

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA PELA UHE BELO MONTE SOB  
CENÁRIO FUTURO DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

Marcelo Garcia Pereira de Camargo

Orientador: Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi  
Co-orientadora: Profa. Dra. Gyrlene Aparecida Mendes da Silva

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2016/35)

TF  
C172  
MGP.g

SÃO PAULO  
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA PELA UHE BELO MONTE SOB  
CENÁRIO FUTURO DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

Marcelo Garcia Pereira de Camargo



Orientador: Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi

Co-orientadora: Profa. Dra. Gyrlene Aparecida Mendes da Silva

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA**

(TF – 2016/35)

IGc-Instituto de Geociências



Geração de energia hidrelétrica pela UHE Belo Monte sob  
cenário futuro de mudança climática.

M27113

SÃO PAULO

2016

TF  
C172  
MGP.9

СУДЪИ ОТ ВЪЗМОЖНОСТИ  
ЗАЩИТОВАНО ВЪЗМОЖНОСТИ

СЕРВИС ОФЕРТА ВЪЗМОЖНОСТИ  
СЕРВИС ОФЕРТА ВЪЗМОЖНОСТИ

Министерство на земеделието и храните

БНФ

Съдъи от възможности  
Защита на възможности

Съдъи от възможности  
Защита на възможности

Съдъи от възможности

Задължителни

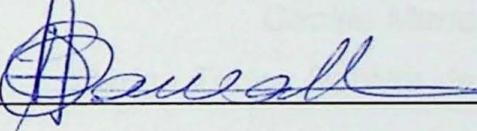
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA PELA UHE BELO MONTE SOB  
CENÁRIO FUTURO DE MUDANÇA CLIMÁTICA**

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2016/35)

Marcelo G. P. Camargo

Marcelo Garcia Pereira de Camargo



Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi

*Dedico esta monografia às memórias de  
Cecília Maria Pereira e  
Carlos Tadeu Pereira de Camargo*

## AGRADECIMENTOS

Não consigo imaginar como seriam meus longos cinco anos de graduação em geologia sem a orientação do Prof. Dr. André Oliveira Sawakuchi. Com mais tempo de curso sob a tutela dele do que sem, expresso aqui minha admiração pela sua humildade e competência, e só tenho a agradecer pela confiança depositada em mim.

Agradeço à Profª Dra. Gyrlene Aparecida Mendes da Silva (Departamento de Ciências do Mar - UNIFESP), por aceitar co-orientar alguém que não sabia nem o significado de climatologia, e ensinar, de maneira muito atenciosa, inúmeros conceitos presentes nesta monografia.

Agradeço ao Prof. Dr. Victor Sacek (Instituto de Astronomia e Geofísica – USP) pelo apoio sem precedentes com as simulações de vazão e, acima de tudo, pela animação com que abraçou a ideia desse projeto, demonstrando enorme disposição em colaborar.

Também não imagino como seria essa jornada sem o apoio de duas figuras centrais na minha vida. Em primeiro lugar, Maria Lúcia, mãe, pai, apoiadora, batalhadora e (por quê não?) financiadora. Suportou o filho único escolhendo sair da zona de conforto e arriscar um futuro pouco ortodoxo. Espero lhe dar cada dia mais orgulho. Em segundo lugar, Giovana Assis, namorada, confidente, muito mais bem-sucedida que eu (obrigado, Gi!), e meu porto seguro. Obrigado a vocês duas por me fazerem continuar e manterem minha cabeça no lugar.

Agradeço aos grandes amigos que fiz nesses anos, em especial à “turma da vila” e agregados, tais como Paulo Carvalho (Avatar), Jorge Arthuzzi (Bukkake), Lucas Milani, Thomás Coelho (Tomilhe), Seiji Oyama, Marcos Akira, César Miyata (Ameba) e Mariana Busarello (Geisy). Com eles compartilhei a maior parte dos momentos bons e ruins do curso. Também agradeço aos demais colegas da Turma 55 e de outras turmas, em especial ao “Grupo do Metano”, composto pelos queridos Dailson Bertassoli Jr., Victor Alem (os conselhos de vocês dois estão entre os maiores legados que eu levo comigo daqui em diante), Laura Furukawa e Nazaré Almeida. Um dia o mundo ainda dará a devida importância ao metano biogênico!

Agradeço à minha família, os que ainda estão aqui e os que não mais, por servirem de inspiração e me apoiarem em todos os momentos, sem exceção. Sou quem sou hoje em grande parte devido a vocês, que me ensinaram de tudo um pouco sobre a vida.

Por fim, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro por meio do projeto nº 2016/02656-9. Sem este auxílio, a ida ao Rio Xingu não seria possível, e velhos paradigmas ainda habitariam a minha cabeça.

## RESUMO

A Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Belo Monte está localizada no Rio Xingu, na chamada “Volta Grande do Xingu”. Oficialmente inaugurada em maio de 2016, a UHE Belo Monte é a maior hidrelétrica inteiramente brasileira em termos de potência instalada. No entanto, dos 11.233 MW instalados, a geração efetiva de energia será de 4.571 MW médios. Isto se dá devido à alta sazonalidade do Rio Xingu, cuja vazão varia em até 40 vezes entre a seca e a cheia. No entanto, esta estimativa de geração efetiva não considera os cenários de mudança climática projetados para a Amazônia.

Cenários de mudança climática frequentemente projetam menor precipitação para o leste amazônico, em especial na Bacia do Rio Xingu. Isto implica na redução da vazão do Rio Xingu e diminuição da geração de energia pela UHE Belo Monte. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi elaborar projeções da vazão do Rio Xingu em termos da mudança climática projetada para os próximos 30 anos e discutir os efeitos sobre a produção energética e os benefícios energéticos da UHE Belo Monte em termos dos seus impactos sociais e ambientais.

Para a simulação da vazão do Rio Xingu, foi utilizado modelo numérico hidrológico, que simula a vazão por meio de cálculos de escoamento superficial derivado da interação entre topografia e precipitação. O modelo foi calibrado a partir de dados históricos de precipitação e vazão do Rio Xingu em Altamira – PA entre 1996 e 2006. As vazões simuladas pelo modelo foram similares às observadas e permitiram a aplicação do modelo hidrológico sobre as projeções futuras, obtidas através do modelo climático CNRM-CM5 do IPCC (*International Panel on Climate Change*). Foram extraídas as médias e anomalias de precipitação para o período 2017-2045 e os resultados das projeções apontam estações chuvosas mais secas e estações secas mais chuvosas, porém, com saldo de precipitação negativo em relação às médias históricas.

A partir das projeções de precipitação, o modelo hidrológico simulou vazões em média 28% menores às historicamente observadas. A partir desse resultado, conclui-se que a geração futura de energia pela UHE Belo Monte deverá ser afetada de maneira negativa, sob cenário de mudança climática projetada para as próximas décadas. Esta projeção coloca em questionamento os reais custos-benefícios do empreendimento, em vista dos sérios impactos socioambientais decorrentes de sua construção. Ao mesmo tempo, tal resultado abre espaço para a discussão de novas políticas energéticas para o país, com maior segurança energética, eficiência e sustentabilidade.

## ABSTRACT

The Belo Monte hydropower plant is located on the Xingu River, in the so-called "Big Bend of the Xingu". Officially inaugurated in May 2016, the Belo Monte Dam is the largest entirely Brazilian hydroelectric power plant in terms of installed capacity. However, of the 11.233 MW of installed capacity, the effective generation of energy will be 4.571 MW on average. This happens due to the high seasonality of the Xingu River, whose discharge varies by up to 40 times between dry and wet seasons. However, this estimation of the effective energy generation does not consider climate change scenarios projected for the Amazon,

Climate change scenarios often project lower rainfall for the eastern Amazon, especially in the Xingu River Basin. This implies for a lower discharge in the Xingu River, decreasing power generation by the Belo Monte Dam. In this context, the objective of this work was to elaborate projections of the discharge of the Xingu River in the next 30 years and discuss the effects on the energy production and the energy benefits from the Belo Monte Dam in terms of its social and environmental impacts.

To simulate the discharge of the Xingu River, a numerical hydrologic model was used, which simulates the discharge through runoff calculations derived from the interaction between topography and rainfall. The model was calibrated using historical rainfall and discharge data for the Xingu River in Altamira - PA between 1996 and 2006. The discharges simulated by the model were similar to those observed and allowed the application of the model on future projections of rainfall, obtained by the IPCC (International Panel on Climate Change) climate model CNRM-CM5. The means and anomalies of precipitation for the period 2017-2045 were extracted, and the results of the projections indicate drier rainy seasons and rainier dry seasons, with an overall negative budget of the rainfall compared to historical averages.

From the precipitation projections, the hydrological model simulated discharges 28% lower, on average, than those historically observed. From this result, it is concluded that the future generation of energy by the Belo Monte Dam will be affected in a negative way under a scenario of climate change. This projection puts into question the real cost-benefit of the project, considering the serious social and environmental impacts of its construction. At the same time, this result opens up the discussion of new energy policies for the country, with greater energy security, efficiency and sustainability.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
3.1. A energia hidrelétrica no Brasil .....	5
3.2. A relação entre a UHE Belo Monte e o clima .....	6
3.3. Mudança climática e o desmatamento na Amazônia .....	8
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
4.1. Aplicação do modelo hidrológico .....	14
4.1.1. <i>Calibração do modelo hidrológico para simulação de vazão.</i> .....	14
4.1.2. <i>Funcionamento do modelo hidrológico</i> .....	16
4.2. Cálculo da geração futura de energia hidrelétrica .....	18
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>19</b>
5.1. Análise da série histórica de precipitação e vazão .....	19
5.2. Simulações de vazão a partir do modelo hidrológico .....	21
5.2.1. <i>Simulação da vazão do Rio Xingu no período 1996-2006</i> .....	21
5.2.2. <i>Simulação da vazão do Rio Xingu no período 2017-2045</i> .....	25
<b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
6.1. Variação interanual de precipitação e vazão.....	29
6.2. Calibração do modelo numérico .....	30
6.3. Projeções de precipitação.....	30
6.4. Vazão futura do Rio Xingu .....	31
6.5. Produção de energia na UHE Belo Monte sob cenário de mudança climática e seus impactos socioeconômicos e ambientais .....	33
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>

## ANEXOS

**ANEXO A - Séries históricas de precipitação e vazão**

**ANEXO B - Tabela de precipitações mensais médias para o período 2017-2045**

**ANEXO C - Tabela de anomalias mensais de precipitação para o período 2017-2045**

## 1. INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Belo Monte teve sua construção iniciada em junho de 2011, sendo oficialmente inaugurada em 05 de maio de 2016 e com previsão para o término das obras em 2019 (Norte Energia, 2016). Quando finalizada, a UHE Belo Monte contará com 11.233 MW de potência total instalada (Tabela I), colocando-a como a quarta maior hidrelétrica do mundo e a maior hidrelétrica brasileira, atrás apenas das hidrelétricas de Três Gargantas (China), Itaipu (Brasil-Paraguai) e Xiluodu (China).

A UHE Belo Monte localiza-se na Bacia do Rio Xingu, na chamada “Volta Grande do Xingu”, próximo ao município de Altamira – PA (Fig. 1). O empreendimento conta com duas barragens, Pimental e Belo Monte (Fig. 2). A barragem de Pimental barra efetivamente o Rio Xingu, fazendo com que parte de sua vazão seja destinada a um canal de derivação, o qual forma assim o reservatório artificial de Belo Monte. Tal reservatório, somado ao trecho alagado do rio, de aproximadamente 70 km de extensão a montante de Pimental, irá compor o reservatório de 478 km<sup>2</sup> da hidrelétrica. Em Pimental está localizada a Casa de Força Complementar, com seis turbinas de 38,8 MW, totalizando 233,1 MW. A barragem de Belo Monte, por sua vez, barra o reservatório artificial. Em Belo Monte está localizada a Casa de Força Principal, com capacidade para dezoito turbinas de 611,1 MW cada, totalizando 11.000 MW.

O trecho da Volta Grande do Xingu a jusante da barragem de Pimental é conhecido como Trecho de Vazão Reduzida (TVR), e terá vazões mínimas liberadas pela barragem de acordo com o mês, em dois regimes alternados ao longo dos anos.

Tabela I. Principais características da UHE Belo Monte. Fonte: Norte Energia (2016), adaptada.

<b>11.233,1 MW</b>	Potência total instalada
<b>4.571 MW médios</b>	Garantia física
<b>35 anos</b>	Prazo da concessão da Norte Energia (a partir de 26/08/2010)
<b>478 km<sup>2</sup></b>	Área do reservatório (274 km <sup>2</sup> no leito original do rio Xingu – 57%)
<b>61%</b>	Redução do tamanho do reservatório em relação ao projeto original
<b>97 metros</b>	Nível d'água normal no reservatório principal
<b>90 metros</b>	Desnível natural do rio ao longo da Volta Grande do Xingu
<b>2 casas de força</b>	Belo Monte (principal) e Pimental (complementar)
<b>INVESTIMENTOS</b>	
<b>TOTAL - R\$ 25,8 bilhões</b> (data-base abril/2010)	
<b>Ações compensatórias - R\$ 3,7 bilhões</b>	

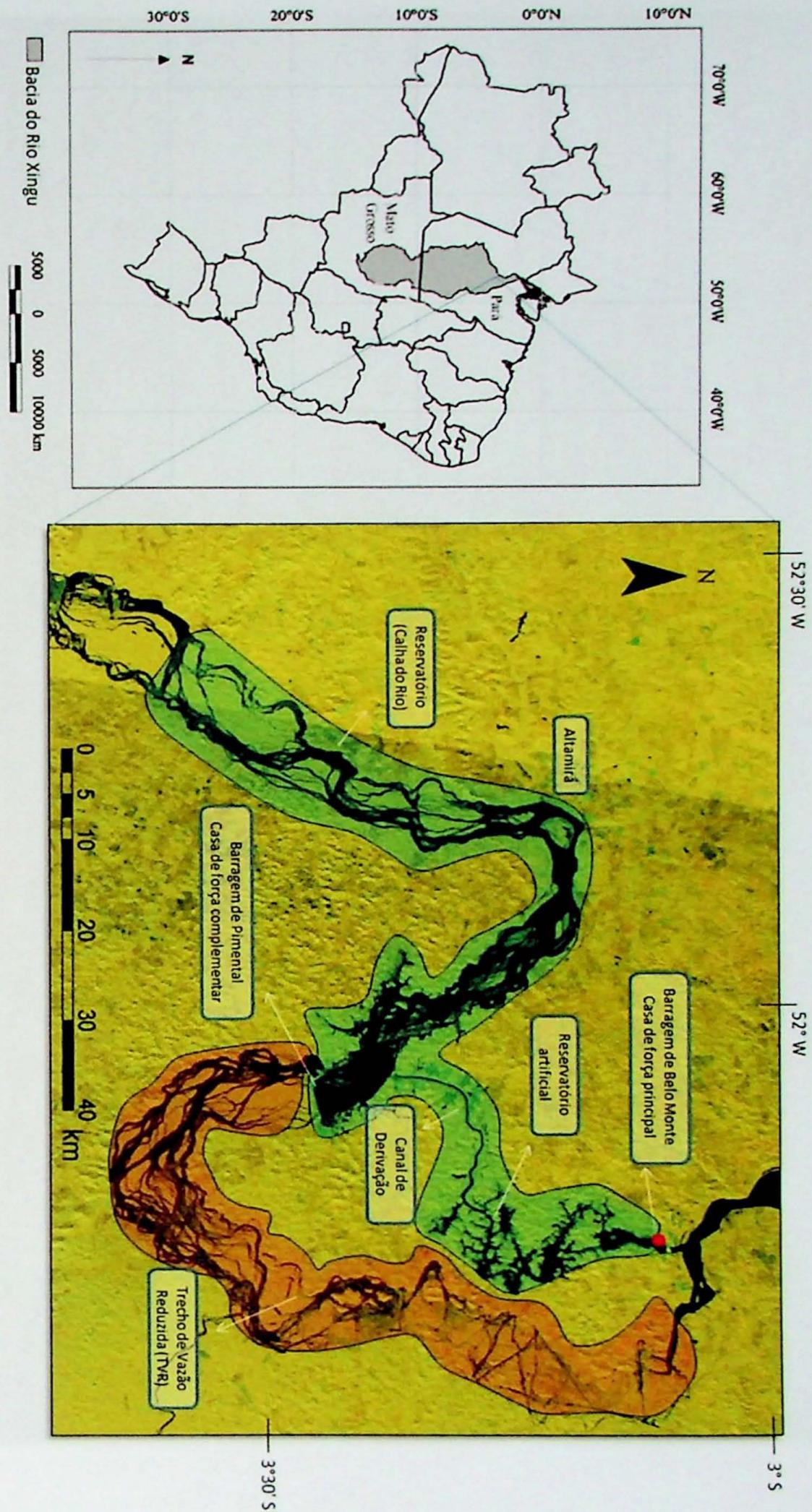


Figura 1. Localização da UHE Belo Monte na Bacia do Rio Xingu (adaptado de Dias et al., 2015) e principais feições relacionadas ao empreendimento, observadas em imagem de radar de Janeiro de 2016 (fornecida por Juan Doblas/Instituto Socioambiental - ISA).

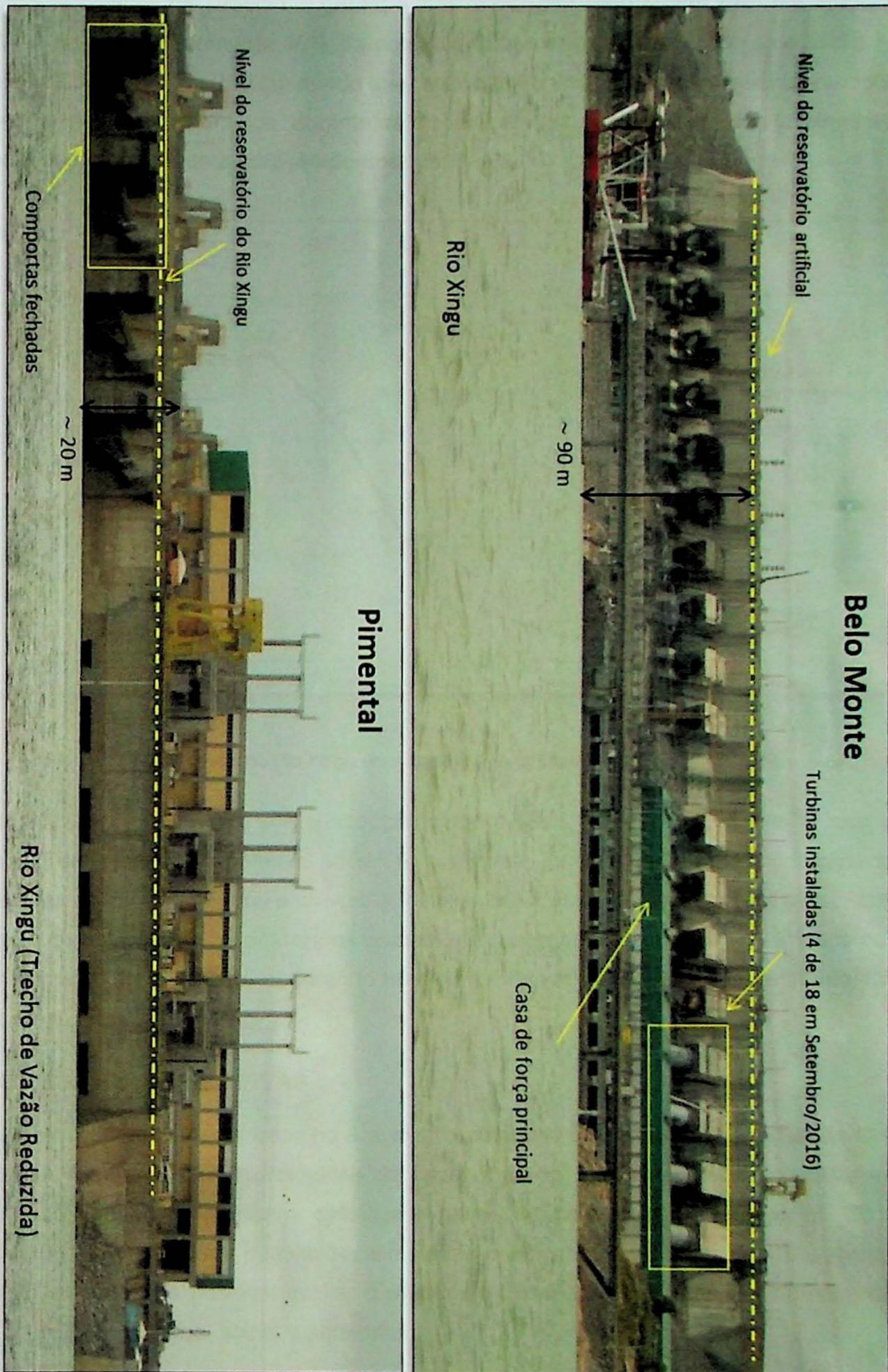


Figura 2. UHE Belo Monte e Sítio Pimental, em setembro de 2016. Fotos: André Sawakuchi.

Como se observa na Tabela I, a geração efetiva da UHE Belo Monte será em média de 4.571 MW, ou aproximadamente 40% da potência total instalada. Isso ocorre devido à alta sazonalidade do Rio Xingu (Fig. 3), sendo que, ao longo do ano, a vazão apresenta variações de até 40 vezes. Isto faz com que, durante os meses de seca, grande parte das turbinas seja desligada, comprometendo a geração de energia.

