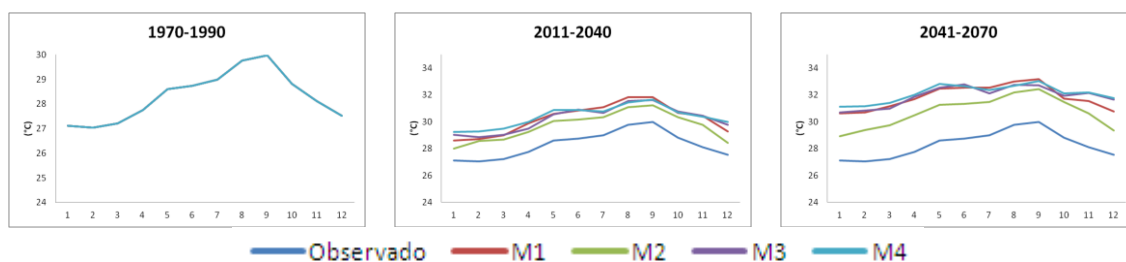


Figura 14: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Descarreto

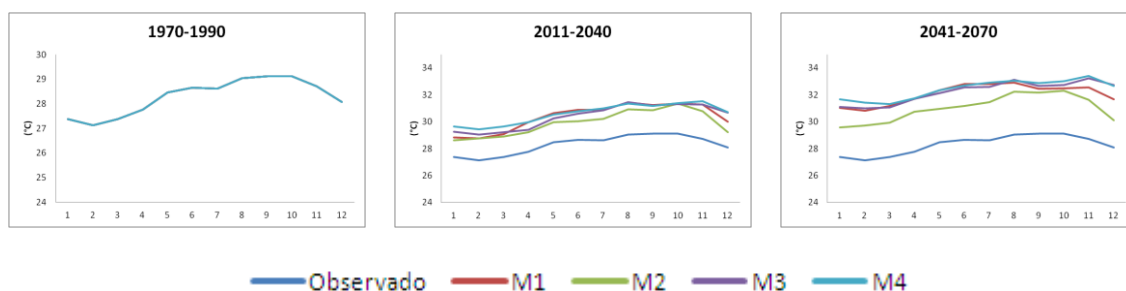


Figura 15: Climatologia mensal da temperatura do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí

5.2- CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo hidrológico distribuído teve como objetivo obter valores de vazão simulada próximos à vazão observada para cada subbacia.

Os resultados de desempenho das funções objetivas foram considerados satisfatórios (valores de Nash > 0.5), bons ($0.65 < \text{Nash} < 0.75$) ou muito bons ($0.15 < \text{Nash} < 1.00$), segundo Moriasi et al. (2007). Esses coeficientes indicam a qualidade das vazões simuladas pelo modelo para dados históricos.

Observa-se pelos hidrogramas das vazões simuladas que a calibração teve dificuldade em atingir alguns picos, e que algumas sub-bacias, nos meses de estiagem, apresentaram vazões tendendo à zero. Para exemplificar esses resultados, foram selecionadas as Bacias 04 (Carolina), 05 (Descarreto) e 09 (Tucuruí), onde estão localizadas as usinas hidrelétricas estudadas no trabalho. Mesmo não atingindo os picos, essas sub-bacias apresentaram índices estatísticos considerados muito bons. Os hidrogramas são apresentados nas figuras 16, 17 e 18, e os resultados das funções objetivas são apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Resultados das funções objetivas da bacia do Rio Tocantins para suas respectivas sub-bacias

Sub-Bacia	Estação	Ns	NsLog	R2	Errv
1	Tesouro	0.5141	0.6109	0.5213	0.0892
2	São Félix do Araguaia	0.7846	0.7327	0.8173	0.1323
3	Xavantina	0.6607	0.7423	0.6807	0.0567
4	Carolina	0.9359	0.9328	0.9418	0.0601
5	Descarreto	0.9368	0.9493	0.9373	0.0192
6	Conceição do Araguaia	0.6852	0.6804	0.7815	-0.0801
7	Xambioá	0.6379	0.6988	0.7373	-0.0684
8	Itupiranga	0.8730	0.8037	0.9041	0.1307
9	Tucuruí	0.8746	0.7505	0.9032	0.1098

