

VICTOR HUGO BENEZOLI

**EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA DO SOLO NA VAZÃO MÉDIA ANUAL  
NA BACIA DO RIO XINGU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

B465e  
2014 Benezoli, Victor Hugo, 1988-  
Efeito da mudança na cobertura do solo na vazão média  
anual na bacia do rio Xingu / Victor Hugo Benezoli. – Viçosa,  
MG, 2014.  
xiv, 34f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.32-34.

1. Solos - Conservação. 2. Recursos hídricos. 3. Xingu,  
Rio. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em  
Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed.631.586

VICTOR HUGO BENEZOLI

**EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA DO SOLO NA VAZÃO MÉDIA ANUAL NA BACIA DO RIO XINGU**

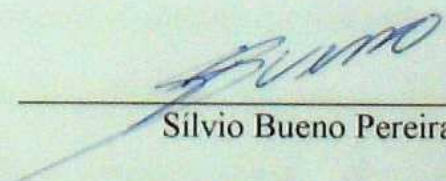
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de outubro de 2014.




---

Paulo José Hamakawa



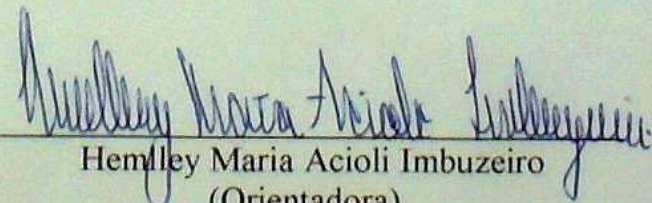
---

Sílvio Bueno Pereira



---

Marcos Heil Costa  
(Coorientador)



---

Hemley Maria Acioli Imbuzeiro  
(Orientadora)

Aos meus pais José Benezoli e  
Eliana Barcelos Benezoli

*“A nossa ciência é parcial, a nossa profecia é imperfeita. Quando chegar o que é perfeito, o imperfeito desaparecerá. Quando eu era criança, falava como criança, pensava como criança, raciocinava como criança. Desde que me tornei homem, eliminei as coisas de criança. Hoje vemos como por um espelho, confusamente; mas então veremos face a face. Hoje conheço em parte; mas então conhecerei totalmente, como eu sou conhecido.”*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me tornar capaz e dar-me suporte em todos os momentos de minha vida, mas sobretudo durante a condução desse estudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola por me dar a oportunidade e por me preparar para ser capaz de desenvolver esse trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores Hemley Maria Acioli Imbuzeiro e Marcos Heil Costa por me orientarem, não só nesse trabalho, como também em quase toda minha vida acadêmica. Se hoje me sinto mais capacitado para ser um bom profissional, com certeza esses mestres são os principais responsáveis.

À minha grande amiga Carla Cristina Camargos, pela amizade, paciência e companheirismo em todos esses anos de convivência.

Aos meus amigos do Grupo de Pesquisa em Interação Atmosfera-Biosfera - Ana Beatriz, Matheus Lucas, Gabriel Abrahão, Gabrielle Pires, Lívia Cristina, Patrícia Porta Nova, Emily Silva, Fabiana Couto, Vítor Fontes, Letícia Braidá, Fernando Pimenta e tantos outros que por lá passaram – e mais recentemente aos meus colegas do grupo Micromet pela disponibilidade em ajudar sempre de maneira incondicional, pelos momentos de lazer (principalmente durante os intervalos para o café e os pró-GABIS) e pela amizade.

Aos meus amigos das repúblicas pela vivência (quase sempre) harmoniosa.

À Minas Gerais e aos mineiros que conquistaram meu carinho e admiração nesses quase oito anos de vivência. Sinto-me hoje parte desse povo.

## **BIOGRAFIA**

VICTOR HUGO BENEZOLI, filho de Eliana Barcelos Benezoli e José Benezoli, nasceu em 03 de agosto de 1988 na cidade de Colatina, no estado do Espírito Santo.

Em março de 2007 ingressou no curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em agosto de 2009 iniciou seu estágio no Grupo de Pesquisa em Interação Atmosfera-Biosfera onde também, em 2010, iniciou sua iniciação científica.