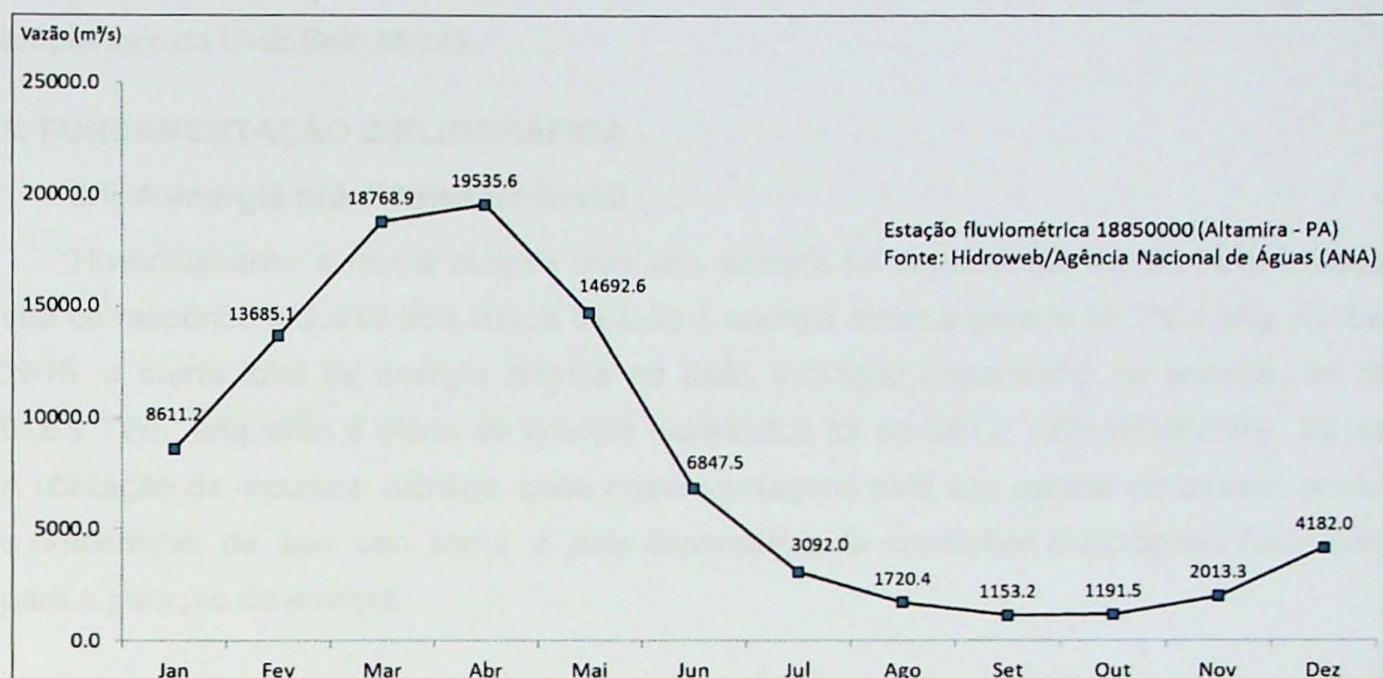


Figura 3. Vazão média do Rio Xingu em Altamira - PA, entre os anos de 1971 e 2014.

Considerando que, desde sua concepção como projeto, a UHE Belo Monte foi alvo de discussões de caráter econômico, social e ambiental, encontrando forte oposição das comunidades científica, indígena e ribeirinha, este trabalho objetiva fornecer uma perspectiva sobre o futuro da hidrelétrica, em termos do potencial energético dos próximos 30 anos com base em simulações de vazão, abordando novamente questões de interesse geral quanto à viabilidade do empreendimento.

## 2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o potencial de geração de energia da UHE Belo Monte via simulações hidrológicas da vazão do Rio Xingu nos próximos 30 anos, considerando cenário de mudança climática e na cobertura vegetal (Stickler et al., 2013; Sorribas et al., 2016). A partir das vazões simuladas e, portanto, da energia que futuramente deverá ser produzida, é possível avaliar o real custo-benefício deste empreendimento, dos pontos de vista econômico, social e ambiental.

Este trabalho justifica-se acima de tudo pela grande relevância do cenário energético nacional, considerando também a magnitude da “questão Belo Monte” para o Governo do Brasil e sua população, em termos dos impactos sociais e ambientais versus benefícios

econômicos e energéticos. Trata-se de uma das maiores e mais caras obras de engenharia do País (Ministério do Planejamento, 2016), com impactos ambientais sem precedentes (e.g. Winemiller et al., 2016) e eficiência discutível (e.g. Fearnside, 2016b). Não obstante, o estudo de questões relacionadas a mudança climática e seu impacto sobre o regime de precipitação do leste amazônico também é de suma importância para o planejamento energético do País, sendo tais questões pouco abordadas em estudos sobre a viabilidade energética e impactos ambientais da UHE Belo Monte.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. A energia hidrelétrica no Brasil

Historicamente, a matriz elétrica brasileira sempre foi dependente da hidroeletricidade, que corresponde a quase dois terços de toda a energia elétrica gerada no País (Fig. 4). Em 2015, a oferta total de energia elétrica no país, incluindo importação de energia, foi de 615,9 TWh, enquanto a oferta de energia hidrelétrica foi de 394,2 TWh (MME/EPE, 2016). A utilização de recursos hídricos pode trazer vantagens pelo seu caráter renovável, porém o predomínio de seu uso torna o país dependente de condições hidrológicas favoráveis para a geração de energia.

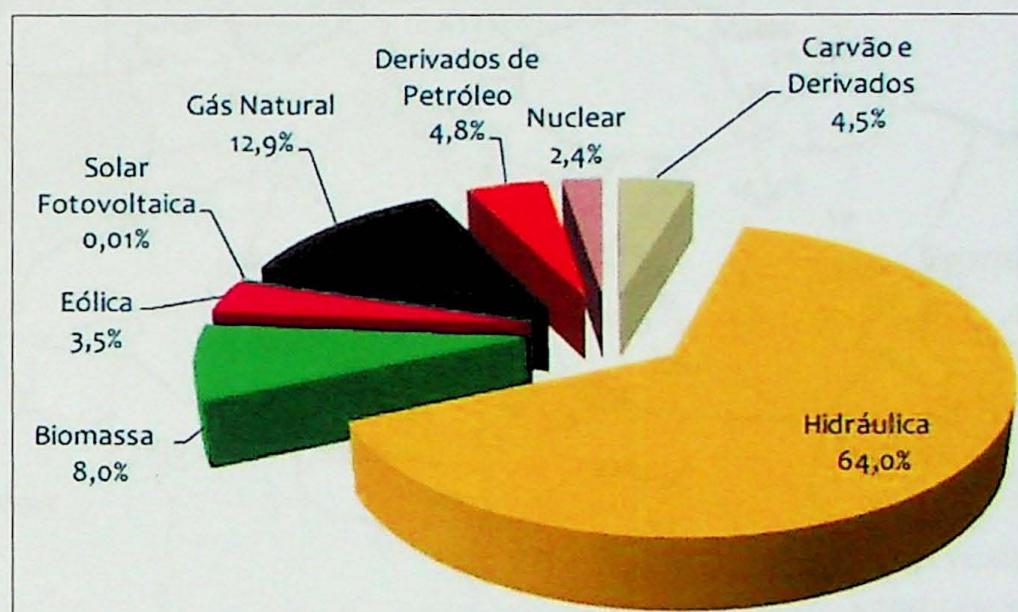


Figura 4. Matriz elétrica brasileira em 2015. Fonte: MME/EPE (2016).

Nos últimos anos, secas intensas colocaram em risco a principal fonte de energia do País, deixando reservatórios hidrelétricos a níveis historicamente baixos (Corrêa da Silva et al., 2016). Este cenário culminou no recente episódio de carência energética no ano de 2015 e levou o País a recorrer ao acionamento de usinas termelétricas (ONS, 2015).

Não obstante os questionamentos quanto à segurança de fornecimento da energia hidrelétrica na matriz brasileira, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 (MME/EPE,

2015) estima que nos próximos dez anos a capacidade de geração de energia hidráulica aumentará de 90 GW para 117 GW. Desses 27 GW, até 85% virão de hidrelétricas localizadas na Amazônia, sendo a UHE Belo Monte o carro-chefe dessa expansão. Apesar de tal expansão ser defendida com base em benefícios tais como se tratar de fonte de energia com baixa emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), autores como Fearnside (2002) e Faria et al. (2015) argumentam que usinas hidrelétricas na Amazônia podem apresentar emissões de GEE comparáveis ou até superiores às de usinas termelétricas.

Apesar das incertezas energéticas e impactos socioambientais, o Brasil continua a desenvolver usinas hidrelétricas na Amazônia de maneira sem precedentes (Fearnside, 2016a), sendo que, até maio de 2015 (Fig. 5), quinze Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE, >30 MW de capacidade instalada) na região da Amazônia Legal apresentavam reservatórios cheios, além de outras 37 UHEs planejadas ou em construção, incluindo 18 hidrelétricas na Amazônia planejadas para o período 2014-2024 (MME/EPE, 2015).

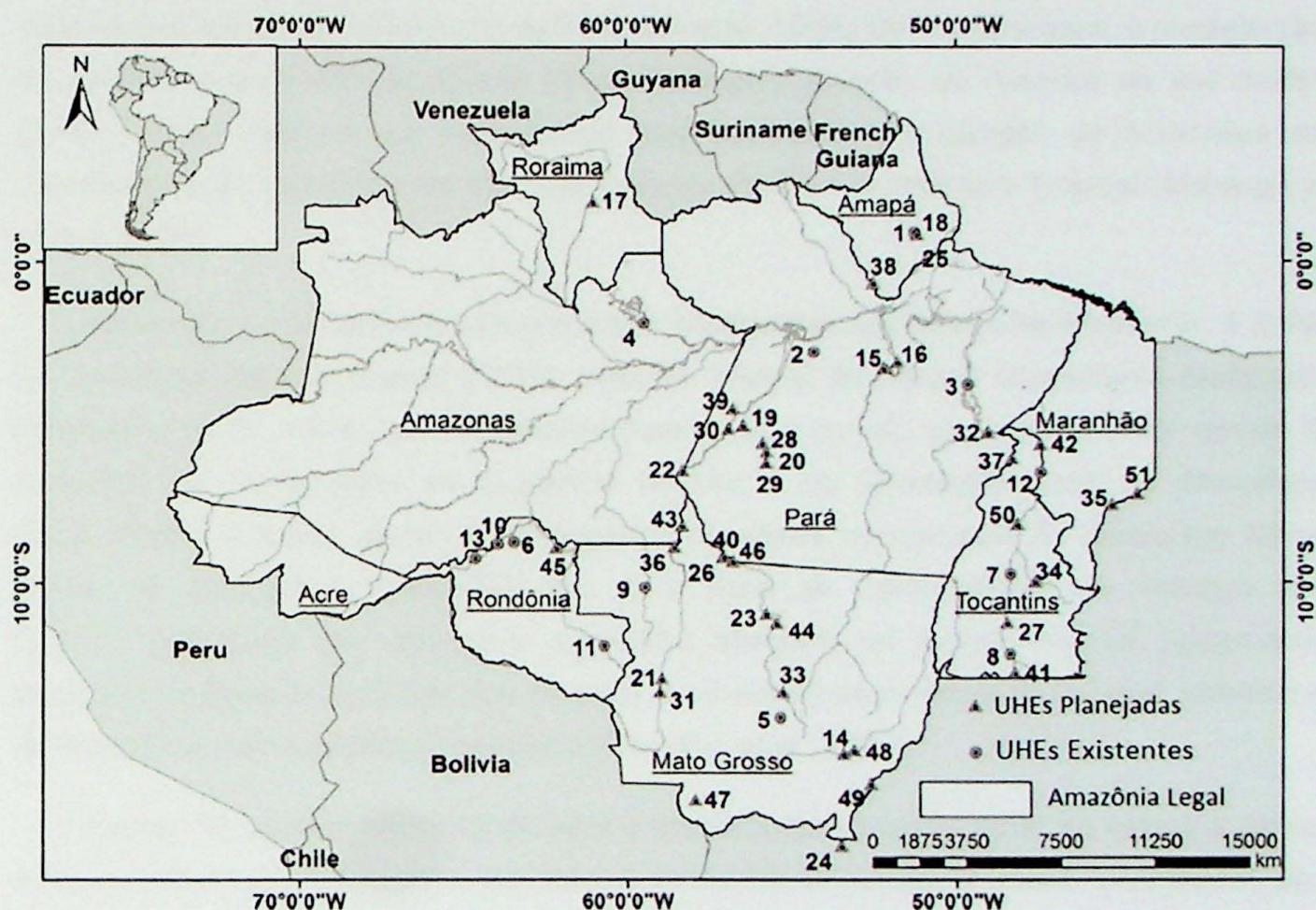


Figura 5. Hidrelétricas existentes e planejadas ou em construção na Amazônia Legal. Fonte: Fearnside (2016a).

### 3.2. A relação entre a UHE Belo Monte e o clima

O potencial hidrelétrico da UHE Belo Monte depende de fatores tais como a vazão do Rio Xingu. Esta, por sua vez, depende de fatores naturais e antrópicos, os quais operam em distintas escalas de tempo, desde interanuais até decadais e seculares (Potter et al., 2004).

Dois dos principais fatores que controlam a vazão do canal são a precipitação e a cobertura vegetal (Nijssen et al., 2001). Esses fatores controlam a disponibilidade e o escoamento de água superficial, e estão ligados intimamente às variações climáticas que, em escala decadal, são determinantes para a segurança do fornecimento e custo de produção da energia elétrica no Brasil (Corrêa da Silva et al., 2016).

Contudo, alterações no relevo (estável na escala de tempo deste trabalho) e na vegetação, devido ao desmatamento e eventos extremos de seca, podem afetar significativamente o regime de precipitação. Entretanto, reitera-se que a relevante questão de como a vazão do Rio Xingu se comportará sob cenários de mudanças climáticas não é considerada em documentos oficiais relacionados à UHE Belo Monte, tais como seu Relatório de Impacto Ambiental (Eletrobrás, 2009).

A pluviosidade da Amazônia é significativamente heterogênea, espacial e sazonalmente, com ao menos três núcleos de precipitação abundante, que se inicia em grande parte durante a primavera, atingindo o máximo no verão (Fisch et al., 1996). De maneira geral, a precipitação na Amazônia é climatologicamente influenciada pela Monção da América do Sul (MAS) (Zhou e Lan, 1998), e sua variabilidade está associada aos campos de Anomalias da Temperatura da Superfície do Mar nos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (Marengo e Nobre, 2009).

Há também dois sistemas climatológicos importantes que atuam na Amazônia, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), cinturão tropical de células convectivas profundas (Schneider et al., 2014), que se desloca para norte e sul em torno do equador devido a variações na Temperatura da Superfície do Mar e na Circulação Geral da Atmosfera (NOAA/NWS) e existe devido à convergência de alísios de nordeste do Hemisfério Norte alísios de sudeste do Hemisfério Sul, e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), constituída por uma zona convectiva alongada de direção NW-SE tipicamente originada na Bacia Amazônica, que promove o transporte de umidade do Oceano Atlântico e da Amazônia para o centro-sul brasileiro (Carvalho et al., 2004).

Apesar de eventos extremos de seca e precipitação poderem durar de meses a vários anos e estarem normalmente associados à variabilidade natural climática, controlados por fatores como a Temperatura da Superfície do Mar (Stahle et al., 2007), a mudança climática associada ao aquecimento global pode alterar a frequência e intensidade desses eventos.

Modelos climáticos recentes (IPCC, 2014; PBMC, 2014) projetam aumento na frequência de eventos climáticos extremos nas próximas décadas. Particularmente na Amazônia, espera-se a intensificação e aumento na frequência de eventos extremos de seca (Malhi et al., 2008). O decréscimo na umidade do solo pode levar à savanificação da floresta, comprometendo

inclusive a contribuição da própria umidade da floresta para a precipitação da região (IPCC, 2014). Assim sendo, a redução da disponibilidade de água superficial terá consequências diretas sobre empreendimentos hidrelétricos, forçando-os a alterar a capacidade dos reservatórios, o que intensificaria impactos ambientais nos arredores das barragens.

### **3.3. Mudança climática e o desmatamento na Amazônia**

Alguns dos cenários futuros de mudança climática (e.g. Sorribas et al., 2016) e de alterações na cobertura vegetal (e.g. Coe et al., 2013; Stickler et al., 2013; Guimberteau et al., 2016) projetados para as próximas décadas descrevem alterações na precipitação no Leste Amazônico, que poderão provocar alterações drásticas na dinâmica hidrológica do Rio Xingu.

Ao investigar diversos modelos climáticos do *International Panel on Climate Change* (IPCC), Sorribas et al. (2016) examinaram o efeito das projeções de mudança climática na vazão dos principais rios amazônicos, adotando as mudanças na precipitação características do cenário RCP 8.5 (aumento de até 8,5 W/m<sup>2</sup> na forçante radioativa terrestre) para os anos de 2070 a 2099. Inicialmente, foram comparados cinco dos principais Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs) quanto às projeções e se observou que, apesar de diversas incertezas, um dos principais pontos de acordo entre os modelos está na redução da precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial para o leste amazônico (Fig. 6).

A partir da projeção média entre os cinco MCGAs, Sorribas et al. (2016) utilizaram o modelo hidrológico para o cálculo de anomalias de vazão (Fig. 7). Em todos os casos, as anomalias negativas na Bacia do Xingu estão entre as de maior destaque.

Em relação às projeções das alterações na cobertura vegetal (Fig. 8), de acordo com Stickler et al. (2013), alterações na evapotranspiração devido à redução da cobertura florestal por desmatamento ocasionarão decréscimo de precipitação e, consequentemente, diminuição de 6-36% na vazão do Rio Xingu em 2050. Essa redução da vazão provocará diminuição em proporções similares no potencial hidrelétrico da Bacia do Rio Xingu.

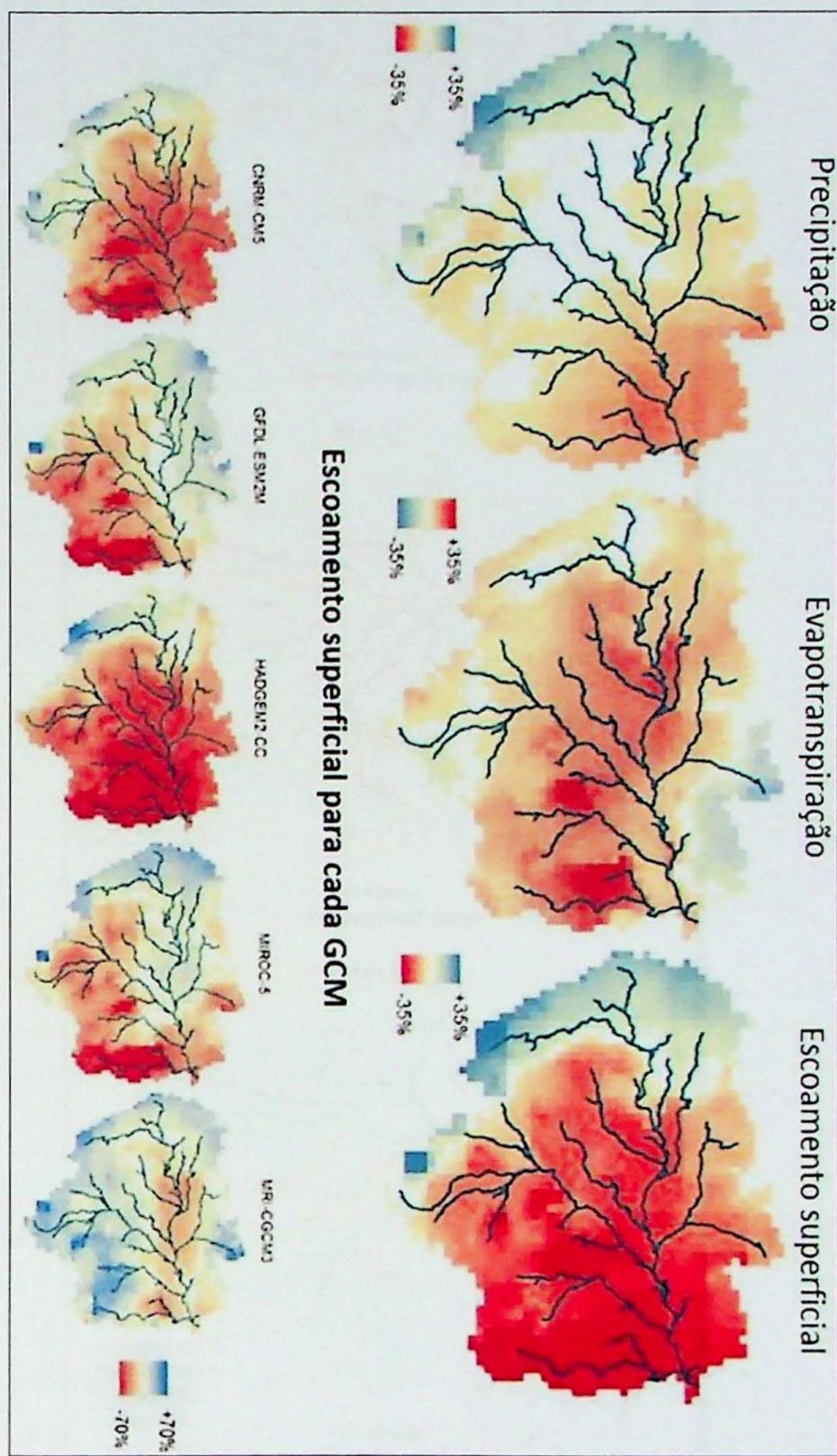


Figura 6. Anomalias médias projetadas de cinco Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) para as variáveis precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial (acima) e anomalias de cada modelo para escoamento superficial (abaixo) para o período 2070-2099. Notar que apesar da discrepância em diversas regiões da Amazônia, a Bacia do Xingu apresenta a maior concordância entre os modelos. Fonte: Sorribas et al. (2016).