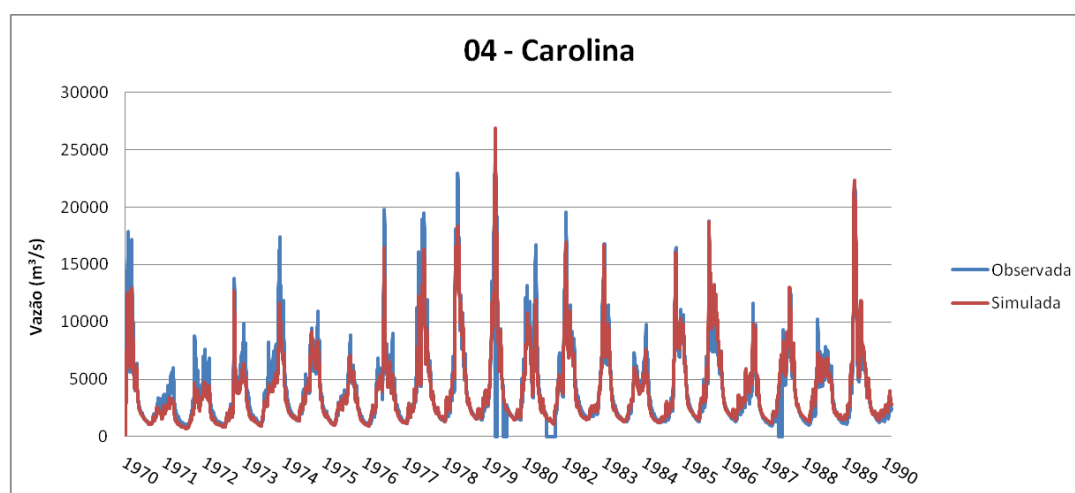


Figura 16: Hidrograma de Vazão para a Bacia 04 – Carolina

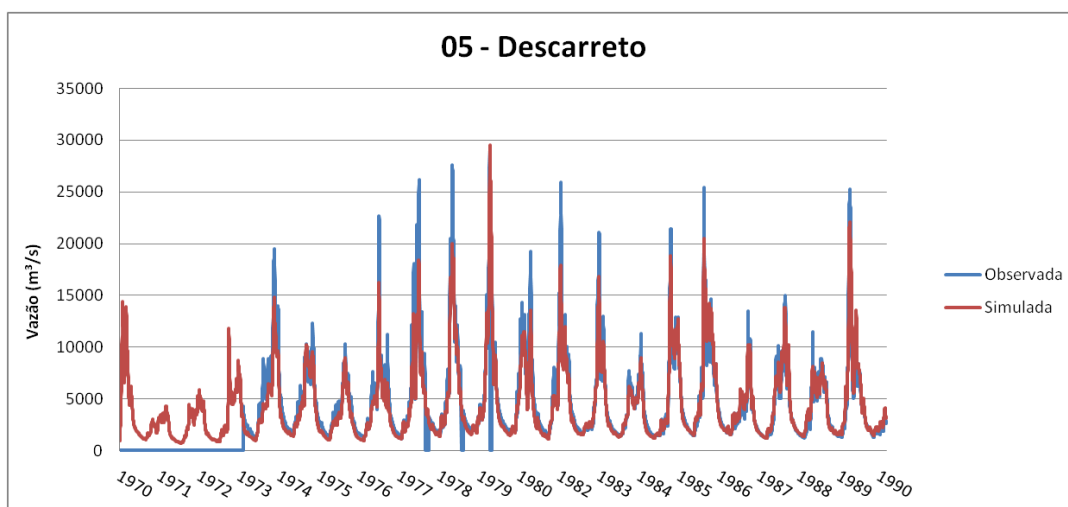


Figura 17: Hidrograma de Vazão para a Bacia 05 – Descarreto

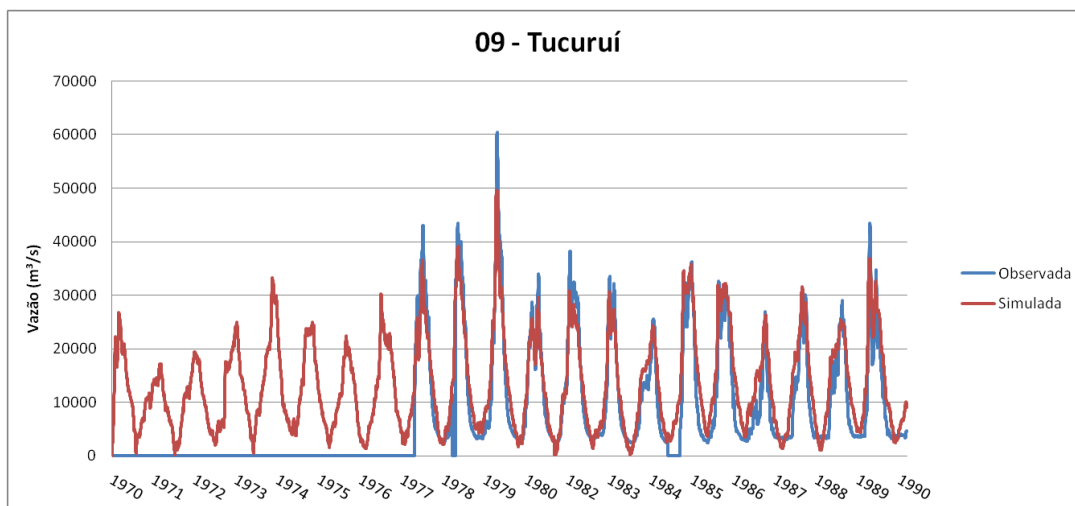


Figura 18: Hidrograma de Vazão para a Bacia 09 – Tucuruí

A Bacia do Rio Madeira foi calibrada e validada de acordo com Siqueira Jr. (2014), seus resultados são mostrados pela tabela 2. Com excessão de Miraflores e Ariquemes, todas as sub-bacias apresentaram valores de NS e NSlog acima de 0.7.

Tabela 2- Resultados das funções objetivas da bacia do Rio Madeira para suas respectivas sub-bacias

Sub-Bacia	Estação	Ns	NsLog	Errv
1	Mira Flores	0.53	0.63	13.8%
2	Rurrenabaque	0.74	0.70	-7.2%
3	Abapo	0.72	0.72	3.9%
4	Camiaço	0.78	0.75	-3.5%
5	Puerto Varador	0.79	0.80	0.7%
6	Puerto Siles	0.80	0.78	-7.1%
7	Mato Grosso	0.84	0.85	6.2%
8	Pimenteiras	0.77	0.84	2.6%
9	Guajara-mirim	0.71	0.75	-6.7%
10	Abunã	0.89	0.86	1.1%
11	Porto Velho	0.83	0.85	3.5%
12	Santa Isabel	0.79	0.79	0.3%
13	Ariquemes	0.58	0.76	7.5%
14	Ji Paraná	0.79	0.87	-5.2%
15	Tabajara	0.84	0.88	-10.4%
16	Humaitá	0.79	0.82	3.7%
17	Manicoré	0.77	0.80	-0.1%
18	Boca da Guariba	0.93	0.92	-5.0%
19	Fazenda Vista Alegre	0.87	0.85	-0.4%

5.3 – VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS DO PERÍODO HISTÓRICO

Com a finalidade de validar as simulações hidrológicas feitas pelo MHD-INPE, foram utilizadas análises estatísticas comparando as vazões simuladas pelo modelo utilizando os dados observados com os próprios dados de vazão observados (1970-1990 da ANA). Nota-se na Figura 19 que as simuações para a vazão da parte superior da FDC (MWH) e da parte inferior da FDC (MWL) foram bem simulados pelos modelo. As diferenças entre as estações seca (SEASON) e úmida também ficaram bem representadas pelo modelo. Já a inclinação da FDC teve valores aceitáveis, mas para algumas sub-bacias a simulação teve valores intermediários de escoamento (QSM) abaixo dos observados.