Em novembro de 2012 iniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 MATERIAL E MÉTODOS .....	4
2.1 Descrição da área de estudo .....	4
2.2 Descrição dos dados .....	5
2.2.1 Descrição dos dados climatológicos.....	5
2.2.2 Descrição dos dados de uso do solo .....	6
2.2.3 Descrição dos dados hidrológicos .....	8
2.3 Descrição dos modelos.....	9
2.3.1 Descrição do Modelo de Processos Superficiais InLand .....	9
2.3.2 Descrição do modelo hidrológico THMB .....	11
2.4 Descrição da modelagem numérica.....	13
2.5 Validação dos modelos.....	14
2.6 Análises estatística dos resultados.....	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	16
3.1 Escolha do banco de dados climatológico.....	16
3.2 Validação dos modelos.....	17
3.3 Análise estatística do efeito do desmatamento na vazão anual .....	22
2.1 Comparação dos resultados da bacia do rio Xingu com as bacias do Tocantins e Araguaia .....	28
4 RESUMO E CONCLUSÃO .....	30
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Estações fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Xingu .....	10
<b>Tabela 2</b> - Valores críticos da estatística do método da soma dos desvios cumulativos.....	15
<b>Tabela 3</b> - Tabela-resumo das combinações de banco de dados com os métodos de infiltração de água no solo e captura de água pelas raízes.....	16
<b>Tabela 4</b> – Resultado da análise estatística da comparação entre as combinações. O $R^2$ refere-se ao coeficiente de determinação da regressão linear, $\beta_0$ é o intercepto no eixo das ordenadas e $\beta_1$ é o coeficiente de inclinação da reta. ....	16
<b>Tabela 5</b> - Resultado da comparação entre os bancos de dados utilizando a média de todas as combinações de métodos de infiltração de água no solo e captura de água pelas raízes das plantas.....	17
<b>Tabela 6</b> - Dados estatísticos para validação dos modelos. O coeficiente $\beta_0$ é o intercepto no eixo das ordenadas e o $\beta_1$ é o coeficiente de inclinação da reta. O $R^2$ é o coeficiente de determinação. A diferença média é a diferença percentual entre a média observada e simulada das séries. O MBE (Viés do Erro Médio) e o RMSE (Raíz do Erro Quadrático Médio) estão em $m^3/s$ .....	18
<b>Tabela 7</b> - Teste dos parâmetros $\beta$ para as regressões lineares entre os dados observados e das simulações .....	19
<b>Tabela 8</b> - Resultado do teste dos desvios cumulativos da série com a diferença entre as simulações com e sem desmatamento. O tamanho da amostra $n$ é igual a 50.....	23

**Tabela 9** - Resultado dos estudos dos efeitos da mudança na cobertura vegetal das bacias hidrográficas dos rios Tocantins (COSTA et al., 2003), Araguaia (COE et al., 2011) e Xingu na vazão de longa duração. Na tabela a seguir, a bacia do rio Xingu é representada pelo ponto 18901080, que é o mais próximo da foz. C é o valor do coeficiente de escoamento superficial .....

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Xingu. Destaca-se ainda na figura a distribuição dos biomas brasileiros. ....	4
<b>Figura 2</b> - Normal climatológica do Brasil para a precipitação anual, de 1961 a 1990 produzida pelo INMET. Em destaque está a bacia do Rio Xingu. ....	5
<b>Figura 3</b> - Evolução do desmatamento na bacia hidrográfica do Xingu, adaptado de Leite et al. (2012). ....	7
<b>Figura 4</b> - Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Xingu. ....	9
<b>Figura 5</b> - Histogramas com frequência de erros anuais dividido em classes de 10%. ....	20
<b>Figura 6</b> - Relação entre a área de drenagem e o erro médio. ....	21
<b>Figura 7</b> - Relação entre a área de drenagem e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). ....	21
<b>Figura 8</b> - Gráficos dos desvios cumulativos. Os pontos referentes às estações estão numerados: (a) 18430000; (b) 18470000; (c) 18500000; (d) 18510000; (e) 18514000; (f) 18520000; (g) 18600000; (h) 18650000; (i) 18700000; (j) 18850000; (k) 18901080. ....	24
<b>Figura 9</b> - Relação entre desmatamento médio na área de drenagem no ponto 18901080 e diferença entre as vazões simuladas com e sem desmatamento. Nota-se que a diferença entre as vazões aumenta com o incremento no desmatamento. ....	25

**LISTA DE ABREVIATURAS**

ANA	Agência Nacional de Águas
CRU	Climate Research Unit
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBIS	Integrated Biosphere Simulator
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
InLand	Modelo Integrado de Processos Superficiais
LBA	Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
MBE	Mean Bias Error
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RMSE	Root Mean Square Error
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
THMB	Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry
THRG	Terrestrial Hydrology Research Group

## RESUMO

BENEZOLI, Victor Hugo, M Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2014. **Efeito da mudança na cobertura do solo na vazão média anual na bacia do rio Xingu.** Orientador: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientador: Marcos Heil Costa.