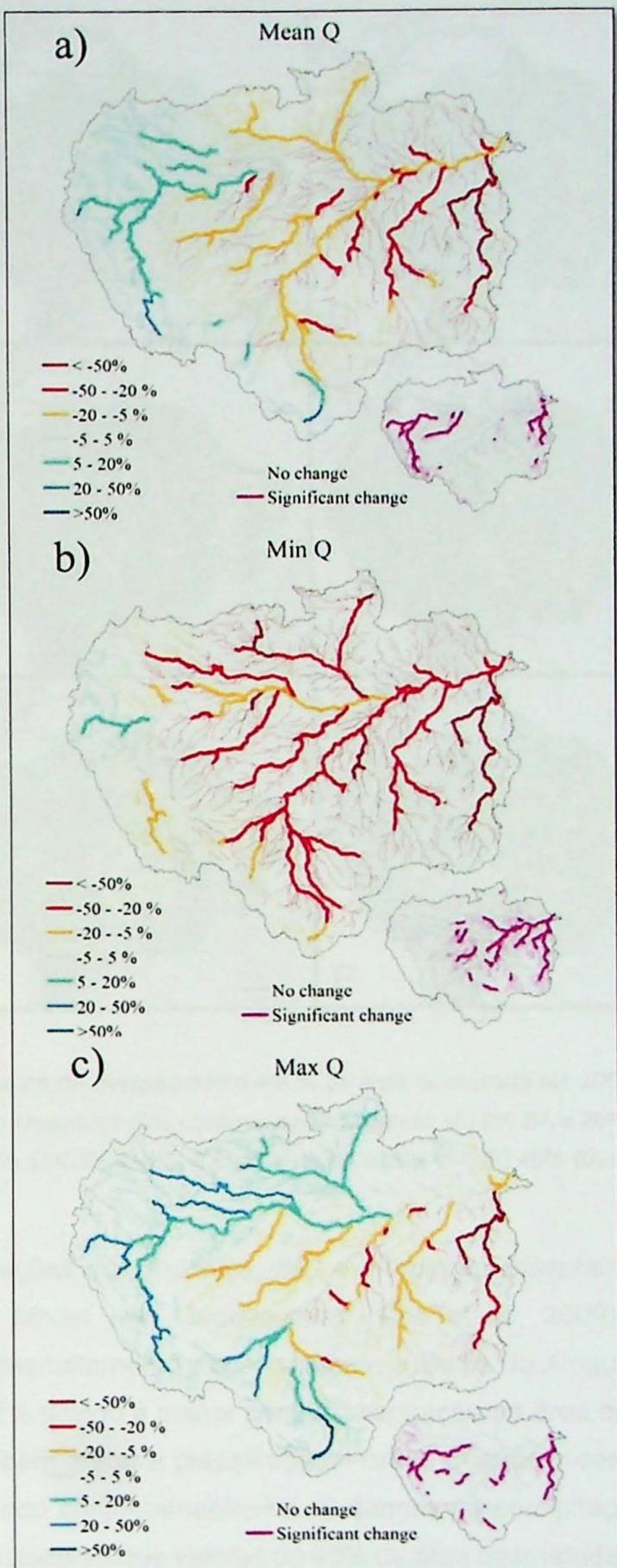


Figura 7. Resultado obtidos a partir da média de cinco modelos para as anomalias de vazões (a) médias, (b) mínimas e (c) máximas no período 2070-2099. As anomalias mais significativas, ao nível de significância de 5%, estão representadas em rosa nas figuras menores. A Bacia do Xingu destaca-se nos três cenários como uma das principais anomalias. Fonte: Sorribas et al. (2016).

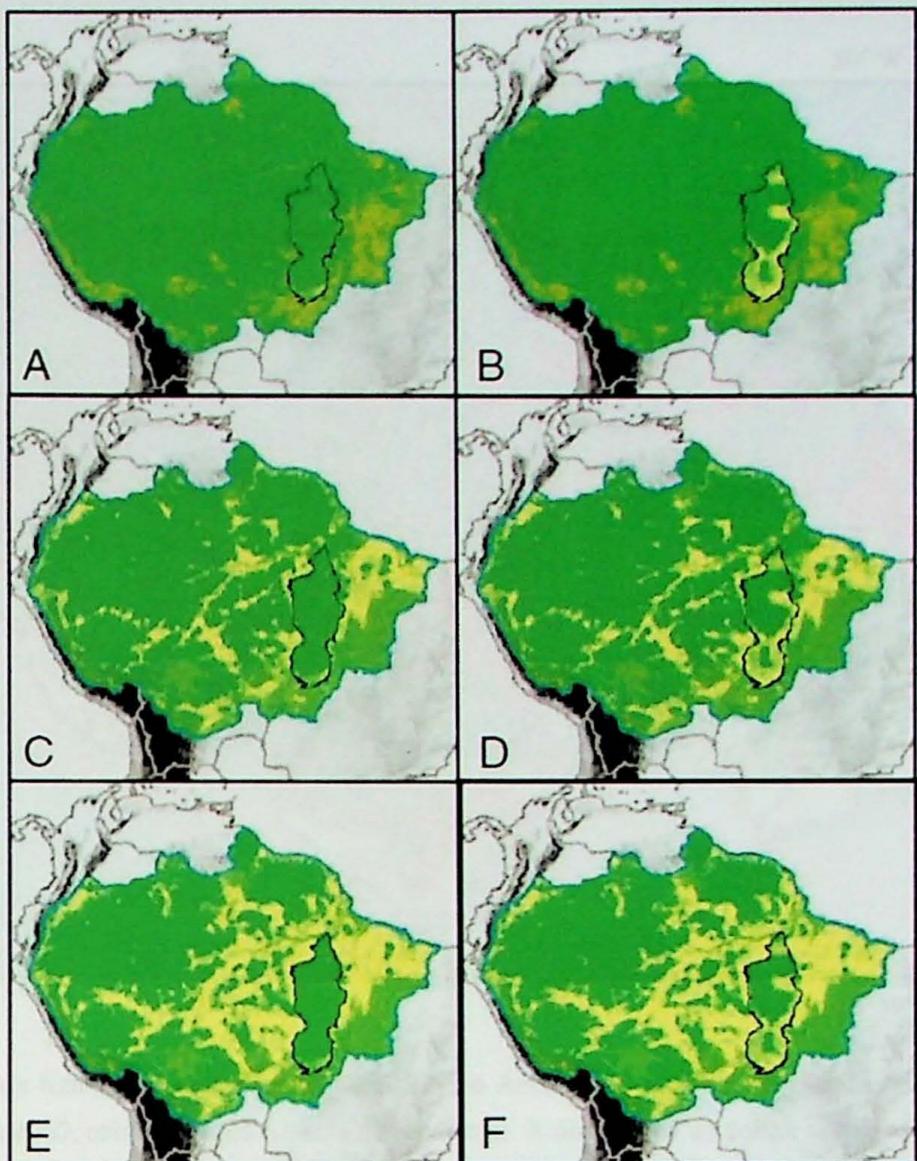


Figura 8. Diferentes cenários de desmatamento em % de área desmatada até 2050 para as bacias do Xingu (BX, contorno preto) e do Amazonas (BA, contorno azul). Legenda: (A) 0% BA e 20% BX; (B) 0% BA e 40% BX; (C) 15% BA e 20% BX; (D) 15% BA e 40% BX; (E) 40% BA e 20% BX; (F) 40% BA e 40% BX. Fonte: Stickler et al. (2013).

A partir de simulações dos modelos *IBIS – Integrated Biosphere Simulator* e *THMB – Terrestrial Hydrology Model with Geochemistry* (Coe et al., 2009), Stickler et al. (2013) concluem que, se o desmatamento afetar somente a Bacia do Xingu, a vazão do Rio Xingu aumentaria em até 12% devido à menor evapotranspiração na área de drenagem, apesar de o desmatamento também afetar a precipitação. Porém, quando o desflorestamento da Bacia do Amazonas é avaliado conjuntamente, há mudanças na precipitação em grande parte da Amazônia (Fig. 9). Destaca-se que valores de 40% de área desmatada nas bacias em questão até 2050 são considerados plausíveis, e até mesmo conservadores (Soares-Filho, 2006).

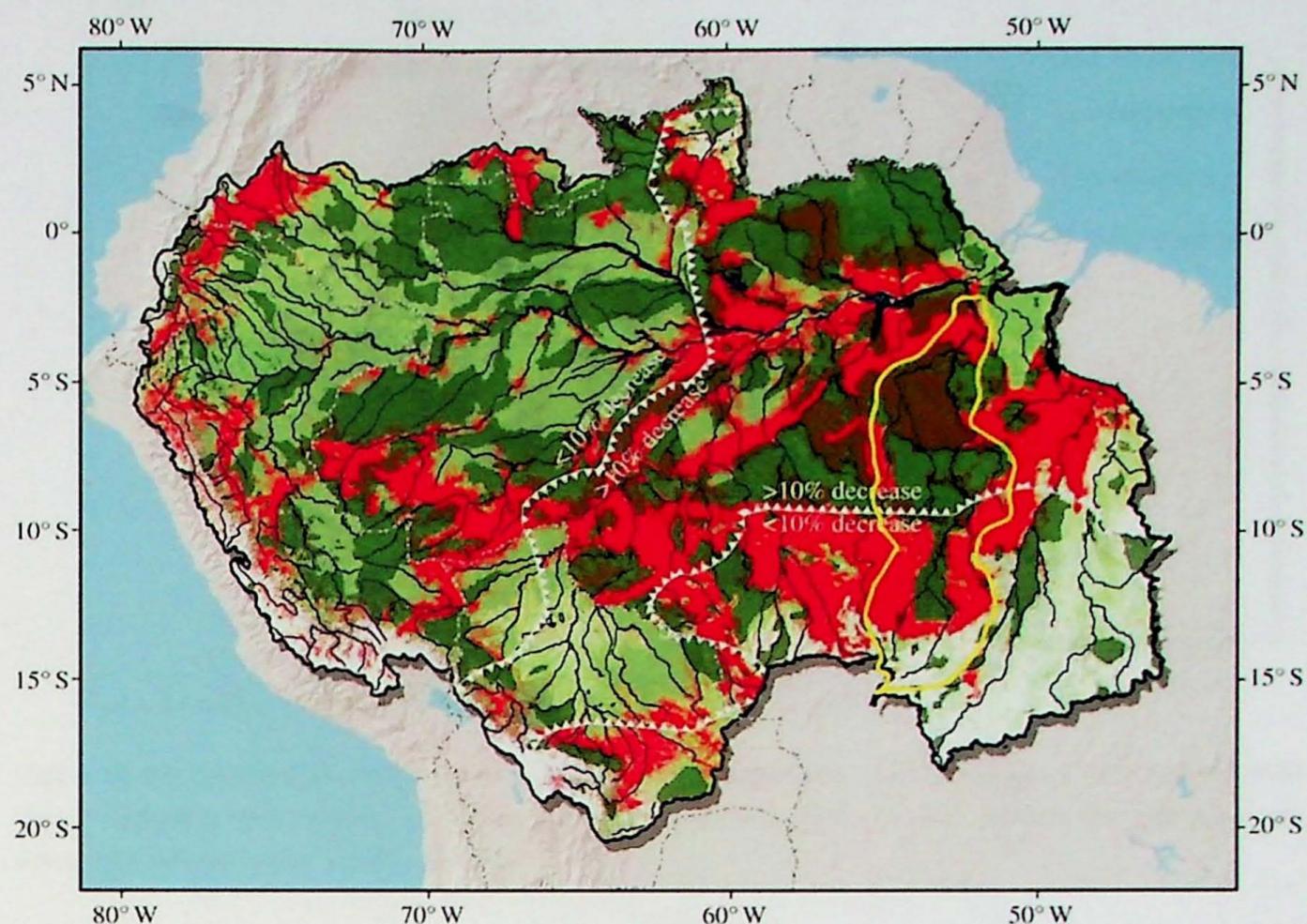


Figura 9. Mudanças futuras de precipitação na Bacia do Amazonas em decorrência de cenário com 50% de desmatamento até 2050, com destaque à Bacia do Rio Xingu. A área entre as linhas serrilhadas brancas sofrerá redução na precipitação superior a 10%. Fonte: Coe et al. (2013), adaptada.

De maneira similar, Guimberteau et al. (2016) consideram distintos cenários de mudanças no uso do solo, representadas por desmatamento, para o período 2080-2099, e estimam como a vazão do Rio Xingu se comportaria de acordo com cada cenário (Fig. 10). No entanto, esse trabalho avalia apenas os efeitos positivos do desmatamento sobre a vazão, que são a redução da evapotranspiração e o consequente aumento do escoamento superficial. Assim, maior quantidade de água da precipitação seria transferida para o sistema de drenagem, contribuindo para o aumento da vazão no canal do Rio Xingu.

Contudo, quando efeitos indiretos do desmatamento sobre a precipitação são levados em consideração, sendo o principal deles a alteração significativa na produção regional de precipitação (como indicado na Figura 9), os efeitos positivos do desmatamento sobre a vazão são superados pelos efeitos negativos da diminuição de precipitação (Fig. 11).

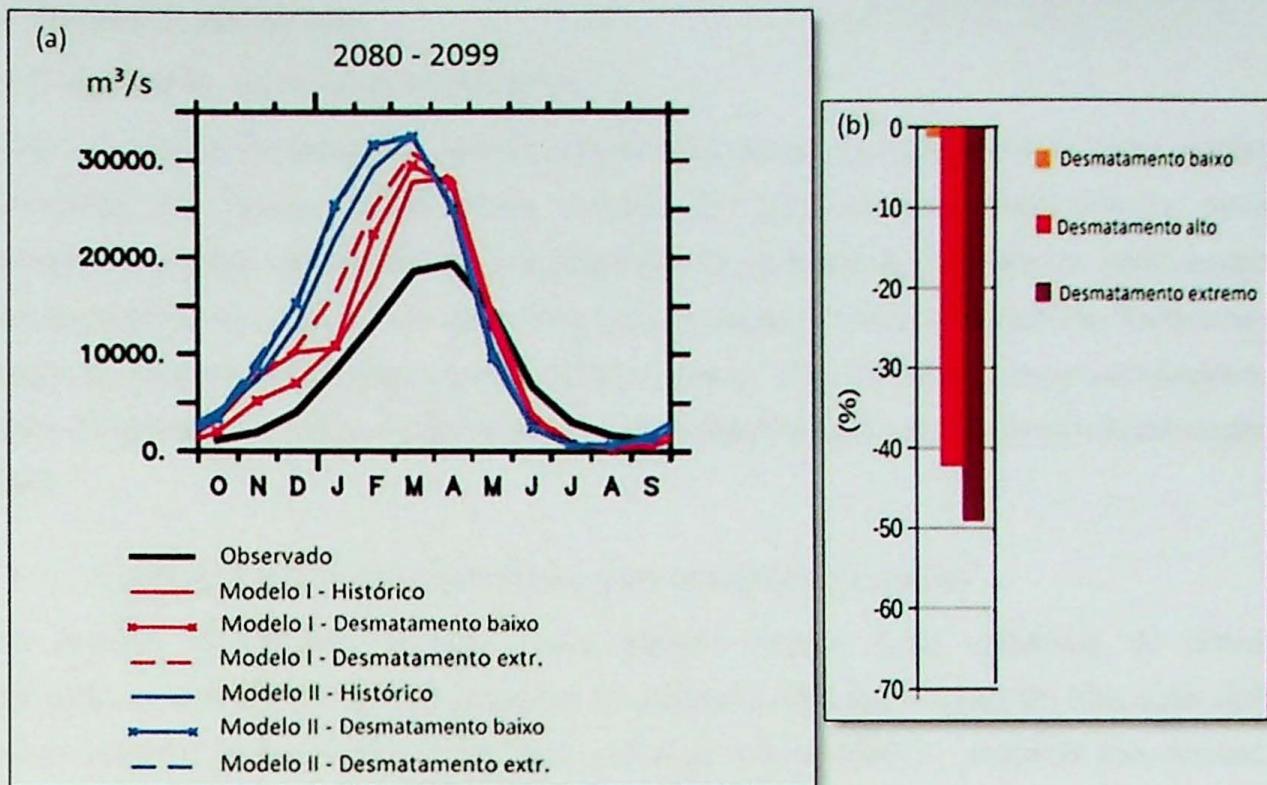


Figura 10. (a) Comparação entre a vazão média observada no Rio Xingu e projeções para o período 2080-2099. Foram utilizados dois modelos hidrológicos diferentes, considerando (b) três cenários de desmatamento. Fonte: Guimberteau et al. (2016), adaptada.

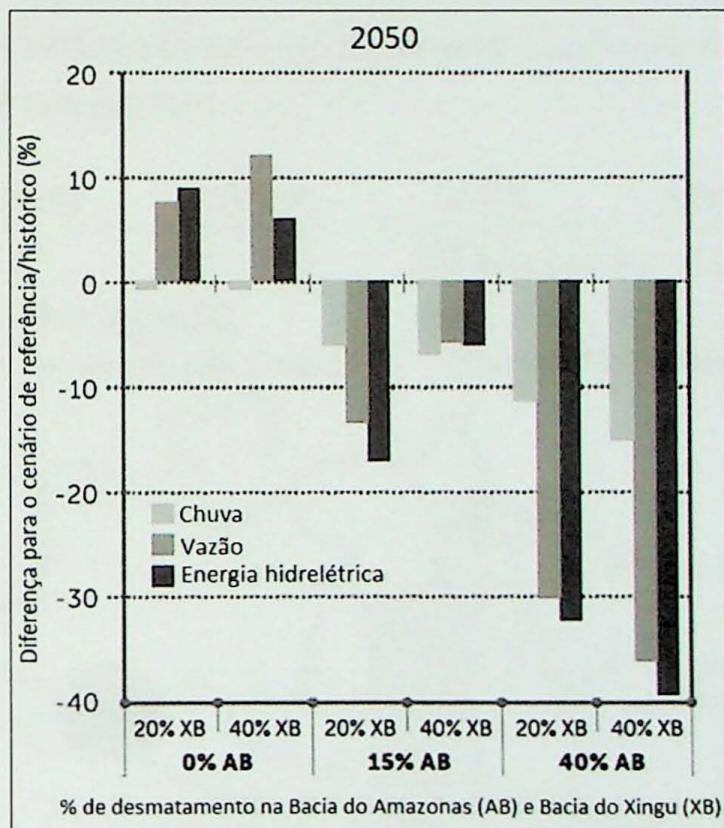


Figura 11. Projeções de precipitação, vazão e potencial de geração de energia hidrelétrica na Bacia do Rio Xingu para o ano de 2050. São considerados distintos cenários de desmatamento nas bacias do Xingu (XB) e Amazonas (AB). Observa-se que, quando há desmatamento apenas em XB, há aumento na vazão e na geração de energia, como apresentado na Figura 12. Porém, quando o desmatamento em AB é considerado, os efeitos no clima regional fazem com que haja a diminuição de precipitação, vazão e produção de energia hidrelétrica. Fonte: Stickler et al. (2013), adaptada.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Aplicação do modelo hidrológico

Com o objetivo de simular a vazão futura do Rio Xingu, foi adotado o modelo numérico desenvolvido por Sacek (2011). Esse modelo foi originalmente desenvolvido para a modelagem conjunta de processos sedimentares e tectônicos em bacias sedimentares, prevendo assim a evolução de margens divergentes desde o início da extensão litosférica e a interação entre processos exógenos e tectônicos (Sacek, 2011). Para o presente trabalho, foi utilizado o módulo do modelo voltado à hidrologia, adaptado para escala de tempo de dezenas de anos.

#### 4.1.1. Calibração do modelo hidrológico para simulação de vazão

O modelo hidrológico utilizado neste estudo requer duas variáveis de entrada: precipitação e topografia. Para a topografia, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE)ETOPO1 (disponível em <<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>>), mantida fixa na escala de tempo deste trabalho e cuja resolução espacial é de 1 arco minuto. Quanto à precipitação, foi utilizada a série histórica de 1976 a 2014 da Agência Nacional de Águas (ANA) de cinco estações pluviométricas distribuídas pela bacia do Rio Xingu, além da estação fluviométrica (dados de vazão) presente no Rio Xingu em Altamira – PA (Fig. 12), local onde há o interesse de se projetar as vazões futuras do rio. Os dados estão disponíveis no sistema Hidroweb da ANA (<<http://hidroweb.ana.gov.br>>).

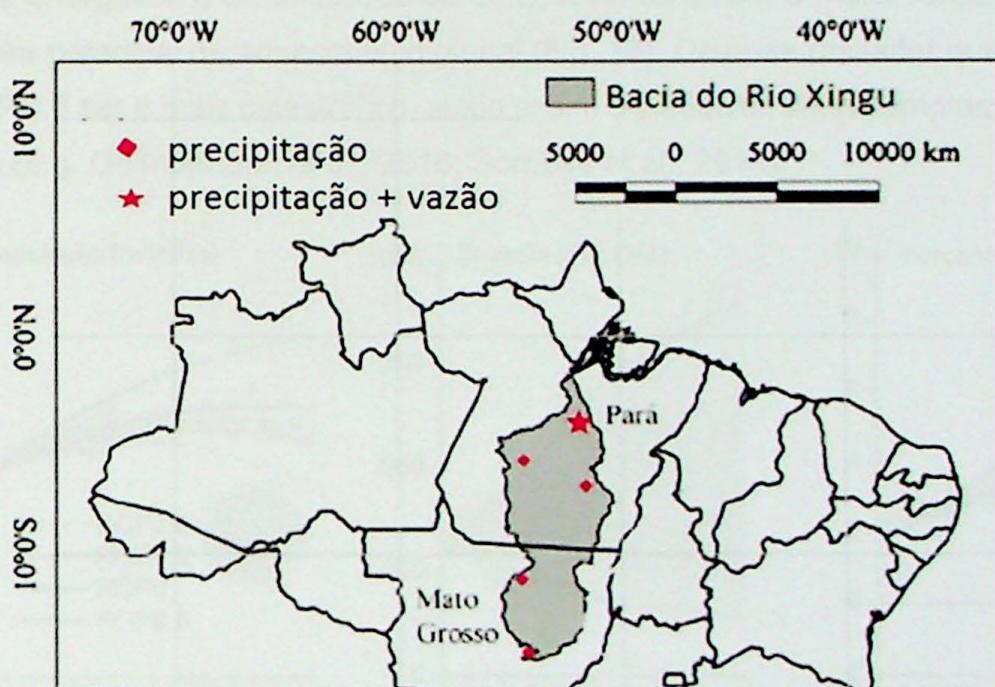


Figura 12. Localização das cinco estações pluviométricas e da estação fluviométrica utilizadas para se obter as respectivas séries históricas de 1976 a 2014. Fonte: Dias et al. (2015), adaptada.