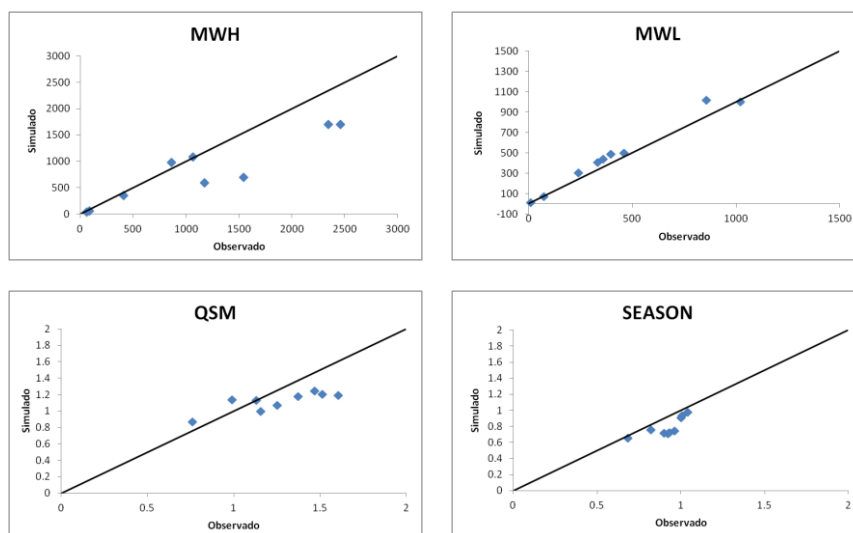


Figura 19: Comparação entre os dados de vazão observados e simulados pelo modelo forçado com dados meteorológicos observados, sendo a) parte do escoamento alto da FDC (MWH); b) parte do escoamento baixo da FDC (MWL); c) inclinação da FDC para valores intermediários de escoamento (QSM) e d) diferença entre as estações seca e chuvosa (SEASON).

Na Figura 20 é apresentada as diferenças de cada estatística analisada para cada sub-bacia, ou seja, a estatística dos dados observados menos a do simulado pelo MHD-INPE com dados observados. Nota-se que todas as estatísticas para as sub-bacias 4 e 5 apresentam valores abaixo de 20%, o que torna os cálculos de potencial energético confiáveis.

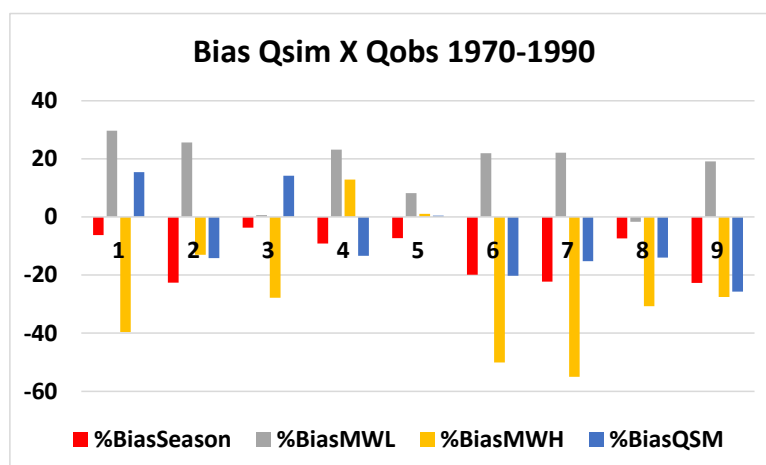


Figura 20: Diferença das estatísticas (dados observados menos simulados pelo MHD-INPE com dados observados) para o período de calibração

5.4 – CENÁRIOS HIDROLÓGICOS

Nesta seção serão mostrados os resultados do MHD para diferentes cenários climáticos. Em primeiro lugar, será mostrado uma análise estatística da FDC da vazão resultante do modelo. Em seguida, será mostrado o impacto de diferentes cenários na vazão em si.

Na figura 21 é mostrado os índices estatísticos do comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados observados em comparação com o MHD forçado com dados históricos do Eta. Nota-se que há boa concordância com o resultados do modelo para as duas simulações.

A figura 22 mostra os índices estatísticos dos resultados do MHD forçados com o período histórico do Eta (simulado) comparado com os

resultados do MHD forçado- com o período de 2011 a 2040 do Eta (modelado). Nota-se que no futuro os membros M1, M2 e M3 tiveram uma redução nos valores da parte superior da FDC e o mesmo ocorreu para todos os membros para os valores da parte inferior da FDC. Como a diminuição da parte inferior da FDC foi mais acentuada, nota-se um aumento na inclinação da FDC para valores intermediários, o que indica um aumento na velocidade de resposta à precipitação. Nesse período a sazonalidade não mudou muito.