O desmatamento nos biomas Floresta Amazônica e Cerrado no Brasil comprometem a qualidade dos sistemas ambientais, tais como a fauna, a flora e a hidrologia. Diversos estudos mostraram que a substituição da vegetação natural de uma bacia hidrográfica por espécies exóticas ou por monocultivos alteram a vazão de longa duração. Esse trabalho tem como objetivo estudar os efeitos no regime de vazões causado pela alteração na cobertura vegetal natural da bacia hidrográfica do rio Xingu. Para a obtenção de séries longas de vazão, foi utilizado o modelo InLand para simular o balanço de água na superfície e o modelo THMB para o cálculo da vazão. Dois bancos de dados foram testados para serem usados como forçantes climáticas dos modelos, sendo um de base diária e o outro mensal. A validação do modelo foi feita através da comparação entre os dados medidos em estações fluviométricas com os resultados das simulações utilizando regressão linear, erro na vazão de longa duração, viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). Também foram feitos histogramas com frequência do erro mensal do modelo para determinar se o viés é baixo. As simulações abrangeram o período de 1951 a 2000, sendo as séries divididas em duas partes de 15 anos no início e no fim da série (1951 a 1965 e 1986 a 2000, respectivamente). Também foram comparadas as simulações onde havia a presença de desmatamento na bacia e onde a área encontrava-se completamente preservada para verificar se existe diferença significativa entre as séries, em que momento as séries divergem e o comportamento da diferença entre as séries e a evolução do desmatamento. Os resultados mostraram que, em média, a vazão aumentou num intervalo de 20 a 30% para todos os pontos analisados e a precipitação aumentou em menos de 5%, insignificante a 99% de confiança. Além disso, a fração de precipitação que é convertida

em escoamento variou de 0,19 a 0,27 no período de 1951 a 1965, para 0,23 a 0,33, mostrando que houve redução na proporção de conversão da precipitação em evapotranspiração entre os períodos. Também houve diferença significativa ( $p < 0,01$ ) entre as vazões simuladas com e sem presença de desmatamento na bacia, mostrando os valores da série da diferença aumentam com o incremento no desmatamento, sugerindo que o desmatamento cause alteração na vazão de longa duração.

## ABSTRACT

BENEZOLI, Victor Hugo, M Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2014. **Effect of change in land cover on the annual mean discharge of the Xingu River basin.** Adviser: Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-adviser: Marcos Heil Costa.

Deforestation in the Amazon and Cerrado biomes in Brazil compromise the quality of environmental systems, such as fauna, flora and hydrology. Several studies have shown that replacing the natural vegetation of a watershed by exotic species or monocultures alter the stream flow. This work aims to study the effects on the flow regime caused by the change in natural vegetation cover of the Xingu River basin. To obtain long series of flow, the InLand model was used to simulate the water balance at the surface and the THMB model to calculate the flow. Two databases were tested to be used as models of climate forcings, being the first with a daily data, and the second has monthly data. The model validation was performed by comparing the measured data in gauged stations with the simulation results using linear regression error in the stream flow, mean bias (MBE) and root mean square error (RMSE). Histograms with the monthly frequency error model were also made to determine whether the bias is low. The simulations covered the period from 1951 to 2000, the series is divided into two parts of 15 years at the beginning and end of the series (1951-1965 and 1986-2000, respectively). Were also compared simulations where there was the presence of deforestation in the basin and where the area was completely preserved to check for significant differences between the series, in which the time series diverge and the behavior of the difference between the series and the evolution of deforestation. The results showed that, on average, the flow increased in a range of 20 to 30% for all analyzed points and precipitation increased by less than 5%, an insignificant 99% confidence level. Furthermore, the fraction of precipitation which is converted into flow ranged from 0.19 to 0.27 from 1951 to 1965 to 0.23 to 0.33, showing that a reduction in the conversion ratio in the precipitation evapotranspiration between

periods. There was also a significant difference ( $p < 0.01$ ) between the simulated with and without the presence of deforestation in the basin flows, showing the values of the difference series increase with the increase in deforestation, suggesting that deforestation causes changes in stream flow.

## 1 INTRODUÇÃO

A mudança no uso do solo causa alteração no regime hidrológico de uma bacia alterando a partição da precipitação entre o escoamento superficial, drenagem profunda e evapotranspiração (COE; COSTA; SOARES-FILHO, 2009; COSTA; FOLEY, 1997; DAVIDSON et al., 2012; FOLEY et al., 2005).

Diversos trabalhos (BOSCH; HEWLETT, 1982; COE; COSTA; HOWARD, 2008; COE et al., 2011; COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003; SAHIN; HALL, 1996) já demonstraram a relação da mudança na cobertura vegetal com a alteração nas vazões de bacias de micro e mesoescalas sendo que os primeiros trabalhos datam do início do século XX. Neste sentido, ao revisarem 94 experimentos realizados em bacias de pequena escala de várias regiões do mundo, Bosch e Hewlett (1982) concluíram que em todos os casos, houve aumento na vazão média anual com a remoção da cobertura vegetal natural. Além disso, Sahin e Hall (1996) concluíram também que a magnitude do aumento na vazão média anual é dependente da extensão da área alterada, ao estudarem o comportamento das vazões em 145 experimentos.