A partir das séries históricas foi possível calibrar o modelo hidrológico por meio da comparação entre a vazão simulada para um período passado e a vazão observada. Deste modo, a vazão simulada foi ajustada à vazão observada por meio da calibração do escoamento superficial.

Uma vez que o modelo está calibrado, foi possível inserir as projeções de precipitação para o período 2017-2045. Tais projeções foram obtidas do modelo climático CNRM-CM5, um dos modelos do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5*) que faz parte do Quinto Relatório do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC AR5, 2014). A escolha do modelo CNRM-CM5, do *Centre National de Recherches Météorologiques* da França, dentre diversos outros modelos do CMIP5, é justificada por este ter apresentado, em estudos prévios, maior resolução espacial atmosférica ( $1,4^\circ \times 1,4^\circ$ ; maior que três outros modelos do CMIP5, CCSM4, GFDL-ESM2M e MIROC\_ESM), além de melhor destreza na representação de sistemas climatológicos tais como a ZCIT sobre a América do Sul (Silva e Mendes, 2015).

Optou-se também pelo cenário RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway*, Caminho Representativo de Concentração) do IPCC, que resulta de suposições de caráter socioeconômico, político e tecnológico quanto às possíveis forçantes radioativas até o ano de 2100 (Vuuren et al., 2011). Na prática, o cenário RCP 8.5 pode ser descrito como o cenário futuro mais pessimista dos quatro disponíveis, no qual haverá o maior aumento populacional, de demanda energética e de emissões de GEE, levando assim à maior forçante radioativa, ou seja, maior potencial de aquecimento global (Fig. 13). Deve-se ressaltar que, apesar de o cenário RCP 8.5 ser o mais catastrófico, ainda assim é plausível, sendo amplamente utilizado na literatura (e.g. Guimbeteau et al., 2016; Sorribas et al., 2016).

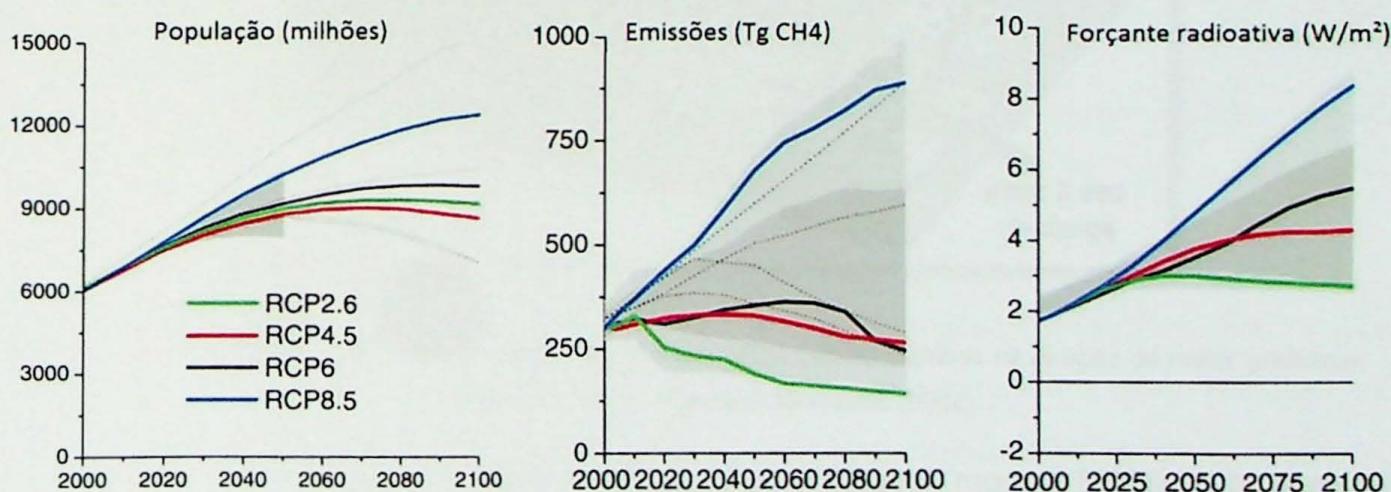


Figura 13. Projeções populacional, de emissões de metano e forçante radioativa para os quatro cenários RCPs do IPCC. Fonte: Vuuren et al. (2011).

A projeção de precipitação foi obtida em (<https://pcmdi.llnl.gov/search/cmip5/>). Neste trabalho, foi utilizado o software GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para a visualização do arquivo de interesse, tal como para a extração das médias e anomalias futuras, posteriormente inseridas no modelo hidrológico.

#### 4.1.2. Funcionamento do modelo hidrológico

Para a determinação do padrão de escoamento superficial a partir do modelo digital de relevo, utilizou-se o algoritmo descrito por Braun e Sambridge (1997). Neste algoritmo, assume-se que o escoamento entre duas células vizinhas ocorra na direção de maior gradiente topográfico (Fig. 14).

A malha utilizada para representar a topografia é regular e consiste em células quadradas, que permitem que o fluxo de água em uma certa célula ocorra para uma das oito células vizinhas. No caso de mínimos locais, foi utilizado o algoritmo baseado no trabalho de Sacek (2014), que permite que a água de mínimos locais (lagos) escoe para o mínimo global (nível de base).

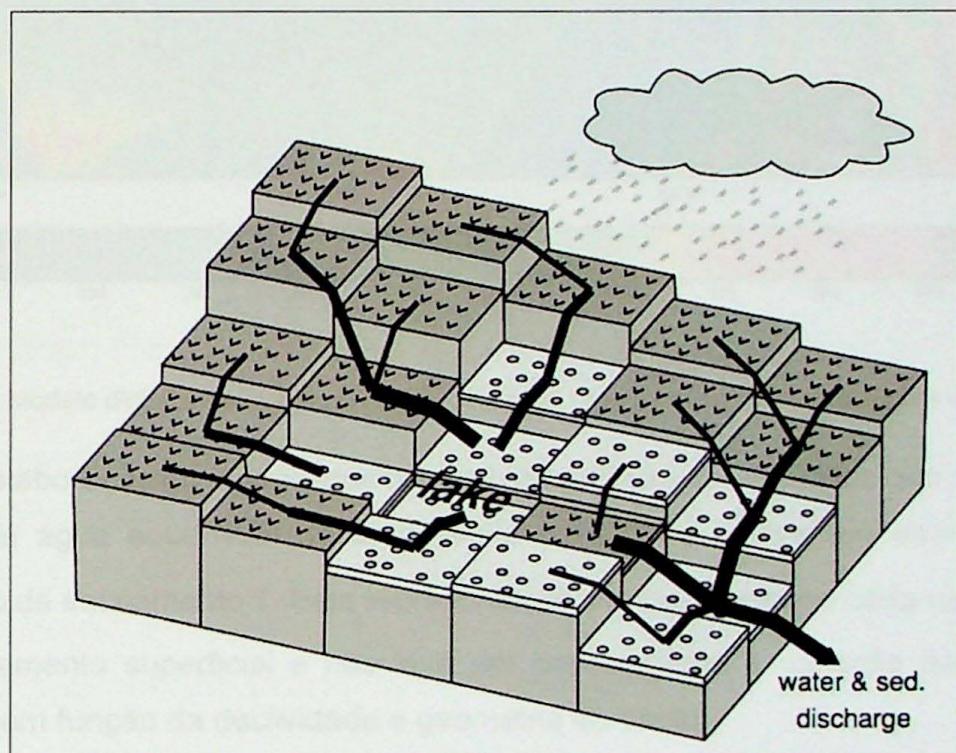


Figura 14. Ilustração do escoamento superficial de água entre células vizinhas na direção de maior gradiente topográfico. Fonte: Garcia-Castellanos (2002).

Para o modelo digital de terreno utilizou-se os dados do modelo ETOPO1 (Amante e Eakins, 2009) com espaçamento horizontal de 1 arco minuto. A região de interesse (Fig. 15) resultou em uma malha com  $901 \times 901 = 811801$  células, sendo cada célula com dimensão de  $1,85 \times 1,85 \text{ km}^2$ . A partir do MDE e do algoritmo descrito acima, o modelo hidrológico gera interconectividade entre as células do modelo, dando forma às bacias hidrográficas.

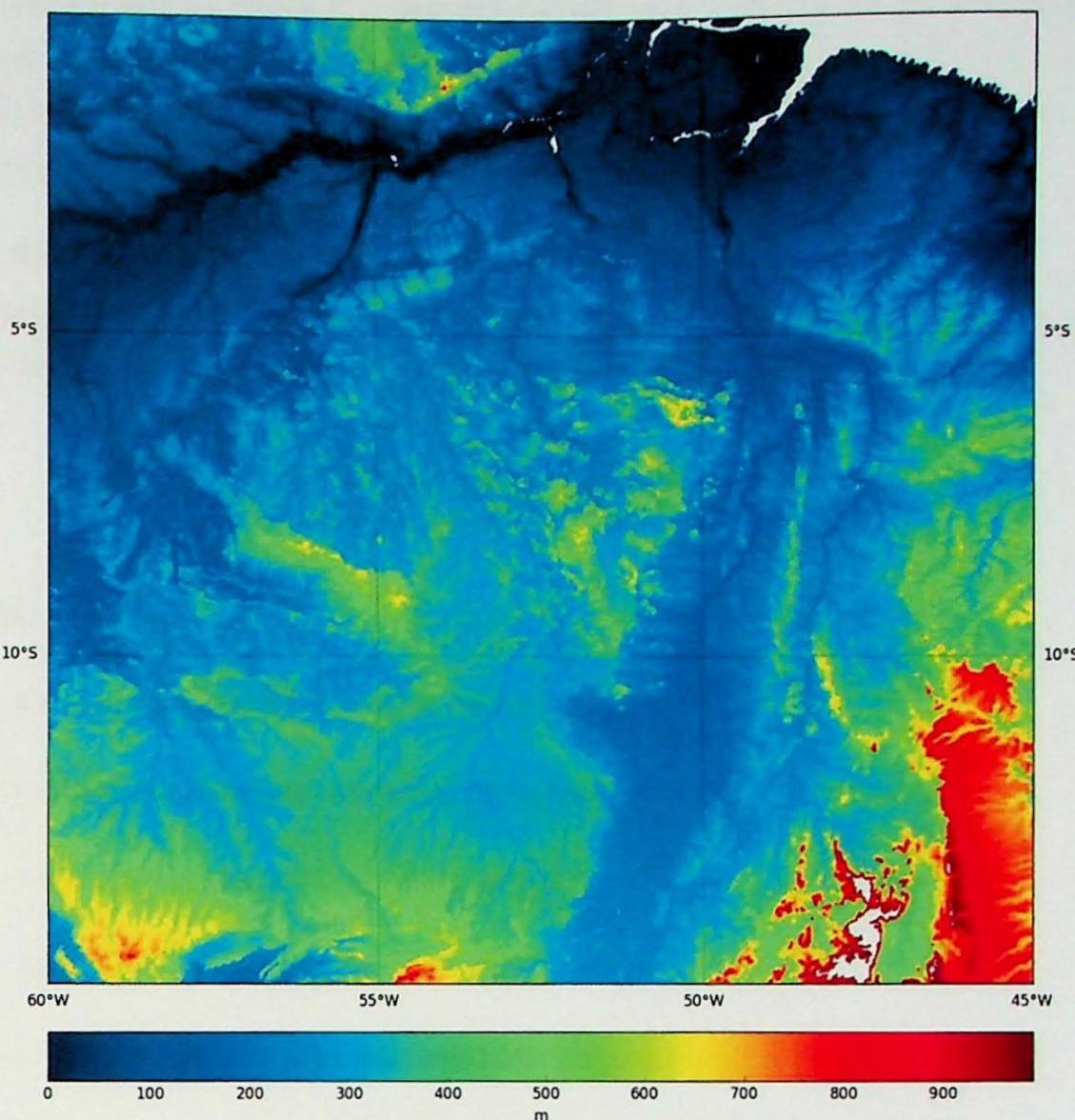


Figura 15. Modelo digital de elevação ETOPO1, utilizado para se determinar os padrões de drenagem.

Após a elaboração do modelo das bacias hidrográficas, foi assumido que o deslocamento de massa de água superficial de uma célula para outra ocorra em intervalo de tempo característico de escoamento  $\tau$ . Esta representação simplista assume certa velocidade média para o escoamento superficial e não leva em consideração a variação da velocidade de escoamento em função da declividade e geometria do canal.

Qualitativamente, um intervalo de tempo característico  $\tau$  pequeno significa que a vazão em um certo ponto da bacia de drenagem responde rapidamente a uma variação na precipitação sobre a bacia. Já valores altos de  $\tau$  implicam no atraso na resposta da vazão do rio em relação a uma perturbação na taxa de precipitação. É importante destacar que, na presente formulação, o  $\tau$  é dependente do espaçamento da malha, ou seja, se o espaçamento entre os pontos aumentar, seria necessário aumentar proporcionalmente o  $\tau$  para obter um cenário numérico equivalente.

Em cada passo de tempo  $\tau$ , o escoamento de água entre células vizinhas transporta o volume de água presente na célula naquele momento adicionando-se a água proveniente da precipitação local no intervalo de tempo. A precipitação é imposta em cada célula do modelo de acordo com dados de entrada e pode variar espacial e temporalmente.

#### 4.2. Cálculo da geração futura de energia hidrelétrica

A geração média de energia da UHE Belo Monte pode ser estimada de acordo com a equação de potencial hidrelétrico, indicada a seguir (Equação 1).

$$P_m = \Delta h \times Q_m \times g \times EF$$

(Eq. 1)

Onde:

$P_m$  = Potencial hidrelétrico mensal médio (MW);

$\Delta h$  = Desnível líquido de referência (87,5 metros);

$Q_m$  = Vazão média mensal ajustada ( $m^3/s$ );

$g$  = Aceleração da gravidade ( $9,81 m/s^2$ );

$EF$  = Fator de eficiência do conjunto turbinas-geradores (91,8%);

Considerando que a aceleração da gravidade e a eficiência das máquinas são constantes e que o desnível está intimamente associado à vazão (pois este é um dos fatores controladores do nível do reservatório), conclui-se que a produção energética de Belo Monte depende essencialmente da vazão do Rio Xingu. Deste modo, variações na vazão do rio induzidas por mudança climática são de extrema significância para a segurança energética da UHE Belo Monte. Sendo assim, a partir dos resultados do modelo hidrológico, é possível estimar a produção energética futura da UHE Belo Monte.

Deve-se também considerar o comprometimento da operação da UHE Belo Monte com a vazão do Rio Xingu em seu Trecho de Vazão Reduzida (TVR), a jusante da barragem de Pimental, estabelecido no *Cálculo da Garantia Física de Belo Monte* (MME/EPE, 2010). Neste documento, são estabelecidas as seguintes regras:

1. Deve-se manter vazão mínima no reservatório dos canais de  $300 m^3/s$ ;
2. Deve-se manter vazões médias (em  $m^3/s$ ) mensais no TVR (Tabela II), alternando os hidrogramas A e B em anos consecutivos;

Tabela II. Vazões mínimas destinadas ao TVR, em anos que serão alternados

Hidrograma	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A	1100	1600	2500	4000	1800	1200	1000	900	750	700	800	900
B	1100	1600	4000	8000	4000	2000	1200	900	750	700	800	900

- 2.1. Caso a vazão afluente seja menor (para um dado mês) do que a prevista nos hidrogramas, a totalidade da vazão afluente deverá ser mantida no TVR;
- 2.2. Se a vazão afluente for menor (para um dado mês) do que a prevista nos hidrogramas somada a 300 m<sup>3</sup>/s, o nível d'água do reservatório poderá ser reduzido para atender aos itens 2. e 2.1.

Observa-se nas regras acima que, se a vazão do Rio Xingu no trecho de sua Volta Grande for menor que a vazão mínima estabelecida (considerando o mês e ano de cada hidrograma), toda a vazão do Rio Xingu deverá permanecer no TVR, ou seja, as comportas da barragem de Pimental permanecerão abertas, não havendo contribuição do rio para o abastecimento do reservatório ou manutenção de seu nível.

Destaca-se também que, como todos os cálculos oficiais basearam-se nas médias mensais das vazões históricas, como por exemplo, a vazão do mês de abril considerada pelos documentos oficiais equivale à média das vazões de abril entre os anos de 1931 e 2007, o valor oficialmente divulgado da geração média da UHE Belo Monte (4.571 MW efetivos) desconsidera eventuais mudanças de origem climática na vazão do Rio Xingu.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Análise da série histórica de precipitação e vazão

A partir da série histórica de precipitação e vazão obtidos pelo sistema Hidroweb da ANA, foram organizados gráficos (Fig. 16, Anexo A) da evolução desses parâmetros ao longo de 39 anos (desde 1976 até 2014), separados por mês. A estação fluviométrica utilizada para a coleta dos dados de vazão está localizada em Altamira – PA (3°12'36"S; 52°12'36"W). Essa estação foi escolhida por estar localizada diretamente na área de interesse deste estudo e apresentar dados contínuos e atuais de vazão. Quanto à precipitação, estão ilustrados os dados da estação pluviométrica localizada em Paratinga – MT (13°26'58"S; 54°17'58"W). Essa estação foi escolhida por apresentar dados com maior continuidade temporal que as demais, além de estar localizada na região das cabeceiras do Rio Xingu, no Mato Grosso, onde há maior densidade da malha de drenagem e se espera maior contribuição para a vazão do rio.

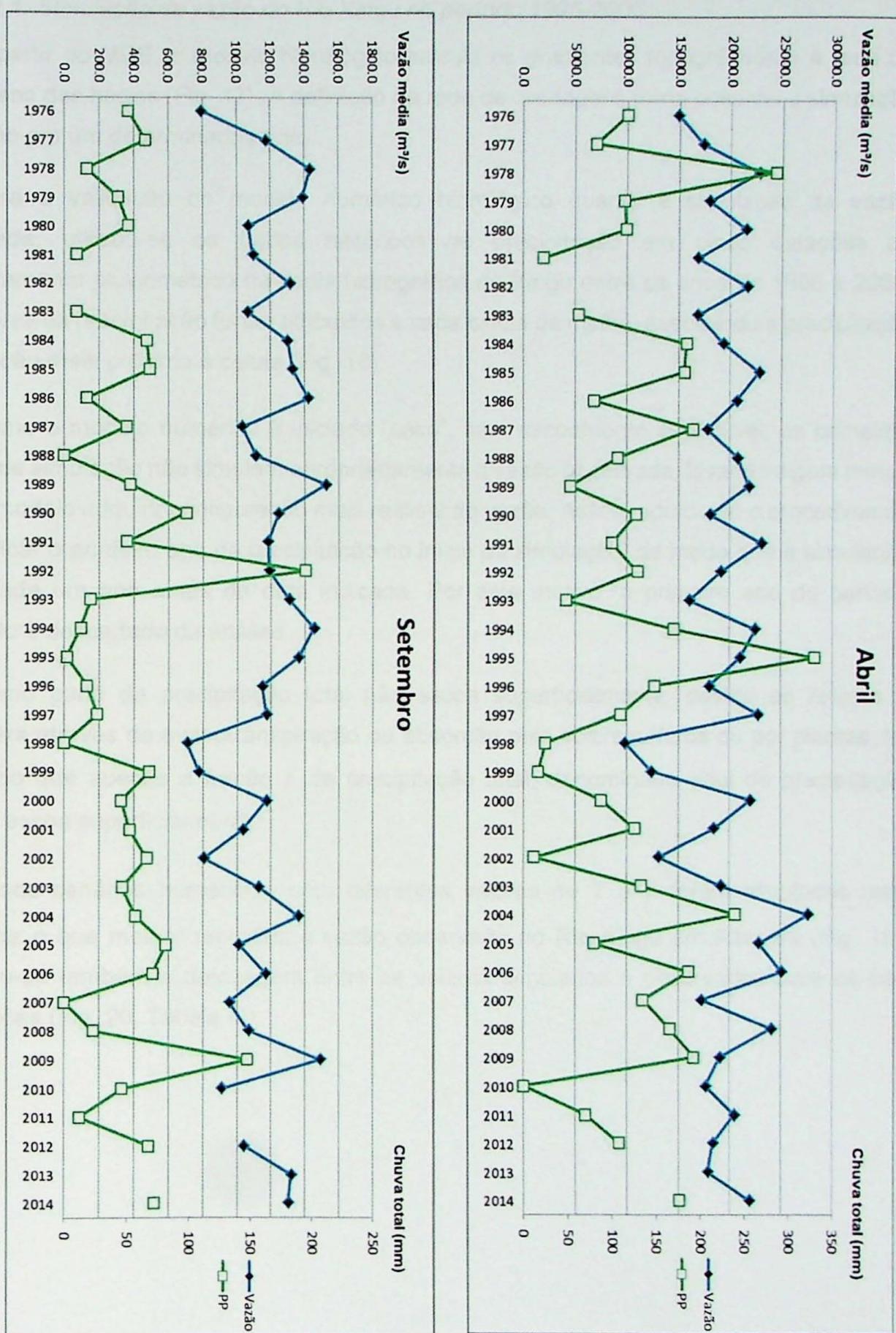


Figura 16. Variação de precipitação (pp; em mm) e vazão ( $m^3/s$ ) entre os anos de 1976 a 2014, para os meses de abril (cheia) e setembro (seca).