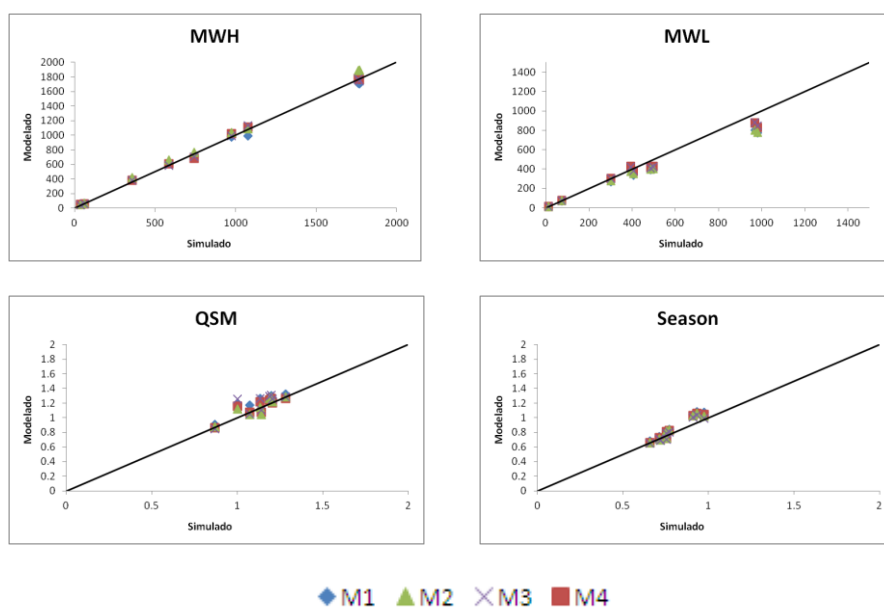


Figura 21: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados observados versus climáticos para o período de 1970-1990

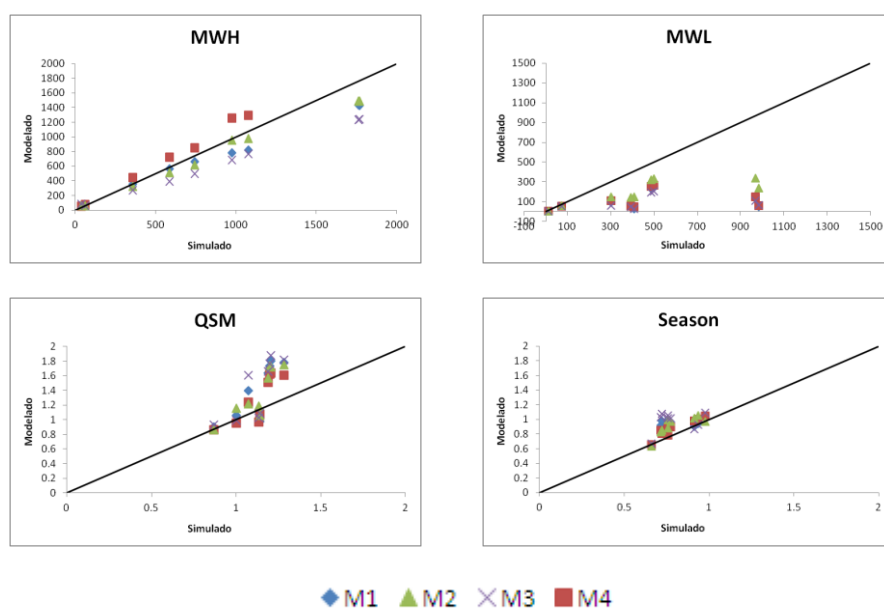


Figura 22: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados do climáticos para o período de 1970-1990 versus 2011-2040

A Figura 23 mostra os índices estatísticos dos resultados do MHD forçados com o período histórico do Eta (simulado) comparado com os resultados do MHD forçado com o período de 2041 a 2070 do Eta (modelado). Os resultados são praticamente os mesmos que os do período anterior, intensificando um pouco os sinais. Com exceção do membro M2 que não apresentou redução em relação ao período de 1970-1990, enquanto que o M4 apresentou essa redução, voltando atrás no resultado do período 2011-2040. A inclinação da FDC para valores intermediários e a sazonalidade não mudaram muito em relação ao período anterior.