Sahin e Hall (1996) e Bruijnzeel (1991) sugeriram que as conclusões de Bosch e Hewlett (1982) só poderiam ser reproduzidas para bacias de microescalas. Entretanto, estudos posteriores feitos em bacias de macroescala brasileiras (COE et al., 2011; COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003) indicam que as conclusões encontradas por Bosch e Hewlett (1982) independem da escala considerada.

No Brasil, os biomas Cerrado e Floresta Amazônica são os que se encontram sob maior pressão devido a rápida e intensa alteração na cobertura vegetal natural causada pela grande expansão agrícola sobre essas regiões.

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro ocupando uma área de 2 milhões de km<sup>2</sup> (21% do território nacional). Berço de três importantes aquíferos que abastecem seis das oito grandes bacias hidrográficas brasileiras (Amazônica, Tocantins, Atlântico Norte-Nordeste, do São Francisco, Atlântico Leste e Paraná Paraguai), esse bioma é considerado o segundo bioma brasileiro em número de espécies endêmicas e a mais recente fronteira agrícola do planeta (BORLAUG, 2002). Sua ocupação efetiva se deu após a construção de Brasília, sobretudo na década de 1970, incentivada pelo governo. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2011), em 2010 quase 1 milhão de km<sup>2</sup> do bioma estava desmatado.

A floresta Amazônica é a floresta tropical com maior área conservada do planeta. Sua área abrange 5,5 milhões de km<sup>2</sup> e alcança nove nações, sendo que 60% da sua área encontra-se em território brasileiro. Esse bioma também vem sofrendo com o desmatamento, principalmente pela substituição da floresta por pastagem para a pecuária. Estudos feitos na região Amazônica demonstram que a expansão agrícola ocorre principalmente nas regiões de ocupação pioneira e próximo às principais estradas, com destaque para o estado do Mato Grosso (LEITE et al., 2012).

No contexto histórico do desmatamento, uma das bacias que mais vem sofrendo com a alteração na ocupação do solo é a do rio Xingu, uma das principais sub-bacias do rio Amazonas. No extremo sul da bacia, conhecido como Alto Xingu, a vegetação natural é Cerrado, e o restante ocupado pela floresta Amazônica. A região de cabeceira da bacia no Alto Xingu vem sofrendo com a expansão da pecuária e do plantio da soja. Embora Macedo et al. (2012) tenham mostrado que o desmatamento da região diminuiu no período de 2006 a 2010 em relação a sua média histórica, grande parte da área já se encontra desmatada.

Desta forma, o estudo do comportamento do regime hidrológico nesta região de intensa alteração na cobertura vegetal torna-se uma ferramenta aliada na gestão e no planejamento dos

recursos naturais. Além disso, poucos estudos de macroescala foram realizados em bacias brasileiras. Isto porque não é possível realizar experimentos de remoção total ou mesmo parcial da vegetação e posteriormente avaliar o comportamento da interação biosfera-atmosfera ao longo do tempo.

Nesse contexto, a modelagem torna-se uma ferramenta útil, possibilitando a simulação da vazão anual média em toda a bacia de forma integrada. Desta forma, avaliar o regime hidrológico e os impactos que a conversão de floresta tropical em áreas de pastagem podem vir a ocasionar no clima, no regime hidrológico e na biodiversidade local tornam-se uma tarefa desafiadora e promissora nos cenários de mudanças climáticas.

O objetivo desse trabalho é verificar possíveis efeitos da alteração na cobertura vegetal na vazão anual média da bacia hidrográfica do rio Xingu utilizando a modelagem numérica. Além disso, como objetivos específicos, o trabalho visa verificar o desempenho do modelo hidrológico THMB (Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry) em simular vazões através da comparação dos resultados com dados observados; verificar o desempenho do modelo ao utilizar dados climatológicos de dois bancos de dados distintos, sendo um com dados mensais e outro com dados diários; avaliar, dentre dois métodos de infiltração de água no solo e dois de captura de água pelas raízes das plantas, qual apresenta melhor desempenho em simular escoamento no InLand (Modelo Integrado de Processos Superficiais).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