## **5.2. Simulações de vazão a partir do modelo hidrológico**

### *5.2.1. Simulação da vazão do Rio Xingu no período 1996-2006*

A partir do MDE, o modelo hidrológico calcula os gradientes topográficos e a rede de drenagens das bacias (Fig. 17). A definição da rede de drenagens torna possível a simulação da vazão em um determinado ponto.

Para a validação do modelo numérico hidrológico quanto à simulação da vazão observada, utilizou-se os dados históricos de precipitação em cinco estações de monitoramento pluviométrico na bacia hidrográfica do Xingu entre os anos de 1996 e 2006. Os valores da precipitação foram atribuídos a cada célula da malha, assumindo a precipitação da estação mais próxima à célula (Fig. 18).

Como o modelo numérico é iniciado “seco”, sem escoamento superficial, os primeiros meses de simulação não simulam apropriadamente a vazão observada, levando algum tempo para o modelo adquirir configuração mais realista da vazão. Assim, adotou-se o procedimento de duplicar o primeiro ano de precipitação no início da simulação, de modo que a simulação foi iniciada um ano antes da data indicada. Por este motivo, o primeiro ano do período simulado é descartado da análise.

Como parte da precipitação total não escoa superficialmente, devido ao retorno à atmosfera através da evapotranspiração ou absorção pelo solo/aquíferos ou por plantas, foi assumido que apenas a fração  $f$  da precipitação total, denominada aqui de precipitação efetiva, escoa superficialmente.

Vários cenários numéricos, com diferentes valores de  $\tau$  e  $f$  foram simulados para encontrar o que melhor reproduz a vazão observada no Rio Xingu em Altamira (Fig. 19). Calculou-se também a defasagem entre os valores simulados e observados para as três simulações (Fig. 20, Tabela III).

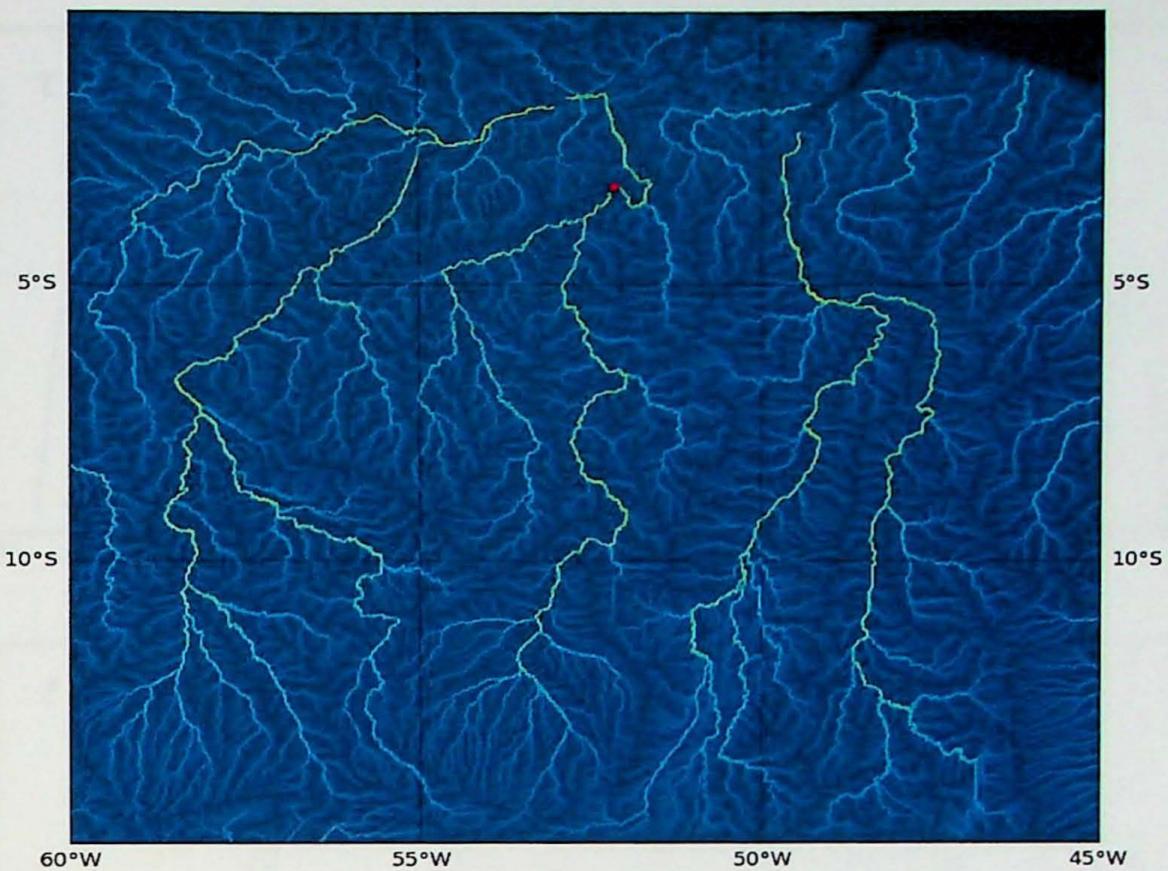


Figura 17. Padrão de drenagem e escoamento superficial entre células vizinhas obtido pela aplicação do modelo hidrológico sobre o MDE (Fig. 15). Os tons de azul escuro até amarelo claro representam aumento progressivo na área da bacia de drenagem que contribui para uma específica célula. O ponto vermelho representa a localidade de Altamira – PA.

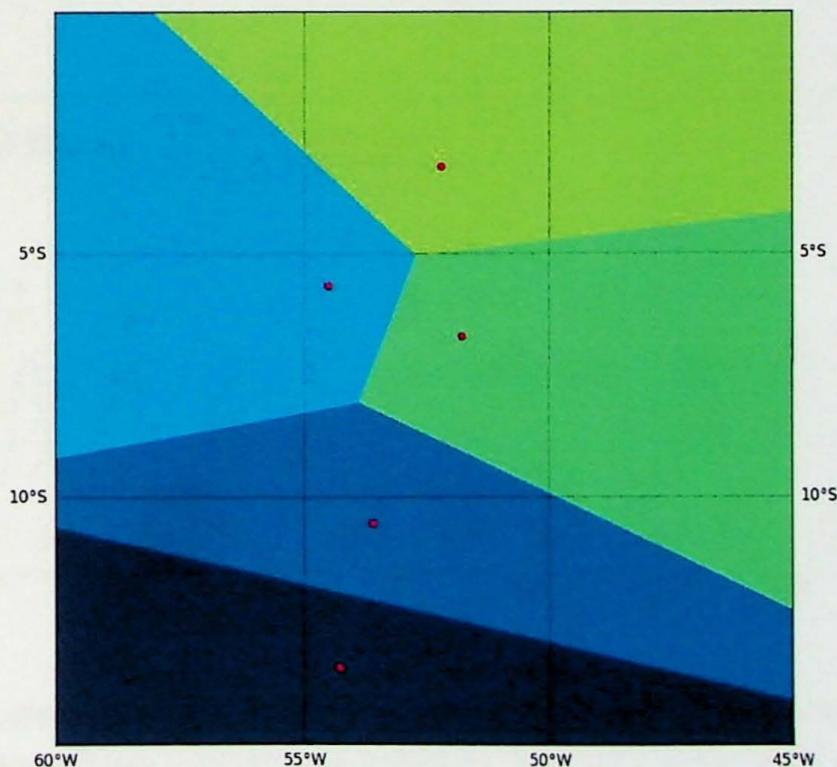


Figura 18. Posição geográfica das cinco estações pluviométricas (pontos vermelhos) e os respectivos domínios de atuação da precipitação de cada estação sobre as células do modelo numérico.

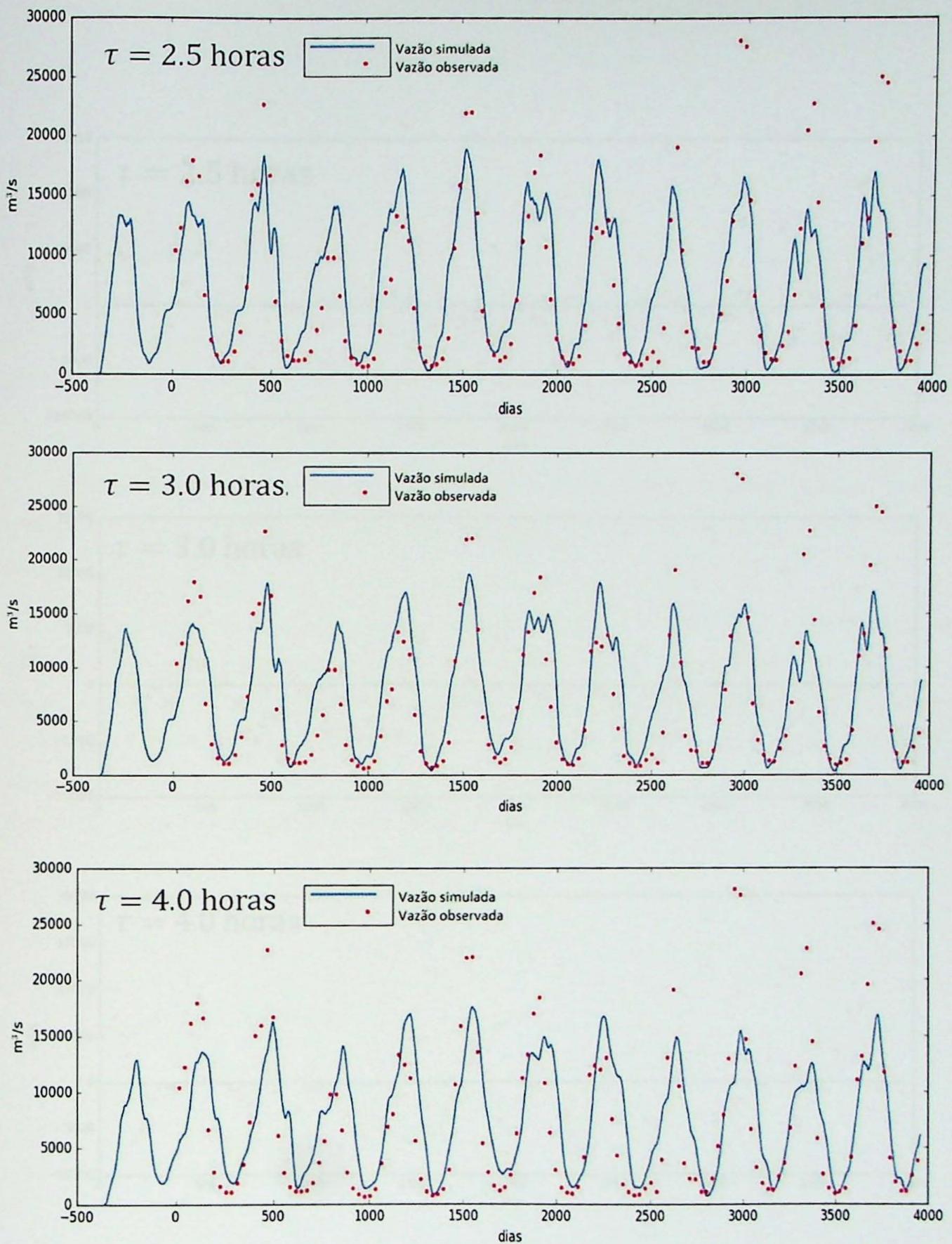


Figura 19. Comparaç $\text{\~ao}$  entre a vazão do Rio Xingu em Altamira observada (pontos vermelhos) e calculada numericamente (curva azul) para o período entre os anos de 1996 e 2006 para o modelo com  $\tau = 2,5; 3,0$  e  $4,0$  horas. Destaca-se a defasagem entre os picos de vazão dos dados observados e simulados. A curva no intervalo de tempo negativo representa um ano adicionado somente para que no instante  $t = 0$  o modelo não estivesse “seco”.

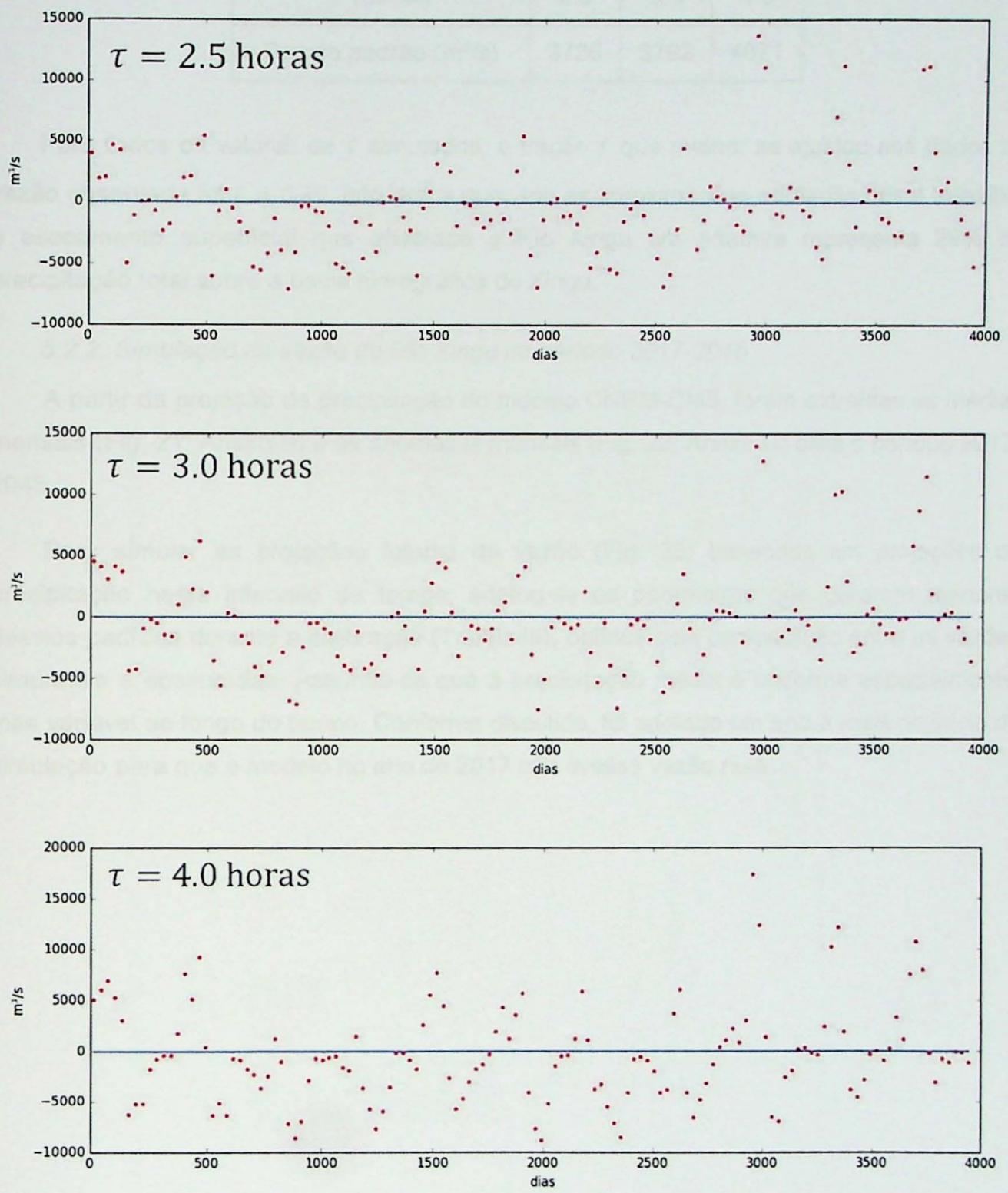


Figura 20. Diferença entre os dados observados e simulados numericamente para o modelo com  $\tau = 2.5; 3.0$  e  $4.0$  horas. Destaca-se o caráter periódico da diferença resultante da defasagem dos picos de vazão, especialmente no terceiro gráfico.

Tabela III. Desvio padrão da diferença entre os valores de vazão em Altamira observados e calculados numericamente para diferentes valores de  $\tau$ .

$\tau$ (horas)	2.5	3.0	4.0
Desvio padrão ( $m^3/s$ )	3736	3792	4671

Para todos os valores de  $\tau$  simulados, a fração  $f$  que melhor se ajustou aos dados de vazão observada foi  $f = 0.29$ . Isto indica que, sob as aproximações adotadas neste trabalho, o escoamento superficial que abastece o Rio Xingu em Altamira representa 29% da precipitação total sobre a bacia hidrográfica do Xingu.

#### 5.2.2. Simulação da vazão do Rio Xingu no período 2017-2045

A partir da projeção de precipitação do modelo CNRM-CM5, foram extraídas as médias mensais (Fig. 21; Anexo B) e as anomalias mensais (Fig. 22; Anexo C) para o período 2017-2045.

Para simular as projeções futuras de vazão (Fig. 23) baseadas em projeções da precipitação neste intervalo de tempo, adotou-se os parâmetros que geraram menores desvios padrões durante a calibração (Tabela III), obtidos pela comparação entre as vazões simuladas e observadas. Assumiu-se que a precipitação média é uniforme espacialmente, mas variável ao longo do tempo. Conforme discutido, foi adotado um ano a mais no início da simulação para que o modelo no ano de 2017 não tivesse vazão nula.

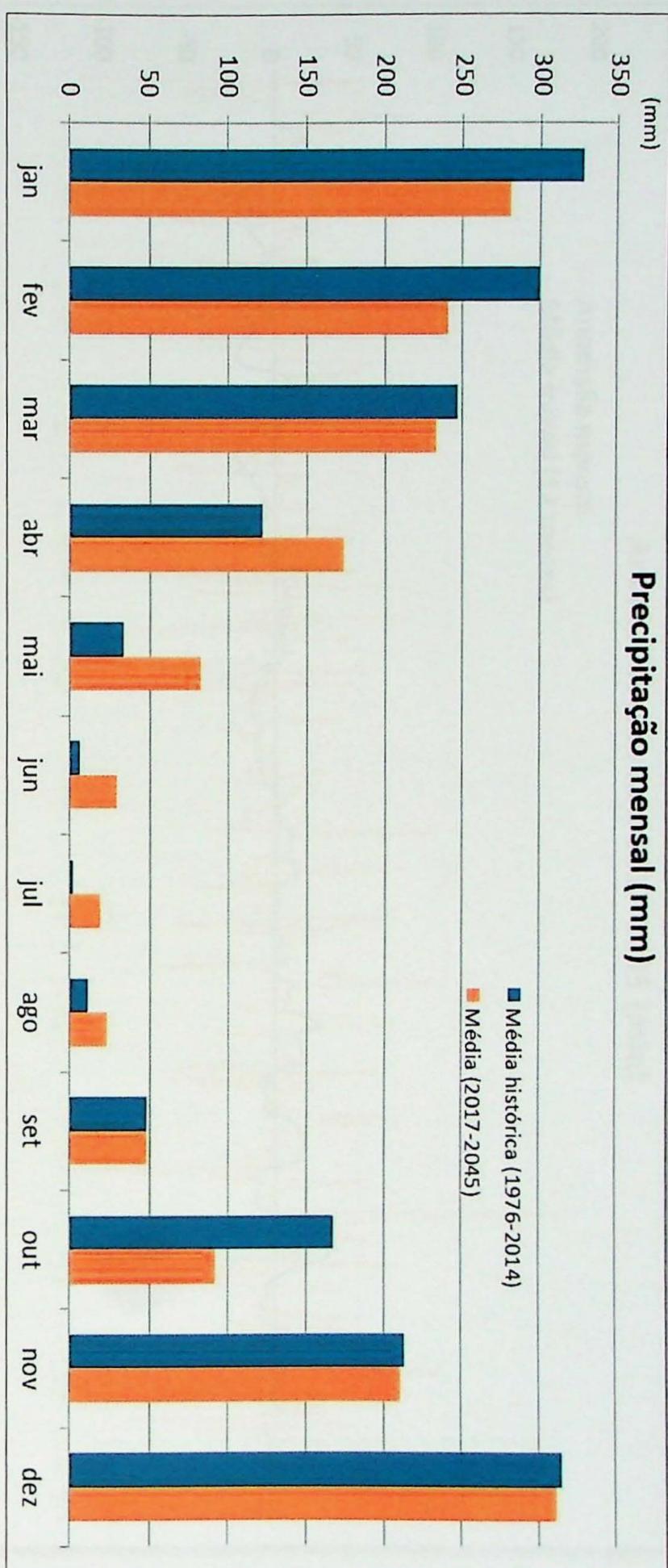


Figura 21. Precipitação mensal média para o período 2017-2045 (em laranja) comparada com a média histórica de 1976-2014 (em azul).