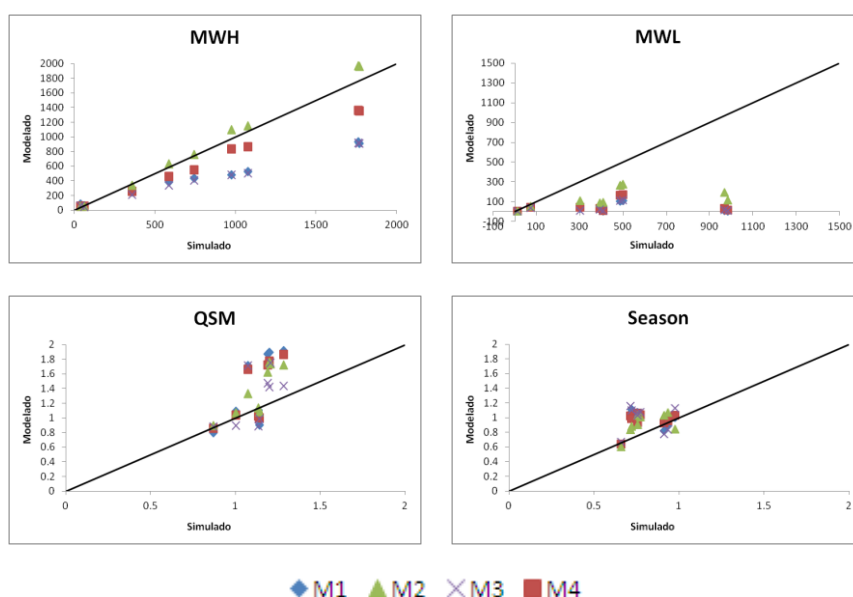


Figura 23: Comparação dos índices referentes ao comportamento da FDC resultante do MHD forçado com dados do climáticos para o período de 1970-1990 versus 2041-2070

As simulações hidrológicas realizadas pelo modelo MHD foram realizadas para o período histórico (1970 – 1990) e para o futuro (2011-2070), utilizando dados do downscaling dinâmico do modelo climático Eta.

A climatologia mensal das vazões simuladas usando dados do modelo Eta para o período histórico se aproxima das vazões observadas, com pequenas diferenças nos valores nos meses de cheia (jan - abril) para as bacias Carolina e Descarreto. Para a bacia Tucuruí, há uma diferença maior nos períodos de cheia. Isso ocorre como reflexo dos problemas encontrados no lado oeste da bacia, no qual duas sub-bacias apresentam alguns dias de vazão nula (São Félix do Araguaia e Conceição do Araguaia).

Para os períodos futuros de 2011 a 2040 e 2041 a 2070 são encontradas maiores diferenças em relação à vazão observada. Com os cenários de mudanças climáticas há uma redução das vazões durante o período de cheia, como consequência da redução da precipitação apresentada

anteriormente em todas as sub-bacias. No entanto não há mudanças nas sazonalidades, como mostrado nas Figuras 24, 25 e 26.