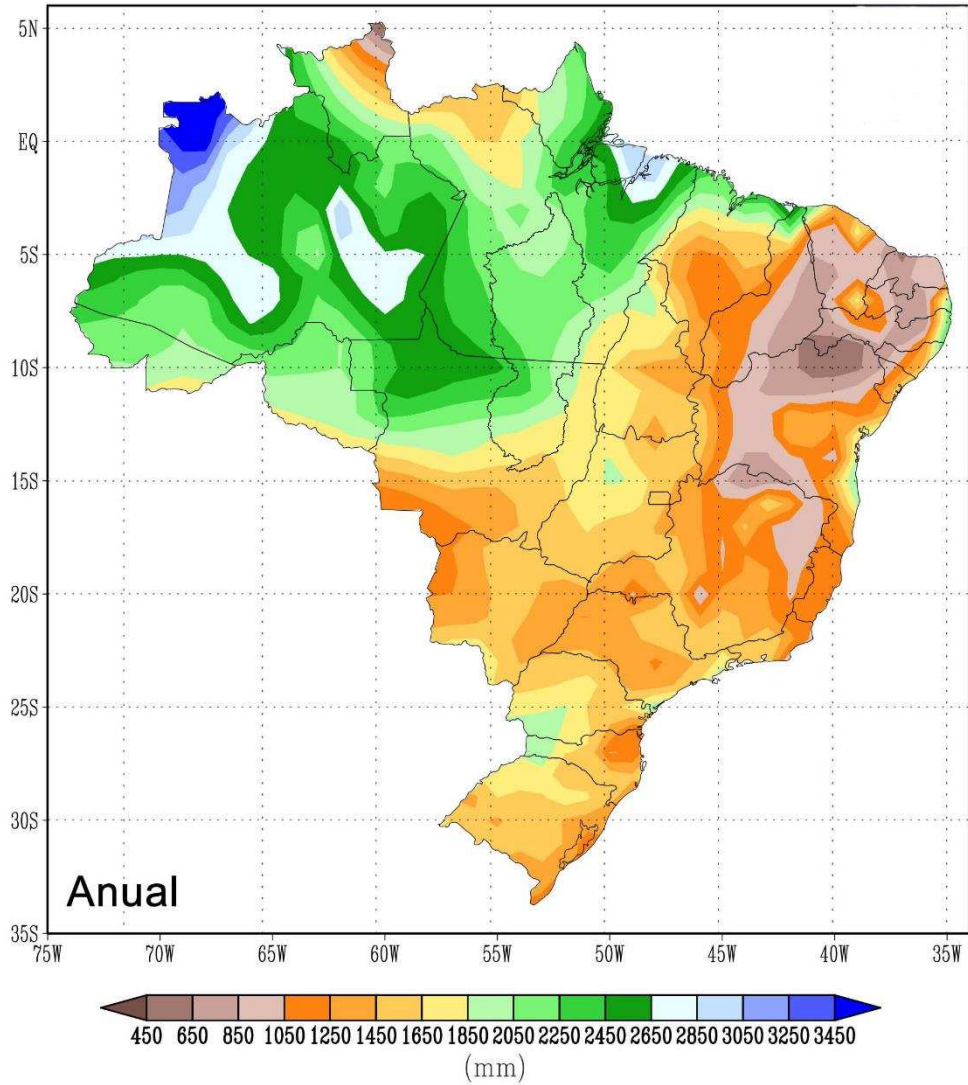
### 2.1 Descrição da área de estudo

A bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo, com uma área de aproximadamente 7 milhões de km<sup>2</sup>. Dentre as sub-bacias Amazônicas, destaca-se a bacia do rio Xingu (Figura 1), localizada em sua porção leste, compreendida pelos estados do Mato Grosso e do Pará. A bacia está inserida em dois dos principais biomas brasileiros: o Cerrado em seu extremo sul e a floresta Amazônica.

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2008), a temperatura máxima média é aproximadamente 30°C e a mínima média é de 20°C. A umidade relativa é de 80% durante quase todo ano e a precipitação média na bacia é de aproximadamente 1.750 mm/ano na porção sul, onde predomina o Cerrado, e de 2.350 mm/ano na parte norte, ocupado pela floresta Amazônica, como pode ser observado na Figura 2.



**Figura 1** - Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Xingu. Destaca-se ainda na figura a distribuição dos biomas brasileiros.



**Figura 2** - Normal climatológica do Brasil para a precipitação anual, de 1961 a 1990 produzida pelo INMET. Em destaque está a bacia do Rio Xingu.

## 2.2 Descrição dos dados

### 2.2.1 Descrição dos dados climatológicos

Foram testados dois bancos de dados climatológicos, obtidos do Terrestrial Hydrology Research Group (THRG), publicados por Sheffield et al. (2006), e do Climate Research Unit (CRU), publicados por Harris et al. (2014). Ambos combinam observações e reanálise para a produção de sua série histórica.

O banco de dados THRG é composto por precipitação (mm/dia), umidade específica ( $\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{ar}}$ ), temperaturas máxima, média e mínima diárias ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação de onda longa e onda curta na superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), velocidade do vento (m/s) e pressão do ar na superfície (kPa), e resolução temporal diária para o período de 1948 a 2008. Já o banco de dados CRU possui precipitação (mm/dia), temperaturas máxima, média e mínima diárias ( $^{\circ}\text{C}$ ), amplitude média da temperatura diária ( $^{\circ}\text{C}$ ), pressão de vapor (hPA), nebulosidade (%), número de dias chuvosos no mês (dias), número de dias com geada no mês (dias) e evapotranspiração potencial (mm/dia), sendo sua resolução temporal mensal para o período de 1901 a 2013 e a resolução espacial de  $0,5^{\circ}$  na horizontal (aproximadamente 55 km no equador).