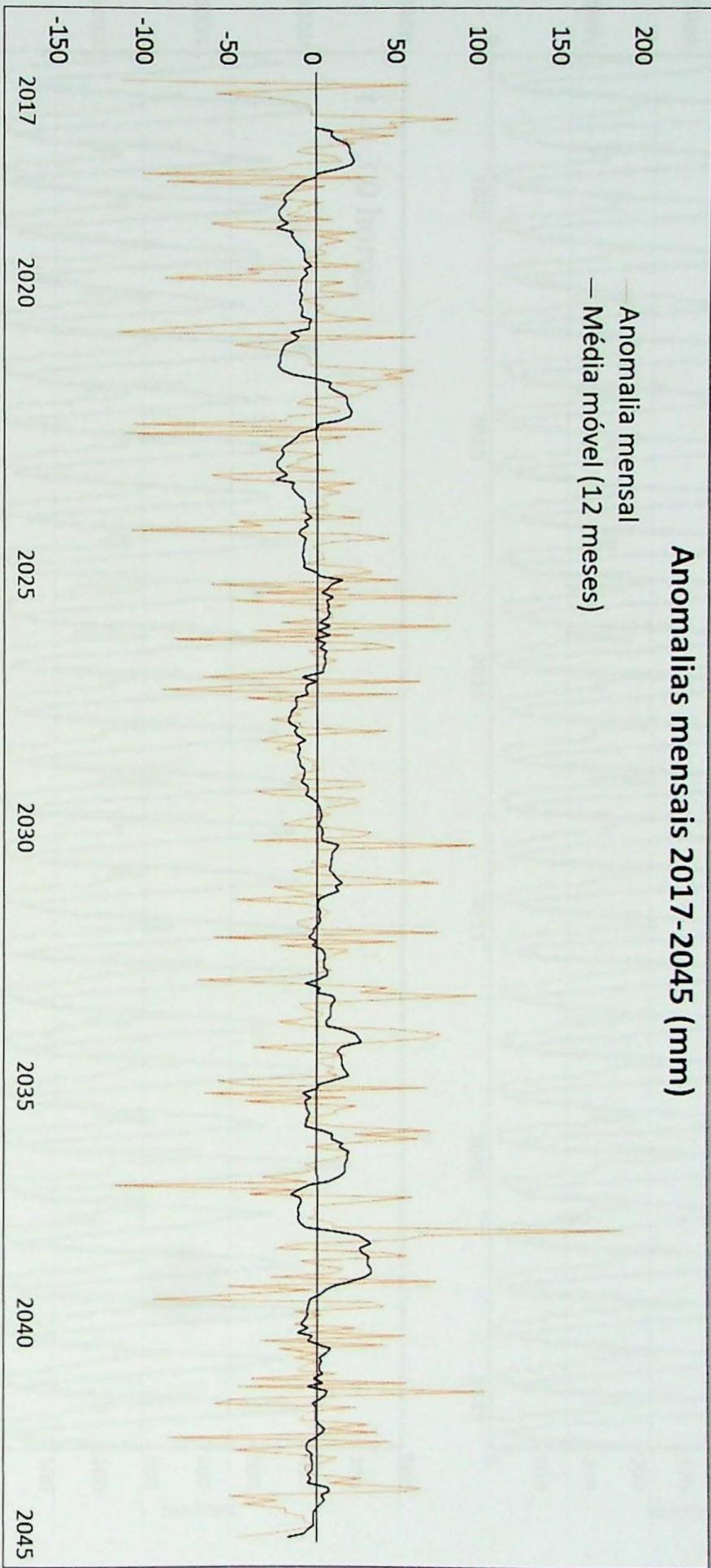


Figura 22. Anomalias de precipitação para cada mês do período 2017-2045 e média móvel de 12 meses (linha preta).

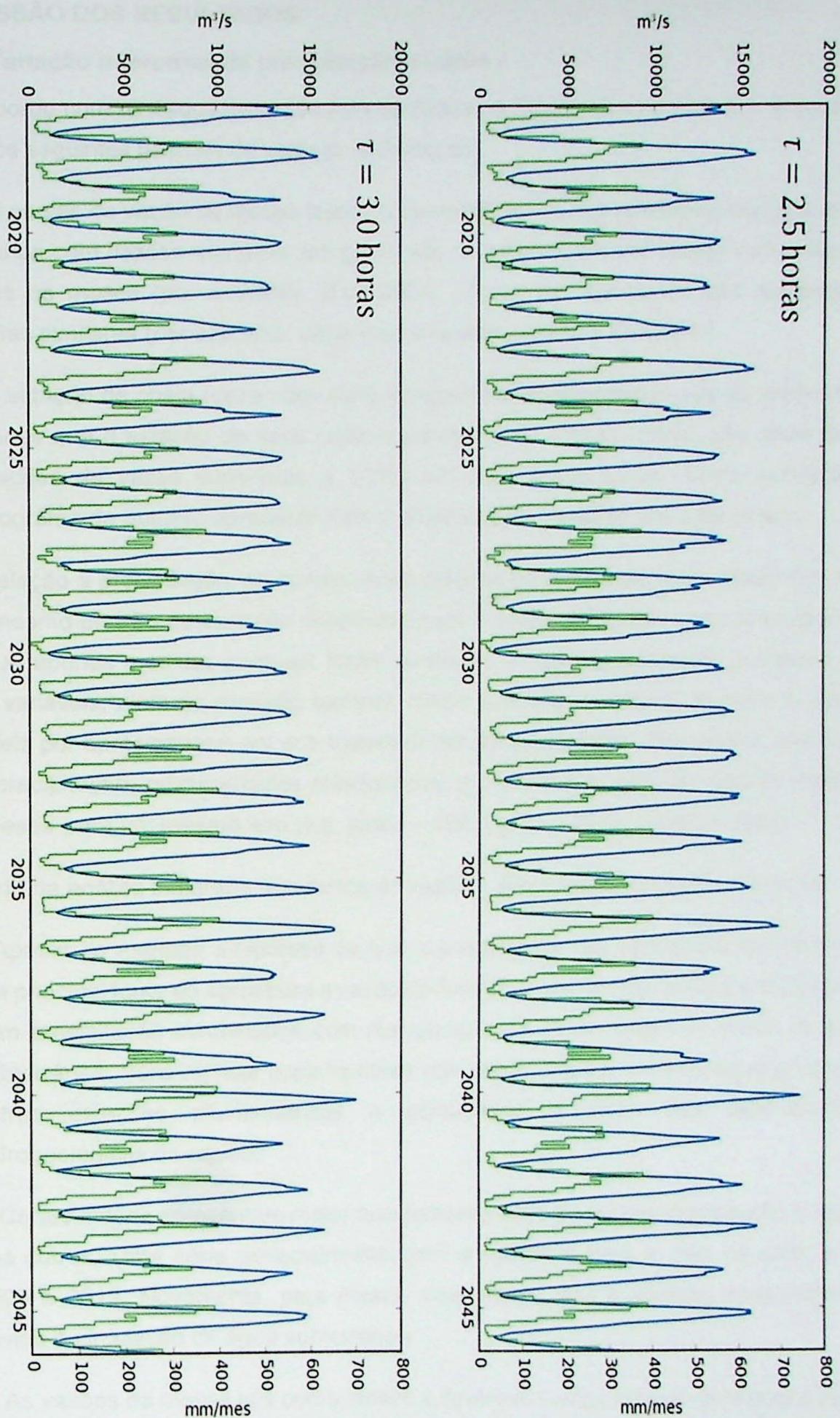


Figura 23. Projeções para a vazão do Rio Xingu em Altamira (curva azul) baseada na projeção de precipitação (curva verde) para o modelo hidrológico com  $\tau = 2.5$  e 3.0 horas.

## **6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **6.1. Variação interanual de precipitação e vazão**

De acordo com os dados de vazão apresentados na Figura 15 e no Anexo A, é possível observar os seguintes padrões de variação hidrológica:

- i. As curvas de vazão de meses distintos de determinado ano apresentam relação entre si. Anos com vazões menores, em geral, são caracterizados por vazões reduzidas em todos os meses (por exemplo, 2002-2003). Meses da mesma estação apresentam vazões similares (por exemplo, dezembro e janeiro; agosto e setembro);
- ii. A estação de cheia (dezembro-abril) apresenta variações interanuais de vazão mais bruscas que a estação de seca (julho-novembro). Na estação cheia, são observadas variações de vazão superiores a 100% em anos consecutivos. Como exemplo, o hidrograma de outubro apresenta menor amplitude de variação que o de janeiro;

Em relação à precipitação, as curvas pluviométricas de alguns períodos aparecem não seguir o mesmo padrão de variação observado para a vazão. Isto pode estar associado ao fato de que apenas medidas pontuais foram avaliadas e que a precipitação é afetada por inúmeras variáveis, além da variação sazonal. Como exemplo, os meses de junho a agosto são notáveis por apresentarem em sua maioria 0 mm de precipitação. No entanto, eventuais picos de precipitação, possivelmente relacionados a precipitação pontual, não se repetem nesses meses para um mesmo ano (e.g. junho – 1997; julho – 2004; agosto – 1993).

A partir da análise integrada dos dados de vazão e precipitação, pode-se interpretar:

- i. Apesar de mantida a hipótese de que a precipitação nas cabeceiras do Rio Xingu é a principal fonte de água para a vazão do Rio Xingu em Altamira, períodos recorrentes sem precipitação combinados com manutenção da vazão sugerem aporte de água subterrânea. Para verificar essa hipótese com maior detalhe, será necessário estudar outras estações pluviométricas e contabilizar o efeito das características hidrogeológicas da região;
- ii. Certos meses apresentam maior acoplamento entre as curvas precipitação e vazão que outros. Uma série especialmente bem acoplada é para o mês de abril, entre 1999 e 2012. Novamente, para meses mais secos, isso é inválido, possivelmente devido à circulação de água subterrânea;
- iii. As vazões de meses tais como janeiro e fevereiro comportam-se de maneira mais similar às curvas de precipitação do mês anterior (dezembro e janeiro, respectivamente);

As séries históricas de precipitação e vazão são importantes para se avaliar efeitos climáticos de grande escala. Contudo, pode não ser adequado estabelecer relações de causa e efeito entre as variáveis precipitação e vazão quando a análise é baseada em apenas um posto pluviométrico. Esta representação reforça o fato de que variações na vazão de rios de grande porte como o Xingu possuem outros fatores envolvidos, sendo processos de alta complexidade. É necessária análise estatística entre os dados de vazão e precipitação para avaliação mais robusta dos controles sobre a variação de vazão.

## 6.2. Calibração do modelo numérico

Considerando os valores de tempo característico assumidos para os testes numéricos ( $\tau = 2.5, 3.0$  e  $4.0$  horas), os que melhor representaram os dados de vazão observados foram  $\tau = 2.5$  e  $3.0$  horas, sendo que a diferença entre o valor observado e o simulado nas duas projeções foi semelhante (Tabela III e Figs. 19 e 20).

Para  $\tau = 4.0$  horas, foi observada defasagem dos picos e valores mínimos de vazão entre os dados observados e simulados (Fig. 19, modelo com  $\tau = 4.0$  horas). Isto fica evidente no gráfico da diferença entre os valores observados e simulados (Fig. 20, modelo com  $\tau = 4.0$  horas), em que o erro apresenta caráter periódico com período de aproximadamente um ano.

Mesmo para  $\tau = 2.5$  e  $3.0$  horas, que produziram maior acoplamento com os dados observados, há padrões na vazão que não puderam ser simulados pelo modelo numérico. Na segunda metade da série temporal, é destacado que o modelo numérico foi incapaz de simular os três grandes picos de vazão, com valores superiores a  $20.000\text{ m}^3/\text{s}$ . Uma possível explicação é que neste período há lacunas nos dados observacionais da precipitação em algumas estações, que tiveram que ser preenchidas por valores de meses correspondentes ao ano posterior. No caso de ausência de um ano posterior, utilizou-se o mês correspondente do ano anterior. Outra fonte de incerteza é a representatividade geográfica das cinco estações pluviométricas utilizadas para caracterizar a precipitação e evapotranspiração na bacia do Rio Xingu.

## 6.3. Projeções de precipitação

As Figuras 21 e 22 representam as projeções futuras de precipitação do modelo climático CNRM-CM5 do IPCC, sobre a bacia do Rio Xingu. Pode-se observar (Fig. 21, Anexo B) que a precipitação média na bacia durante o período 2017-2045 poderá ser maior ou menor do que a média histórica observada, a depender do período do ano.

Nos meses da “estação de cheia”, que ocorre geralmente entre os meses de novembro e março, são projetadas precipitações médias mensais menores do que as observadas no período 1976-2014. Nos meses mais chuvosos (dezembro a fevereiro), estima-se que a quantidade de precipitação será em média 14% inferior à média histórica. Por sua vez, nos

meses da “estação de seca”, que ocorre em geral de maio a setembro, estão projetados aumentos de até dez vezes na quantidade média de precipitação (em julho, considerando a média histórica de 2 mm e futura de 19 mm). Tais observações estão em conformidade com trabalhos prévios que preveem, para o leste amazônico, estações chuvosas mais secas e estações secas mais chuvosas (e.g. Coe et al., 2013; Sorribas et al., 2016). No entanto, a magnitude da variação de precipitação do primeiro caso (meses chuvosos mais secos) é consideravelmente maior e afeta a dinâmica fluvial da bacia do Rio Xingu de maneira mais significativa.

Quanto às anomalias de precipitação (Fig. 22, Anexo C), que são calculadas a partir da subtração da projeção de precipitação de um mês da média das projeções para este mesmo mês, são observados desvios positivos e negativos. A média móvel de doze meses, extraída para facilitar a visualização do comportamento dessas anomalias, sugere que há predomínio de anomalias negativas em relação às positivas, em particular nos primeiros 15 anos da projeção. Também ocorrem anomalias positivas, que apresentam as maiores amplitudes da série. No entanto, períodos longos menos (ou mais) chuvosos, como o período mais seco projetado entre 2018 e 2030, podem afetar de forma mais significativa a dinâmica do rio e produção de energia a médio prazo do que apenas um ano de seca ou precipitação extrema.

#### **6.4. Vazão futura do Rio Xingu**

A Figura 23 representa as projeções de vazão para o Rio Xingu em Altamira, principal fator de controle da produção de energia na UHE Belo Monte. A projeção de vazão foi obtida após a calibração do modelo numérico com as séries históricas, utilizando as projeções de precipitação do modelo CNRM-CM5 do CMIP5/IPCC, que é um dos que possui melhor resolução espacial para América do Sul. Isto contribui com o grau de confiabilidade das projeções de vazão.

Pode-se destacar os seguintes aspectos acerca da projeção da vazão do Rio Xingu na área da UHE Belo Monte sob cenário de mudança climática:

- i. As vazões simuladas obtidas tanto para  $\tau = 2.5$  e  $3.0$  horas são similares. Isso ocorre pois ambos os tempos característicos de escoamento demonstraram erros similares durante a etapa de calibração. Sendo assim, a diferença entre as curvas é insignificante e podem ser tratadas como resultado único;
- ii. A amplitude das vazões simuladas é relativamente constante, com a vazão máxima (abril) em torno de  $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , sendo  $18.500 \text{ m}^3/\text{s}$  o maior valor observado, enquanto as vazões mínimas (setembro) são muito similares entre si, ao redor de  $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

iii. A comparação entre a vazão simulada e a vazão histórica do período 1986-2014 (Fig. 24) permite observar que a vazão real se comporta de maneira menos constante do que as vazões simuladas, seja para o passado ou futuro (Figs. 19 e 23). Isso pode estar associado ao fato do modelo hidrológico simular de modo impreciso eventos extremos de cheia e seca.

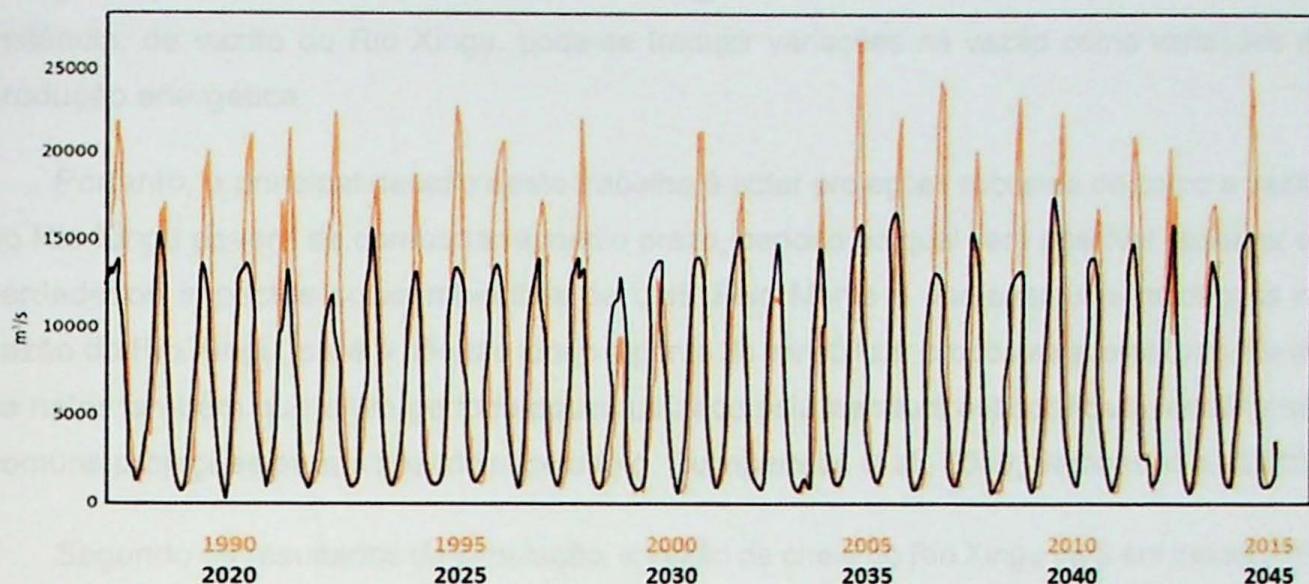


Figura 24. Em laranja, vazão do Rio Xingu em Altamira – PA, entre 1986 e 2014. Em preto, vazões simuladas para o período 2017-2045 para  $\tau = 3.0$  horas.

iv. Considerando a vazão histórica média para o mês de abril no período de 1976 a 2014 de  $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , as vazões simuladas são, em média, 28% inferiores às históricas, com valores entre 10 e 35%. Trata-se de valor significativamente menor, porém condizente com as projeções climáticas da literatura abordada neste trabalho (e.g. Stickler et al., 2013).

v. A maior vazão simulada para o futuro, de aproximadamente  $18.500 \text{ m}^3/\text{s}$ , ainda é menor que a média histórica, de aproximadamente  $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para comparação, nos últimos 40 anos, tal vazão foi superada 23 vezes. Isso está indicado na Figura 25, onde se observam inúmeros picos em laranja superiores ao maior dos picos em preto. Por sua vez, as menores vazões futuras simuladas para abril, que variaram de  $12.000$  a  $13.000 \text{ m}^3/\text{s}$  e são observadas múltiplas vezes na simulação, ocorreram raramente nas últimas décadas (apenas em 1998, 1999 e 2002), como indicado na Figura 25 pelos picos em preto superiores aos picos em laranja.

## **6.5. Produção de energia na UHE Belo Monte sob cenário de mudança climática e seus impactos socioeconômicos e ambientais**

O fornecimento de estimativas da energia potencialmente gerada pela UHE Belo Monte nos próximos 30 anos, sob cenário de mudança climática, permite avaliar os efeitos socioeconômicos e ambientais dessa projeção. Considerando a equação de geração de energia hidrelétrica, que demonstra que a energia da UHE Belo Monte depende, em última instância, da vazão do Rio Xingu, pode-se traduzir variações na vazão como variações na produção energética.

Portanto, o principal desafio deste trabalho é obter projeções robustas de como a vazão do Rio Xingu deverá se comportar a médio prazo, período no qual será possível observar os verdadeiros impactos socioambientais da UHE Belo Monte e das eventuais mudanças na vazão do Rio Xingu, porém não tão longo a ponto de inviabilizar propostas alternativas. Deve-se notar também que é um período pouco utilizado pela literatura especializada, sendo mais comuns projeções para o final do século (e.g. Guimbeteau et al., 2016; Sorribas et al., 2016).

Segundo os resultados da simulação, a vazão de cheia do Rio Xingu será em média 28% menor que a média histórica. Isto reduzirá potencialmente (em proporção similar) a energia que será gerada pela UHE Belo Monte, estimada em 4.571 MW a partir do registro histórico da vazão. Deve-se atentar para o comprometimento da UHE Belo Monte com o Trecho de Vazão Reduzida do Rio Xingu, em especial às vazões que necessariamente serão destinadas ao TVR (Tabela II). Em anos “B”, por exemplo, 8.000 m<sup>3</sup>/s devem ser destinados ao TVR em abril. Dados os 14.000 m<sup>3</sup>/s médios simulados para abril, apenas 6.000 m<sup>3</sup>/s poderiam contribuir com o reservatório da UHE nesses anos, que poderá comprometer sua operação.

Ressalta-se que as simulações realizadas consideram apenas as projeções de precipitação devido a mudanças climáticas. Quando se consideram também os potenciais efeitos do desmatamento (Figs. 8 e 11) na vazão, pode-se interpretar que, caso as projeções de desmatamento se confirmem, os efeitos negativos na produção de precipitação atuarão como uma forçante negativa na vazão e agravarão as previsões da diminuição de energia produzida.

Deste modo, partindo da afirmação de que UHE Belo Monte terá eficiência energética menor que a prevista no seu projeto inicial, tal como indicado pelas projeções de vazão, pode-se discutir os efeitos deste cenário nos ecossistemas e nas populações diretamente afetadas pela usina.

O primeiro ponto a ser abordado diz respeito à eficiência energética do empreendimento. O custo do MW, considerando um gasto final de R\$ 30 bilhões, passa de R\$ 6,5 milhões para R\$ 9,1 milhões (de 4.571 MW médios para 3.291 MW, redução de 28% assim como na vazão). A produção energética da UHE Belo Monte é o principal argumento pró-hidrelétrica. Em geral, coloca-se Belo Monte como uma das energias mais baratas (Fig. 25) em estudos de Custo Nivelado de Energia (e.g. Corrêa da Silva et al., 2016; de Jong et al., 2015). Com os resultados deste trabalho, no entanto, até mesmo a economicidade da obra é discutível e deve ser revista.