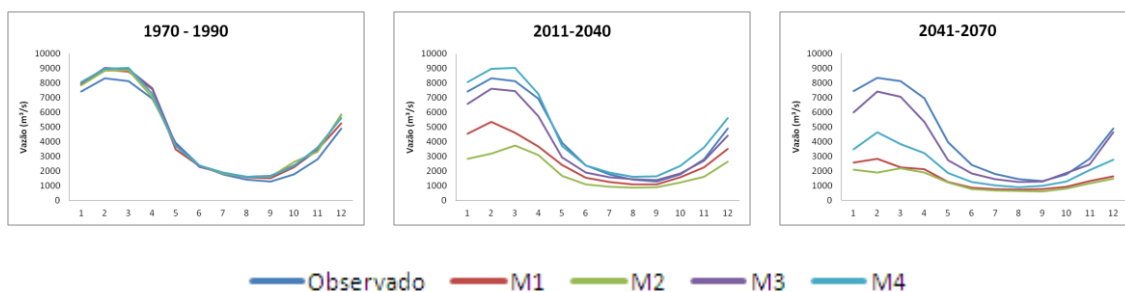


Figura 24: Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Carolina

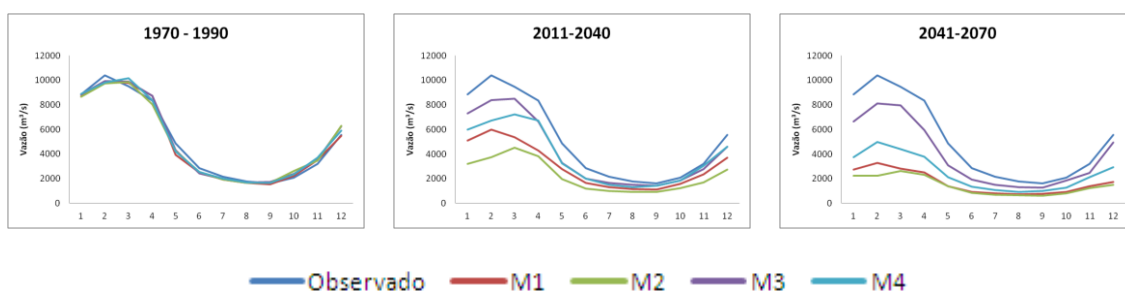


Figura 25: Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a Descarreto

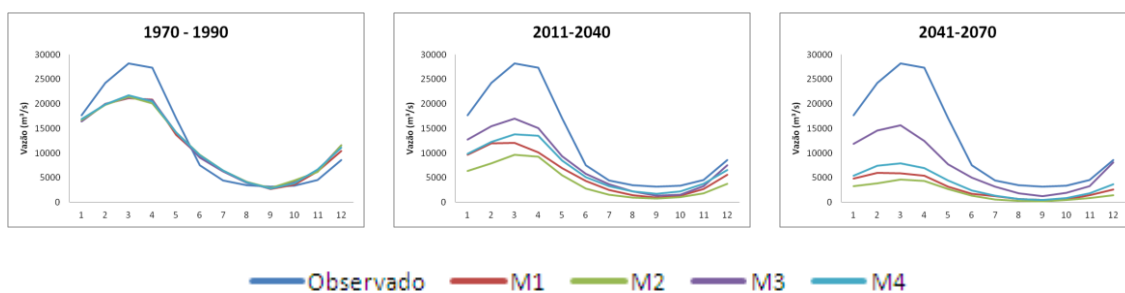


Figura 26: – Climatologia mensal da vazão do modelo Eta após correção de erros sistemáticos para a bacia Tucuruí

5.6- EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO POTENCIAL ENERGÉTICO

O Cálculo para avaliar o Potencial Energético foi realizado para três empreendimentos na bacia do Rio Tocantins: UHE Cana Brava, UHE São Salvador e UHE Estreito. O mesmo cálculo foi feito para a UHE Santo Antonio na bacia do Rio Madeira no trabalho de Siqueira Jr. (2014).

As simulações com o modelo Eta apresentaram reduções significativas no potencial energético, devido principalmente à diminuição da vazão, com o cenário M3 apresentando as maiores reduções para as UHE's da Bacia do Rio Tocantins, chegando à 72% de redução no potencial energético para o período de 2041-2070 na UHE Estreito. Já para a Bacia do Rio Madeira, o cenário M1 apresentou as maiores reduções de potencial energético, chegando à -39% para o período de 2041-2070 na UHE Santo Antônio. A Tabela 3 mostra os impactos das mudanças climáticas no potencial energético das usinas.

Tabela 3- Potencial Energético previsto para as Usinas do Rio Tocantins e Madeira para os períodos histórico (1970-1990) e futuro (2011-2070).

UHE	Cenário	Período Histórico (MW)	Período Futuro (2011-2040)	Período Futuro (2041-2070)
Cana Brava	M1	486	-28%	-55%
	M2	482	-16%	-24%
	M3	482	-57%	-69%
	M4	486	-21%	-47%

(Continua)

Tabela 3 – Continuação.

São Salvador	M1	278	-28%	-56%
	M2	276	-16%	-24%
	M3	275	-58%	-70%
	M4	278	-21%	-47%
Estreito	M1	805	-39%	-65%
	M2	818	-19%	-22%
	M3	813	-56%	-72%
	M4	801	-22%	-50%
Santo Antonio* (Rio Madeira)	M1	2418	-28%	-39%
	M2	2378	-17%	-27%
	M3	2357	-22%	-37%
	M4	2335	-20%	-39%

*UHE do Rio Madeira

6- CONCLUSÃO

Após a correção dos erros sistemáticos nos dados retirados do processo de downscaling no modelo Eta, utilizando as metodologias de transformação Q-Q para dados de precipitação, e Delta Change para os demais dados meteorológicos, foi possível obter dados confiáveis para realizar as simulações com o modelo hidrológico.