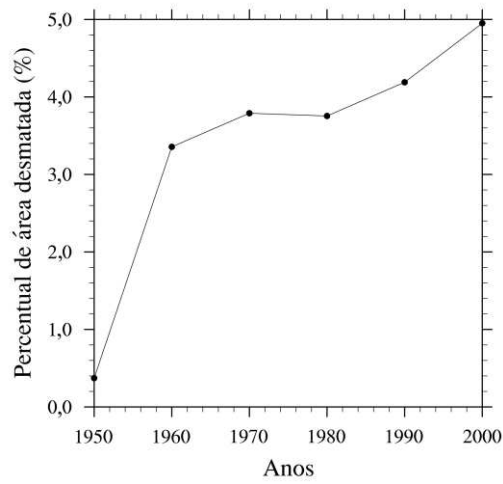
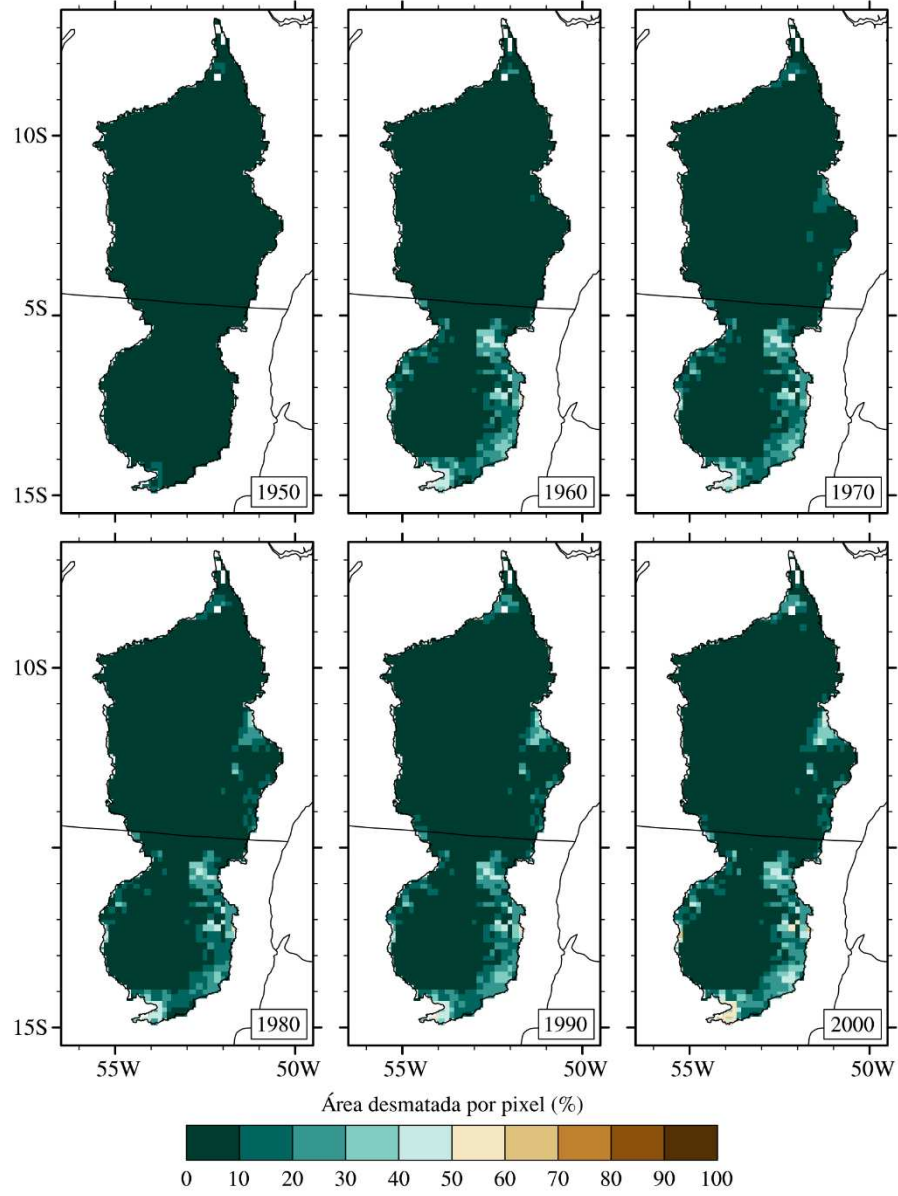
Para este trabalho, somente dados de precipitação, temperaturas máxima, média e mínima, umidade específica do ar, velocidade do vento e nebulosidade foram usados. Entretanto, os dados de nebulosidade não estão presentes no banco de dados THRG. Essas informações foram estimadas utilizando a radiação de onda curta, de acordo com:

$$c = 1 - \frac{R_g}{R_o} \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $c$  é a nebulosidade (%),  $R_g$  é a radiação de onda curta à superfície ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), e  $R_o$  é a radiação de onda curta no topo da atmosfera ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