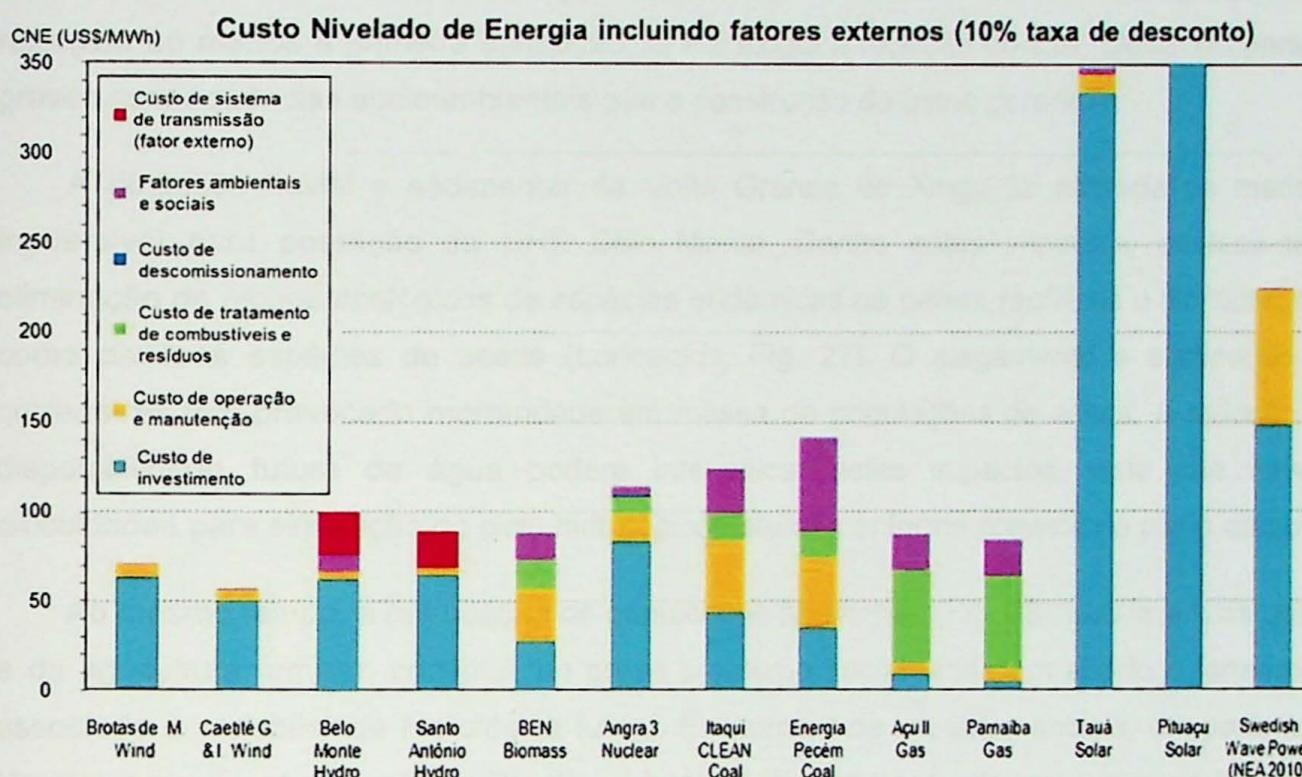


Figura 25. Custo Nivelado de Energia para distintas formas de geração de energia, considerando uma taxa de desconto de 10%. A UHE Belo Monte é a terceira coluna da esquerda para a direita. Fonte: de Jong et al. (2015), adaptada.

Observa-se na Figura 25 que a energia gerada pela UHE Belo Monte possui custo comparável a outras formas de energia, incluindo termelétricas a gás natural (Parnaíba Gas, quarta coluna da direita para a esquerda). No entanto, os resultados deste trabalho sugerem que este valor deverá aumentar sob cenário de mudança climática, tornando a usina menos competitiva em relação a outras energias, que podem vir a se tornar mais viáveis nas próximas décadas. Dentre possíveis alternativas, podem-se citar as reservas de gás natural da Bacia do Parnaíba, que se situam próximas à região de Belo Monte, compartilhando a localização dos principais polos consumidores da energia gerada pela hidrelétrica, além da energia eólica, considerada a alternativa mais barata, após os devidos cálculos de custos externos e de transmissão (de Jong et al., 2015).

Outros aspectos de grande relevância acerca da operação da UHE Belo Monte sob cenário de mudança climática e redução da vazão do Rio Xingu dizem respeito aos enormes impactos ambientais e sociais decorrentes da construção da usina e barramento e alteração do regime hidrológico do Rio Xingu (Fig. 26). Em 2009, foi organizado um Painel de Especialistas (PE; Santos et al., 2009) composto por dezenas de pesquisadores de universidades brasileiras e estrangeiras, apresentando uma análise crítica do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) realizado para obtenção da licença de execução do empreendimento. A conclusão, se resumida, é de que os benefícios econômicos da UHE Belo Monte são superestimados e seus impactos, subestimados. Os resultados aqui apresentados reforçam ao menos a primeira afirmação. O PE exigia a rejeição do EIA, alertando para as graves consequências socioambientais que a construção da usina geraria.

A dinâmica fluvial e sedimentar da Volta Grande do Xingu foi alterada de maneira irreversível para operação da UHE Belo Monte. Dentre estes impactos, destaca-se a eliminação de nichos ecológicos de espécies endêmicas de peixes reofílicos e litofílicos, tais como diversas espécies de acaris (*Loricariids*, Fig. 27). O alagamento e eliminação de corredeiras tem provocado mortandade em massa de populações de acaris. A redução da disponibilidade futura de água poderá intensificar estes impactos, visto que haverá dificuldades para simulação do ciclo hidrológico natural, conforme previsto no plano da obra.

Ao mesmo tempo, a realocação de populações ribeirinhas (Fig. 28), que vivem da pesca e da agricultura familiar, constitui um grave problema social ainda em aberto e fortemente associado à variabilidade hidrológica futura. Em termos de impactos sociais, um parâmetro tão relevante quanto a vazão do Rio Xingu é seu nível. Considerando que o nível do Rio Xingu é diretamente proporcional à sua vazão, os resultados deste trabalho sugerem que, com a diminuição da vazão, o nível do rio diminuiria, expondo áreas às suas margens. Apesar de aumentar a disponibilidade territorial, a suscetibilidade de tais áreas às cheias e à erosão é um fator de risco. No entanto, tal discussão depende de como ocorrerá a manutenção do nível do reservatório da hidrelétrica nas próximas décadas, que é distinto do nível natural.



Figura 26. Áreas do Rio Xingu alagadas pela Barragem de Pimental. Nessa região, ocorrem inúmeras ilhas vegetadas ao longo do rio. O alagamento causou a morte de grande parte da vegetação. Foto: Marcelo Camargo.



Figura 27. Acari-amarelinho (*Baryancistrus xanthellus*), peixe endêmico da bacia do Rio Xingu e com grande importância econômica pesqueira na região da Volta Grande do Xingu. Esta espécie litofílica se alimenta do perifiton aderido às rochas. A mudança na dinâmica flúvio-sedimentar provocou deposição de sedimentos finos sobre os pedrais e impediu o desenvolvimento de perifiton, levando-os à mortandade em massa por enfraquecimento e infecções por parasitas, como ilustrado. Foto: Rodolfo Salm.



Figura 28. Moradia de ribeirinhos demolida para desapropriação pela Norte Energia S.A. Foto: Rodolfo Salm.

Geralmente, argumenta-se que as vantagens da UHE Belo Monte vão muito além de suas desvantagens, visto que se estima produção energética suficiente para o abastecimento de 60 milhões de brasileiros (Norte Energia, 2016), às custas de algumas centenas ou milhares de pessoas impactadas, em uma área relativamente reduzida em relação ao País. Tal energia, contudo, será predominantemente destinada a atuais e futuros complexos industriais na Amazônia, com destaque à indústria do alumínio (Fearnside, 2016a). Sendo assim, é imperativo reforçar que, mesmo dos pontos de vista energético e econômico, a UHE Belo Monte estará abaixo do previsto se as projeções de mudança climática se confirmarem, podendo ser progressivamente menos eficiente nas próximas décadas. Deste modo, a justificativa dos impactos ambientais e sociais decorrentes da construção e operação da usina com base no argumento energético torna-se inválida.

Deve-se destacar que as incertezas acerca da viabilidade econômica-energética da UHE Belo Monte nas próximas décadas são suficientes para questionar a continuidade da expansão hidrelétrica no Amazônia, com destaque para os rios do leste da Amazônia, como os rios Tapajós, Xingu e Tocantins. No caso do Rio Xingu, poderia ser aventado novas barragens a montante da UHE Belo Monte para aumentar a retenção de água durante determinados períodos, para liberação durante a seca, fazendo com que a UHE Belo Monte opere por um período mais longo durante o ano. No entanto, há a Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (n° 6, 03/07/2008), que em seu segundo artigo explicita que “*o potencial hidroenergético a ser explorado será somente aquele situado no Rio Xingu, entre*

*a sede urbana do Município de Altamira e a sua foz". Assim, a UHE Belo Monte deve ser a única hidrelétrica a existir no Rio Xingu. Contudo, há incerteza sobre a força dessa resolução e sua manutenção a médio prazo perante a pressão de determinados círculos interessados na expansão hidrelétrica.*

Finalmente, outro argumento comumente usado na defesa da hidreletricidade está no fato de ela ser historicamente considerada forma de energia limpa, com baixa emissão de carbono. Contudo, o potencial dos reservatórios hidrelétricos na geração e emissão de Gases do Efeito Estufa (GEEs) ainda não é totalmente compreendido (e.g. Fearnside, 2002; Fearnside, 2005c; Faria et al., 2015; Rocha-Lessa et al., 2015), sendo motivo de grande debate e tornando o argumento de energia limpa discutível.

## 7. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho dizem respeito à capacidade do modelo hidrológico de simular vazões históricas e aos resultados das projeções de vazão para o período 2017-2045, além de suas consequências, e estão dispostas a seguir:

- i. O modelo hidrológico de Sacek (2011) apresentou-se válido ao representar de maneira consideravelmente precisa as vazões entre 1996-2006. Destaca-se a simplicidade desse modelo quando comparado a outros mais amplamente utilizados (e.g. Engel et al., 1993; Paiva et al., 2003);
- ii. A extração das projeções de médias e anomalias de precipitação do modelo CNRM-CM5 para o período 2017-2045 demonstrou resultados compatíveis com a literatura (e.g. Duffy et al., 2015), especialmente ao projetar menor precipitação no leste amazônico nos próximos 30 anos, em relação à precipitação histórica;
- iii. Para o período 2017-2045, foram simuladas vazões máximas anuais entre 12.000 e 16.000 m<sup>3</sup>/s para o Rio Xingu em Altamira - PA. Tais valores são em média 28% inferiores à vazão histórica, cujos picos nos últimos quarenta anos variaram de 10.000 a 30.000 m<sup>3</sup>/s, com média de 20.000 m<sup>3</sup>/s;
- iv. A geração de energia pela UHE Belo Monte poderá decrescer em proporção similar à da vazão simulada (28%), dada a dependência da geração de energia hidrelétrica à vazão e ao nível do reservatório, que também possui íntima relação com a vazão;
- v. As implicações de um cenário de menor vazão futura no Rio Xingu e consequente redução da geração de energia pela UHE Belo Monte incluem desde impactos na segurança energética nacional, no custo de energia e na viabilidade do empreendimento até riscos à manutenção da vazão mínima no Trecho de Vazão Reduzida, ampliando os já expressivos impactos ambientais e sociais;

vi. Recomendações para etapas futuras deste trabalho envolvem a utilização de outros modelos climáticos do CMIP5, o refinamento da simulação hidrológica e a análise mais detalhada dos impactos econômicos e socioambientais da UHE Belo Monte. Além disto, destaca-se a implicação do cenário futuro de menor geração de energia e a discussão de alternativas à energia hidrelétrica, com base na comparação com outras formas de geração de energia.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amante, C., B.W. Eakins (2009). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*. National Geophysical Data Center, NOAA.
- Braun, J., Sambridge, M. (1997). Modelling landscape evolution on geological time scales: A new method based on irregular spatial discretization. *Basin Research*, 9, 27–52.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Liebmann, B. (2004). The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88-108.
- Coe, M. T., Costa, M. H., Soares-Filho, B.S. (2009). The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River—Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1-2), 165–174.
- Coe, M.T. et al. (2013). Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of the south-southeastern Amazonia. *Phil Trans R Soc B*, 368, 20120155.
- Corrêa da Silva, R., Neto, I. M., Seifert, S. S. (2016). Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 328-341.
- de Jong, P., Kiperstok A., Torres E.A. (2015). Economic and environmental analysis of electricity generation technologies in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 725–739.
- Dias, L. C. P., Macedo, M. N., Costa, M. H., Coe, M. T., Neill, C. (2015). Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *J. Hydrology: Regional Studies*, 4 (B), 108-122.
- Duffy, P. B., Brando, P., Asner, G. P., Field, C. B. (2015). Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. *Proceedings of The National Academy of Sciences*, 112 (43), 13172–13177.

Eletrobrás (2009). Relatório de Impacto Ambiental – Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte. Governo Federal, Brasília – DF.

Engel, B. A., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Rewerts, C., Brown, S. J. (1993). Nonpoint-source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS). *Water Sci. Tech.*, 28(3-5), 685-690.

Faria, F. A., Jaramillo, P., Sawakuchi, H. O., Richey, J. E., Barros, N. (2015). Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124019.

Fearnside, P. M. (2002). Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil Tucurui Dam) and the energy policy implications. *Water Air Soil Pollution*, 133, 69–96.

Fearnside, P. M. (2005c). Hidrelétricas planejadas no rio Xingu como fontes de gases do efeito estufa: Belo Monte (Kararaô) e Altamira (Babaquara). In: Sevá Filho, A. O. (Ed.). *Tenotâmō: alertas sobre as consequências dos projetos hidrelétricos no Rio Xingu, Pará, Brasil*. São Paulo: International Rivers Network, p.204-241.

Fearnside, P. M. (2016a). Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. *World Development*, 77, 48-65.

Fearnside, P. M. (2016b). Tropical dams: to build or not to build? *Science*, 351 (6272), 456-457.

Fisch, G., Marengo, J. A., Nobre, C. A. (1996) Clima da Amazônia. Boletim do Climanálise Especial – Comemoração dos 10 anos. <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a>>. Acesso em: 22/07/2016.

Garcia-Castellanos, D. (2002). Interplay between lithospheric flexure and river transport in foreland basins. *Basin Research*, 14(2), 89-104.

Guimbarteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., et al. (2016). Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 430.

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pachauri, R. K., Meyer, L. A. (eds.). IPCC, Geneva, Suíça. <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>>. Acesso em 22/02/2016.

Malhi, Y., Roberts, J. T., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W., Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860), 169-172.

Marengo, J. A., Nobre, C. A. (2009). Clima da Região Amazônica. In: Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G., Dias, M. A. (Org.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo, Oficina de Textos, 197-212.

Ministério do Planejamento, Governo Federal (2016). 10 Maiores obras do PAC 2. Disponível em <<http://www.pac.gov.br/i/f1e1c8ab>>. Acessado em 22/10/2016.

MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2010). Cálculo da Garantia Física da UHE Belo Monte. Estudos para a Licitação da Expansão da Geração. Brasília, 1-32.

MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2015). Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Brasília, 1-447.

MME (Ministério de Minas e Energia), EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2016). Balanço Energético Nacional 2016, Relatório Síntese, Ano base 2015. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br>>. Acessado em 18/10/2016.

Nijssen, B., O'Donnell, G. M., Lettenmaier, D. P., Lohmann, D., Wood, E. F. (2001). Predicting the discharge of global rivers. *J. Climate*, 14, 3307-3323.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), NWS (National Weather Service). Tropical Weather. <[http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tropics\\_intro.html](http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tropics_intro.html)>.

Norte Energia S.A. (2016). UHE Belo Monte. <<http://norteenergiasa.com.br/revista/>>. Acessado em 20/10/2016.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (2015). Geração termelétrica fora da ordem de mérito de custo. Disponível em <[http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/sintese\\_gerencial/geracao\\_termeletrica](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/sintese_gerencial/geracao_termeletrica)>. Acessado em 25/10/2016.

Paiva, R. C. D., Buarque, D.C., Collischonn, W. et al. (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, 49(3), 1226-1243.

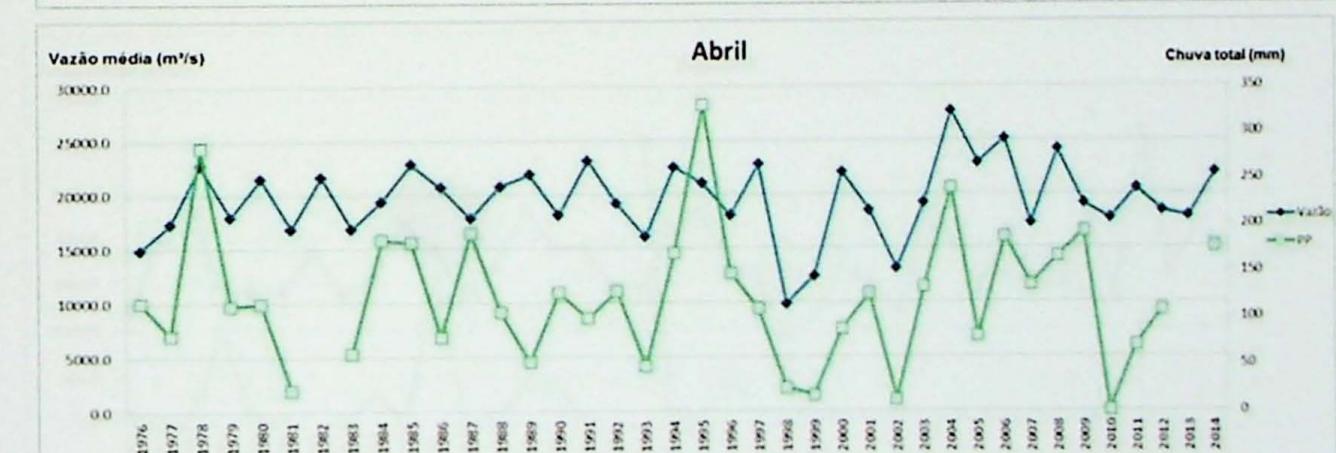
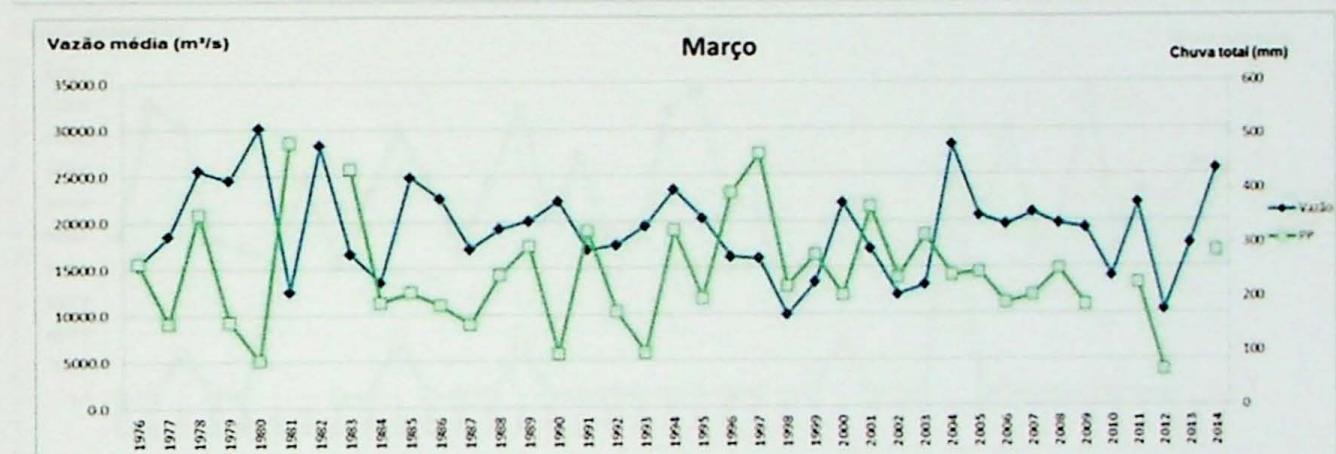
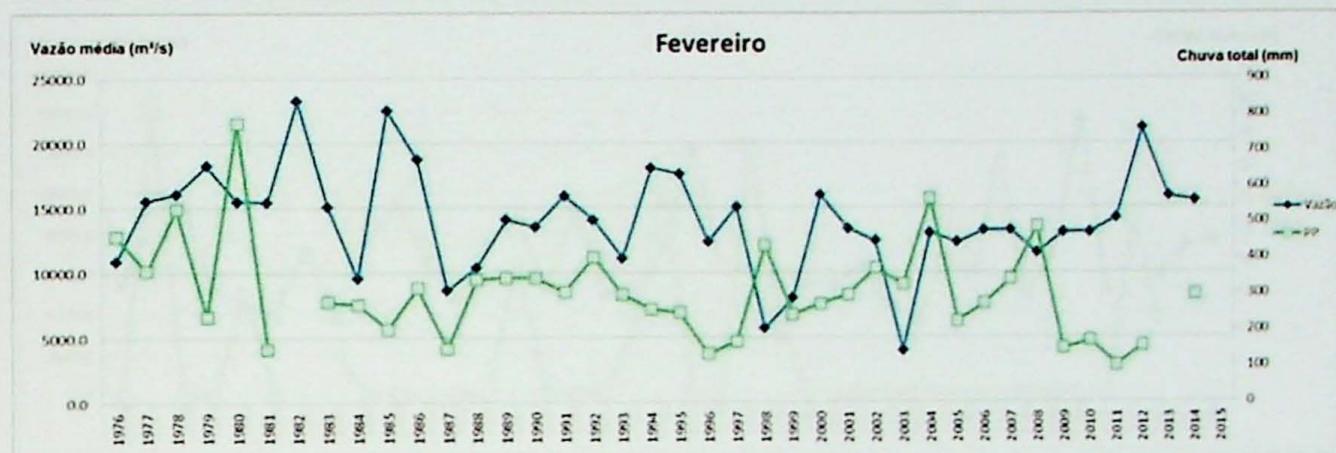
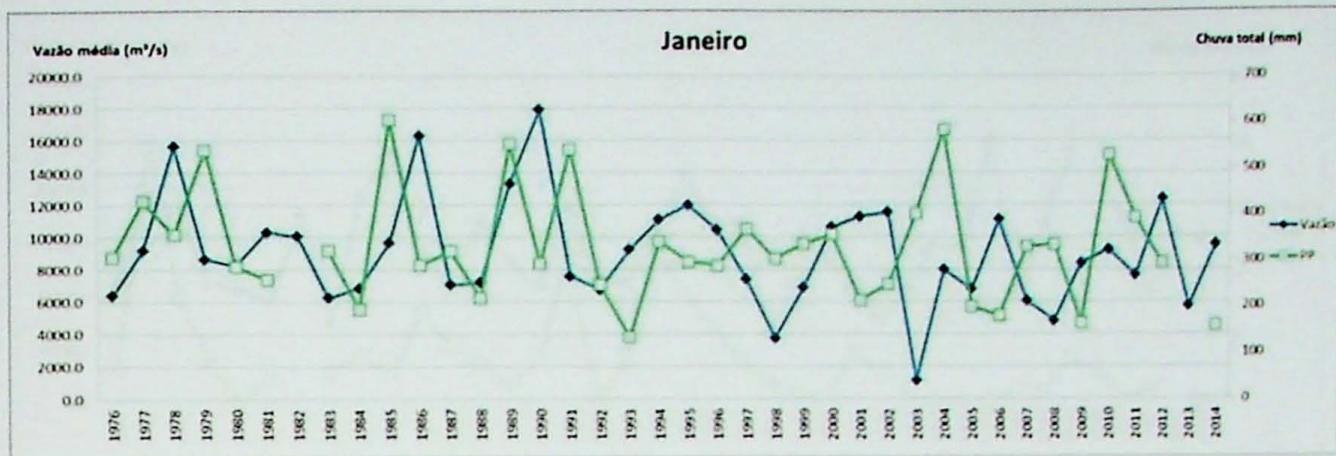
PBMC (2014). Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1-464.