Utilizando o processo de calibração automática, em conjunto com ajuste manual, foi possível calibrar de forma satisfatória o modelo hidrológico MHD-INPE para a bacia do Rio Tocantins, baseando-se nos dados de vazões observados.

As análises estatísticas realizadas para avaliar as simulações hidrológicas resultantes do modelo MHD-INPE mostram através da FDC, que o modelo obteve um comportamento satisfatório para a maioria das sub-bacias, porém, com algumas sub-bacias ficando com valores abaixo dos observados. No entanto, as diferenças entre valores observados e simulados para as bacias 4 e 5 ficam abaixo de 20%, o que tornam as análises para potencial elétrico nessas sub-bacias confiáveis.

As climatologias mensais de vazão das três sub-bacias estudadas apresentaram uma significativa queda nos valores de suas vazões em todos os cenários do modelo Eta apresentados, resultado das quedas observadas principalmente na precipitação.

De acordo com a avaliação da geração de energia elétrica, estas mudanças climáticas impactarão diretamente nas hidrelétricas da bacia do Rio Tocantins e Madeira, reduzindo significativamente seu potencial energético nos períodos futuros, resultado da diminuição de sua vazão, chegando a quedas de até 72% de sua capacidade, como no caso da UHE Estreito do Tocantins.

Para a continuação deste trabalho, está previsto a melhora na calibração do modelo hidrológico MHD-INPE para a bacia do Rio Tocantins afim de melhorar as vazões mínimas, em especial nas sub-bacias do lado oeste, onde foram encontrados alguns valores chegando a zero, para então avaliar o potencial hidrelétrico para outros reservatórios que não sejam fio d'água. Além disso, pretende-se utilizar outros modelos globais como forçante do MHD, como HADCM, CSIRO, HADGEM2, MIROC5 e IPSL.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Aproveitamento do Potencial Hidráulico para Geração de Energia.** Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. – Brasília: ANA, 2005.

ANA. **Caderno setorial de recursos hídricos: geração de energia hidrelétrica** / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/arquivos/20070205152115_Caderno%20Setorial%20-%20Energia.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2014.

CASTELLARIN, ATTILIO. 2014. **Regional prediction of flow-duration curves using a three-dimensional kriging.** *Journal of Hydrology.*

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. 1994. **Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models.** *Journal of Hydrology*, Vol 158 pp. 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.

HAY, L.E., R.L. WILBY AND G.H. LEAVESLEY (2000), **A Comparison of Delta Change and Downscaled GCM Scenarios for Three Mountainous Basins in the United States**, *J. of the Amer. Water Resour. Assoc.* 36, 387 – 397.

J. L. SIQUEIRA JÚNIOR, J. TOMASELLA, D. A. RODRIGUEZ. **Impacts of global and regional land-use and land-cover changes in the hydrological regime of the Madeira River basin.** *Climatic Change.* Em Revisão. 2014

LEY, R.; CASPER, M.C.; HELLEBRAND, H.; MERZ, R. (2011), Catchment classification by runoff behavior with self-organizing maps (SOM). ***Hydrol. Earth Syst. Sci.***, 15, 2947–2962, doi:10.5194/hess-15-2947-2011

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.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica.** Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2006a.

MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia.** Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2006b.

MMA. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima.** Ministério do Meio Ambiente, Comitê Interministerial Sobre Mudança do Clima. – Brasília: MMA, 2007.

MME. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas.** Ministério de Minas e Energia. – Brasília: MME, 2007.

MORIASI, D. N., J.G. ARNOLD, M.W. VAN LIEW, R.L. BINGNER, R.D. HARMEL, AND T.L. VEITH, **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,** Transactions of the ASABE 50 (3), 885-900, 2007.

TOMASELLA, J., RODRIGUEZ, D. A. 2014. **A numerical Approach for Modelling sub-grid variability in Amazonian catchments.** Hydrological Processes (aceito para publicação)

TUCCI, C. E. M., HESPANHOL I. E CORDEIRO NETTO, O. M. 2000. **“A GESTÃO DA ÁGUA NO BRASIL: UMA PRIMEIRA AVALIAÇÃO DA SITUAÇÃO ATUAL E DAS PERSPECTIVAS PARA 2025”.** Disponível em: <http://www.rhama.net/download/artigos/artigo30.pdf>. Acessado em 19 de junho de 2014.