### 2.2.2 Descrição dos dados de uso do solo

Os dados de evolução do uso do solo foram produzidos por Leite et al. (2012) para o período de 1940 a 2000. Esses dados são uma reconstrução explícita dos padrões históricos de uso do solo para o Brasil, obtidos através da união de dados de censo agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com imagens de satélite, apresentando três classes: área cultivada, pastagem natural e pastagem plantada. Neste trabalho, considera-se área como desmatada, a soma das três classes de uso do solo.



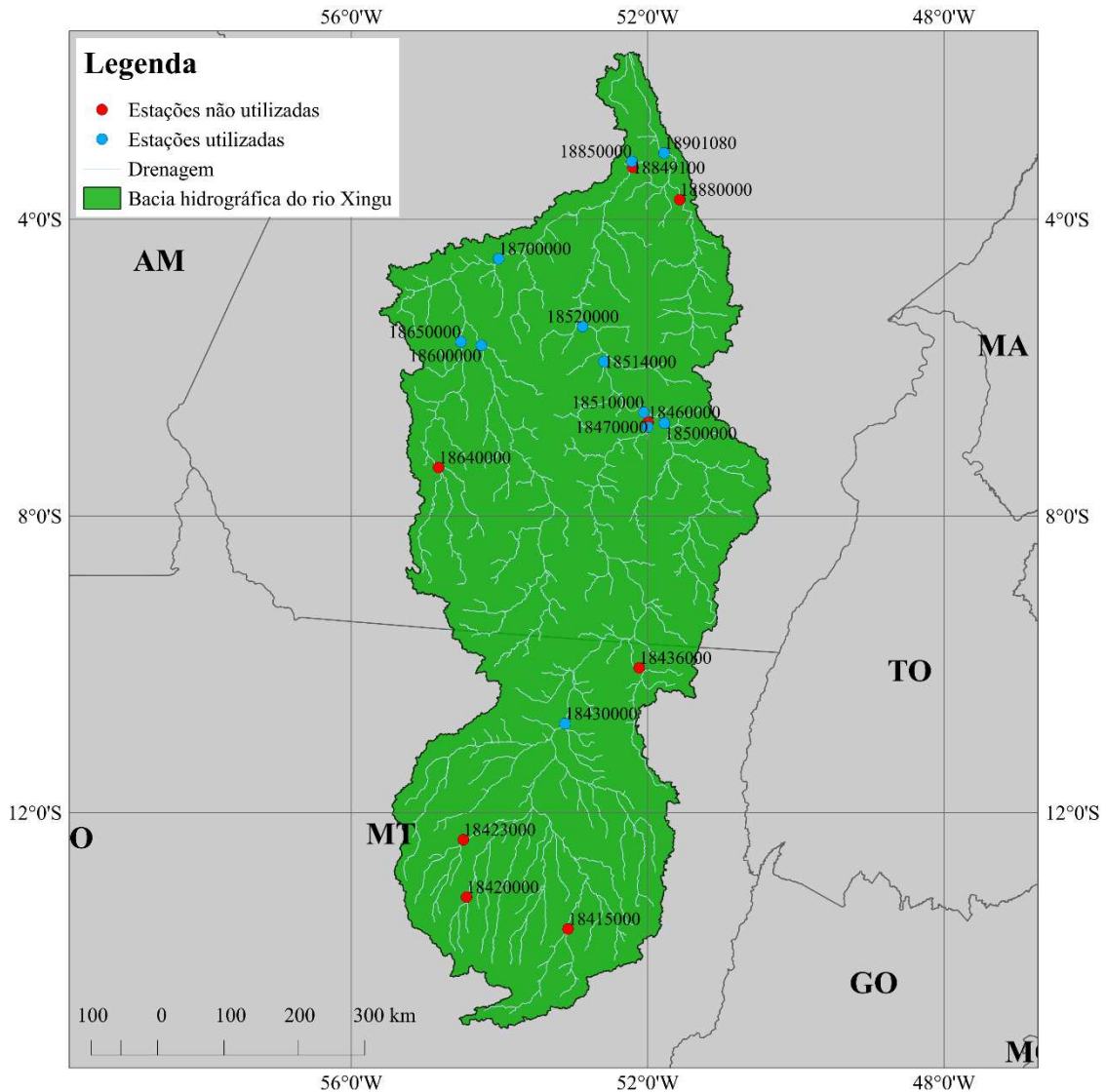
**Figura 3** - Evolução do desmatamento na bacia hidrográfica do Xingu, adaptado de Leite et al. (2012).