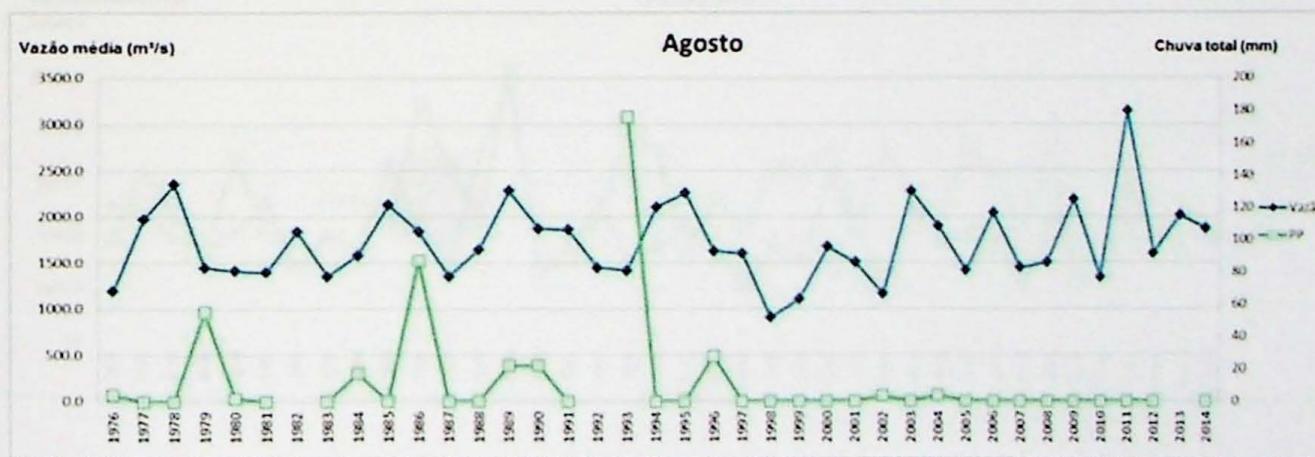
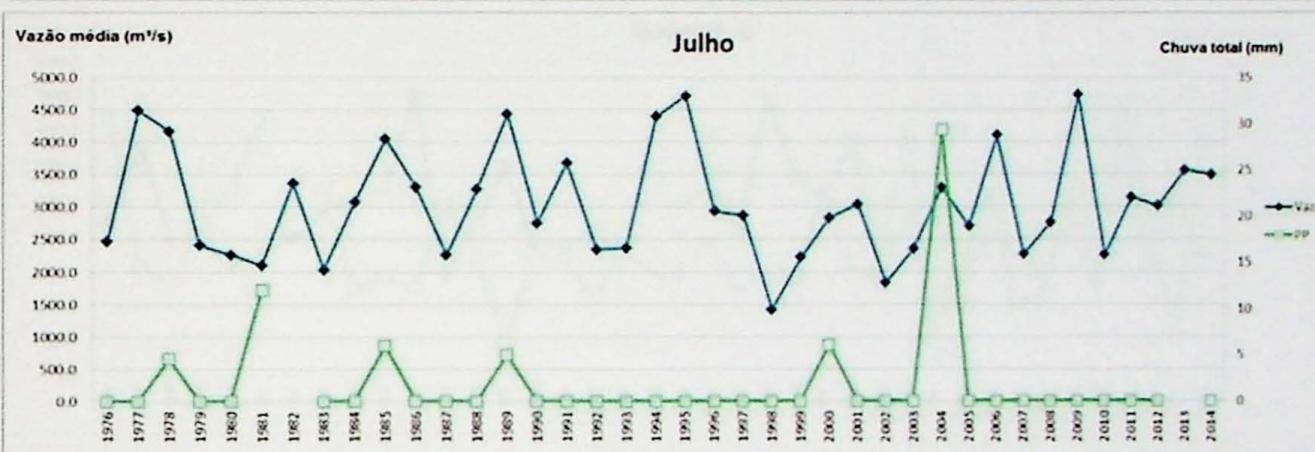
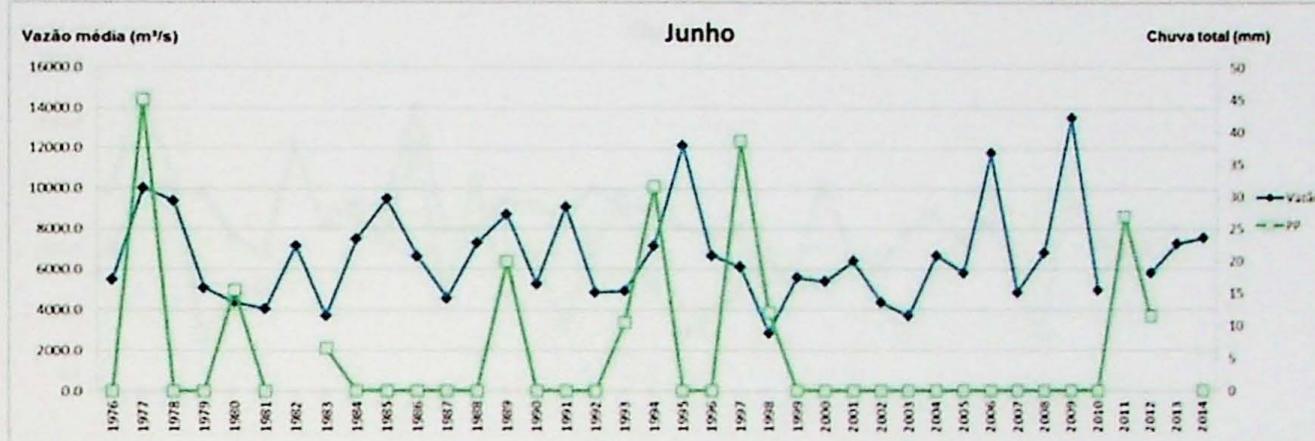
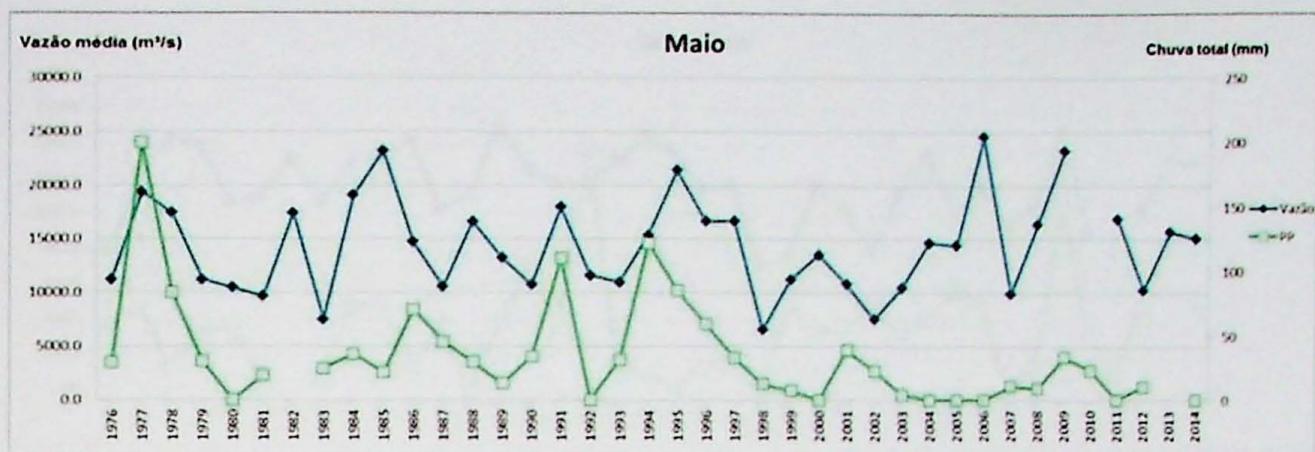
Potter, C., Zhang, P., Klooster, S., Genovese, V., Shekhar, S., Kumar, V. (2004). Understanding controls on historical river discharge in the world's largest drainage basins. *Earth Interactions*, 8, 1-21.

- Rocha Lessa, A. C., Santos, M. A., Maddock, J. E. L., Bezerra, C. S. (2015). Emissions of greenhouse gases in terrestrial áreas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: The case of Belo Monte hydroelectric plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1729-1736.
- Sacek, V. (2011). Modelagem numérica conjunta de processos sedimentares e tectônicos em bacias sedimentares. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 186 pp.
- Sacek, V. (2014). Drainage reversal of the Amazon River due to the coupling of surface and lithospheric processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 301-312.
- Santos, S. M., Hernandez, F. M. et al. (2009). Painel de Especialistas: Análise Crítica do Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte, 1-230.
- Schneider, T., Bischoff, T., Haug, G. H. (2014). Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513 (7516), 45-53.
- Silva, G. A. M., Mendes, D. (2015). Refinement of the daily precipitation simulated by the CMIP5 models over the north of the Northeast of Brazil. *Frontiers in Env. Science*, 3.
- Soares-Filho, B.S. et al. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440 (7083), 520–523.
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D. et al. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136, 555-570.
- Stahle, D. W., Fye, F. K., Cook, E. R., Griffin, R. D. (2007). Tree-ring reconstructed megadroughts over North America since AD 1300. *Climatic Change*, 83 (1-2), 133-149.
- Stickler, C. M., Coe, M. T., Costa, M. H., Nepstad, D. C., McGrath, D. G., Dias, L., Rodrigues, H. O., Soares-Filho, B. S. (2013). Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110 (23), 9601-9606.
- Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M. et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109:5
- Winemiller, K.O., et al. (2016). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. *Science*, 351 (6269), 128-129.
- Zhou, J., Lau, K. M. (1998). Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate*, 11(5), 1020-1040.

# **ANEXO A**

## **SÉRIES HISTÓRICAS DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO**







**ANEXO B**

**TABELA DE PRECIPITAÇÕES MENSAIS MÉDIAS PARA O**

**PERÍODO 2017-2045**

## Precipitação média (mm/dia)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2017	5.59393	10.4459	7.16488	3.8476	1.88766	0.65881	0.50776	0.6981	1.53123	5.84656	8.44922	11.9817
2018	9.50537	10.148	8.30552	6.55107	2.4626	0.61316	0.99969	1.28763	1.08542	2.44747	3.65812	11.6074
2019	6.46379	8.79238	7.49173	5.10957	1.63291	1.09278	0.30415	0.47568	1.03093	3.39216	4.97487	8.8405
2020	10.1538	8.62372	8.32906	5.86378	2.78524	1.19942	0.47192	0.55393	2.47303	1.69924	5.94643	7.42927
2021	9.91359	8.6911	7.85226	6.63763	2.4954	0.90756	0.81232	0.7967	1.9494	4.18278	5.60735	7.29041
2022	5.53296	10.5597	7.19007	4.18812	1.95533	0.69282	0.51751	0.65864	1.49823	5.00454	8.3364	12.0766
2023	9.69768	9.81141	8.74702	6.59676	2.54349	0.62115	1.01649	1.25891	1.08466	2.44655	3.48071	11.7025
2024	5.62562	9.20638	7.49173	5.10957	1.63291	1.09278	0.30415	0.47568	1.03093	3.39216	4.97487	8.8405
2025	10.1538	8.62372	8.27667	5.94539	2.84861	1.23313	0.50835	0.52183	2.4907	1.5275	5.99566	6.81896
2026	10.0358	10.0361	8.0859	5.71841	2.77806	1.12102	0.78903	0.57911	2.41199	4.16715	7.26721	12.011
2027	7.30151	9.27046	6.58429	8.57561	1.12128	1.57609	0.55661	1.11013	1.92774	2.36258	9.70245	9.17462
2028	10.1174	5.81854	8.90583	7.34398	2.61231	0.95202	1.045	0.92745	1.31269	2.43789	4.80714	12.4698
2029	8.03336	5.61368	9.41436	4.40012	2.72144	0.93109	0.13019	0.49963	0.73099	2.74785	6.71752	11.7828
2030	8.74516	7.53156	7.45881	4.98557	2.34284	0.69435	0.63156	0.73182	1.67909	2.75936	6.5403	11.2768
2031	10.3436	7.41581	6.92757	6.56494	3.58812	1.21258	0.77341	1.05732	1.27113	2.40551	7.28103	11.4982
2032	10.2315	7.36167	10.9503	5.80139	2.78388	1.04593	0.54142	1.06477	1.14757	3.01281	8.20381	12.8219
2033	8.53139	8.28873	7.99488	4.181	2.55979	1.06735	0.90023	0.92811	1.2474	2.70214	6.96777	12.8404
2034	7.38285	10.2051	7.03572	6.44081	3.11765	1.2292	0.62578	0.888873	1.94127	2.82745	4.72384	9.91056
2035	10.7851	9.46894	10.9891	6.84631	2.41759	0.79345	0.78832	0.87056	0.87757	2.99907	8.56987	12.8785
2036	11.584	9.90159	6.56223	5.65435	3.35725	1.00696	0.67159	1.15151	1.83438	3.52929	5.10534	8.98761
2037	11.5801	6.43655	8.40944	4.38102	3.54875	1.35018	1.01781	0.58784	1.55923	3.45422	9.30837	11.1457
2038	11.4204	9.05423	7.61638	6.51143	3.29533	1.30253	0.43158	0.84114	1.42336	1.9943	6.90109	6.4936
2039	9.03379	7.3028	9.73815	6.72321	2.78738	0.95121	0.68571	0.64856	1.98767	3.4064	13.1394	12.5597
2040	11.1166	8.40517	7.00583	7.14823	4.56906	0.68555	0.6635	1.34835	1.98996	2.17478	9.45099	8.6753
2041	9.30702	7.09047	4.61507	6.92882	4.11884	0.57793	0.77692	0.64399	1.21739	3.8725	6.9053	12.2057
2042	8.28	10.0255	7.07148	5.90087	2.32687	1.08277	0.43927	0.45852	2.06651	1.81579	8.86804	8.87102
2043	12.746	9.43784	6.18548	3.81692	3.56734	0.87889	0.39761	0.52603	2.69897	3.18413	8.27073	7.51882
2044	10.9067	8.8674	6.17253	5.31325	3.18441	1.17006	0.44345	0.62237	1.59339	3.99592	7.33355	12.5046
2045	11.1752	6.94247	7.0577	4.35555	2.16775	0.411	0.43144	0.5868	1.67313	2.76963	6.16619	8.86718

## **ANEXO C**

**TABELA DE ANOMALIAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO  
PARA O PERÍODO 2017-2045**

### Anomalias de precipitação (mm/dia)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2017	-3.7612	1.84671	-0.6155	-1.9262	-0.8437	-0.3119	-0.1192	-0.0881	-0.0814	2.79285	1.42668	1.59958
2018	0.15027	1.54881	0.52517	0.77723	-0.2688	-0.3576	0.3727	0.50143	-0.5272	-0.6062	-3.3644	1.22526
2019	-2.8913	0.19318	-0.2886	-0.6643	-1.0985	0.12203	-0.3228	-0.3105	-0.5817	0.33845	-2.0477	-1.5416
2020	0.79874	0.02451	0.54872	0.08995	0.05386	0.22867	-0.1551	-0.2323	0.86041	-1.3545	-1.0761	-2.9529
2021	0.55848	0.0919	0.07192	0.86379	-0.236	-0.0632	0.18532	0.0105	0.33678	1.12907	-1.4152	-3.0917
2022	-3.8222	1.96052	-0.5903	-1.5857	-0.7761	-0.2779	-0.1095	-0.1276	-0.1144	1.95083	1.31386	1.69448
2023	0.34257	1.2122	0.96668	0.82292	-0.1879	-0.3496	0.3895	0.47271	-0.528	-0.6072	-3.5418	1.32036
2024	-3.7295	0.60717	-0.2886	-0.6643	-1.0985	0.12203	-0.3228	-0.3105	-0.5817	0.33845	-2.0477	-1.5416
2025	0.79874	0.02451	0.49633	0.17156	0.11723	0.26238	-0.1186	-0.2644	0.87808	-1.5262	-1.0269	-3.5632
2026	0.68074	1.43694	0.30555	-0.0554	0.04668	0.15027	0.16204	-0.2071	0.79937	1.11343	0.24467	1.62892
2027	-2.0536	0.67125	-1.1961	2.80177	-1.6101	0.60534	-0.0704	0.32393	0.31512	-0.6911	2.67991	-1.2075
2028	0.76228	-2.7807	1.12549	1.57014	-0.1191	-0.0187	0.41801	0.14125	-0.2999	-0.6158	-2.2154	2.08764
2029	-1.3218	-2.9855	1.63401	-1.3737	-0.0099	-0.0397	-0.4968	-0.2866	-0.8816	-0.3059	-0.305	1.40066
2030	-0.61	-1.0676	-0.3215	-0.7883	-0.3885	-0.2764	0.00457	-0.0544	0.06647	-0.2944	-0.4822	0.89466
2031	0.98853	-1.1834	-0.8528	0.7911	0.85674	0.24183	0.14642	0.27112	-0.3415	-0.6482	0.2585	1.11607
2032	0.87639	-1.2375	3.16997	0.02755	0.0525	0.07518	-0.0856	0.27857	-0.465	-0.0409	1.18127	2.43975
2033	-0.8237	-0.3105	0.21454	-1.5928	-0.1716	0.0966	0.27324	0.14191	-0.3652	-0.3516	-0.0548	2.45833
2034	-1.9723	1.60585	-0.7446	0.66698	0.38627	0.25845	-0.0012	0.10253	0.32865	-0.2263	-2.2987	-0.4716
2035	1.42999	0.86973	3.20873	1.07248	-0.3138	-0.1773	0.16133	0.08436	-0.7351	-0.0546	1.54733	2.49638
2036	2.2289	1.30239	-1.2181	-0.1195	0.62587	0.03621	0.0446	0.36531	0.22176	0.47557	-1.9172	-1.3945
2037	2.22497	-2.1627	0.6291	-1.3928	0.81737	0.37943	0.39081	-0.1984	-0.0534	0.4005	2.28583	0.76353
2038	2.06525	0.45502	-0.164	0.7376	0.56394	0.33178	-0.1954	0.05493	-0.1893	-1.0594	-0.1214	-3.8885
2039	-0.3213	-1.2964	1.9578	0.94937	0.056	-0.0195	0.05872	-0.1376	0.37505	0.35268	6.11687	2.17753
2040	1.76152	-0.194	-0.7745	1.37439	1.83768	-0.2852	0.03651	0.56214	0.37734	-0.8789	2.42846	-1.7068
2041	-0.0481	-1.5087	-3.1653	1.15498	1.38746	-0.3928	0.14993	-0.1422	-0.3952	0.81878	-0.1172	1.82353
2042	-1.0751	1.42632	-0.7089	0.12703	-0.4045	0.11202	-0.1877	-0.3277	0.45389	-1.2379	1.84551	-1.5111
2043	3.39084	0.83863	-1.5949	-1.9569	0.83595	-0.0919	-0.2294	-0.2602	1.08635	0.13042	1.24819	-2.8633
2044	1.55163	0.2682	-1.6078	-0.4606	0.45303	0.19931	-0.1835	-0.1638	-0.0192	0.94221	0.31101	2.12253
2045	1.82012	-1.6567	-0.7226	-1.4183	-0.5636	-0.5598	-0.1956	-0.1994	0.06051	-0.2841	-0.8563	-1.5149

DOAÇÃO  
graduação  
160  
Data: 20/03/18