Os dados estão distribuídos em grade e a resolução espacial dos dados é de 5 minutos (aproximadamente 9 km) na horizontal. As informações são apresentadas em percentual de área alterada por célula de grade. A Figura 2 apresenta a evolução da alteração do uso do solo na bacia do rio Xingu.

### **2.2.3 Descrição dos dados hidrológicos**

Os dados hidrológicos de vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) foram obtidos de estações fluviométricas do sistema HydroWeb, mantido pela Agência Nacional de Águas (ANA). Para a bacia do rio Xingu, foram listadas 19 estações, mostradas na Figura 3.

Foram adotados três critérios para seleção das estações a serem utilizadas neste trabalho: (i) período de dados com mais de 20 anos entre 1940 a 2000, (ii) percentual de falhas mensais na série inferior a 15% e (iii) área de drenagem superior a 20 mil  $\text{km}^2$ . Todas as estações atenderam ao critério (i), entretanto, uma estação não atendeu ao critério (ii), e cinco estações ao critério (iii). Além disso, as estações 18880000 e 18849100 não puderam ser utilizadas devido a erros apresentados nos dados geomorfológicos utilizados pelo modelo hidrológico que as afetaram diretamente. A Tabela 1 apresenta o resumo das estações fluviométricas da bacia do rio Xingu.



**Figura 4** - Localização das estações fluviométricas na bacia do rio Xingu.

## 2.3 Descrição dos modelos

### 2.3.1 Descrição do Modelo de Processos Superficiais InLand

O Modelo Integrado de Processos Superficiais (InLand), que vem sendo desenvolvido por pesquisadores brasileiros, é baseado no modelo Integrated Biosphere Simulator (IBIS), desenvolvido por pesquisadores da universidade de Wisconsin-Madison (FOLEY et al., 1996). Atualmente o InLand já abrange características de alguns processos que são típicos do Brasil, como a diferenciação de Cerrado e Savana, inclusão de queimadas, agricultura e desmatamento,

e que não são abordadas nem pelo IBIS e nem pelos demais modelos de superfície existentes. O InLand é um modelo de grade distribuída com resolução horizontal de 0,5° (aproximadamente 55 km no equador), simulando processos de ordem temporal horária, diária, mensal e anual.

**Tabela 1** - Estações fluviométricas localizadas na bacia hidrográfica do rio Xingu

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Falhas</b>	<b>Período de dados</b>	<b>Número de anos</b>	<b>Área de Drenagem (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Estações usadas</b>
18420000	Fazenda Itaguaçu	0,00%	1976 – 2000	25	3.840	
18423000	Consul	0,00%	1976 – 2000	25	8.900	
18415000	Pousada Matrinxã	0,00%	1976 – 2000	25	11.600	
18436000	Jusante rio Preto	0,00%	1976 – 2000	25	12.000	
18640000	Aldeia Baú	0,00%	1976 – 2000	25	18.300	
18650000	Cajueiro	0,00%	1976 – 2000	25	35.600	X
18500000	Boa Esperança	0,00%	1976 – 2000	25	42.400	X
18600000	Laranjeiras	0,00%	1976 – 2000	25	58.700	X
18700000	Pedra do Ó	0,00%	1976 – 2000	25	122.000	X
18430000	Passagem BR-080	0,00%	1976 – 2000	25	139.000	X
18460000	Boa Sorte	17,33%	1976 – 2000	25	210.000	
18470000	UHE São Félix	0,00%	1976 – 2000	25	210.000	X
18880000	Fazenda Cipaubá	0,00%	1976 – 2000	25	247.000	
18510000	São Félix do Xingu	7,89%	1976 – 1998	23	255.000	X
18514000	UHE Pombal	0,00%	1976 – 2000	25	266.000	X
18520000	Belo Horizonte	0,00%	1976 – 2000	25	281.000	X
18849100	UHE Altamira	0,00%	1976 – 2000	25	447.000	
18850000	Altamira	0,00%	1971 – 2000	30	448.000	X
18901080	UHE Belo Monte	0,00%	1976 – 2000	25	482.000	X

A estrutura básica do modelo contempla quatro módulos principais para simular as trocas de energia, água, carbono e momentum na interface solo-planta-atmosfera. O módulo de vegetação é responsável pela fisiologia e dinâmica vegetal. O módulo de biogeoquímica aborda

o ciclo de carbono e nitrogênio. O módulo de processos superficiais é responsável pela modelagem da física do dossel, do solo e da fisiologia vegetal enquanto o módulo de fenologia aborda os processos fenológicos, com base no desenvolvimento das culturas a partir do método do graus-dia.

Quanto aos aspectos físicos, o InLand pode ser considerado um modelo de quarta geração (BONAN, 2008), abrangendo processos da biosfera terrestre como dinâmica de vegetação com 12 tipos funcionais de plantas que competem entre si por água e luz; fisiologia do dossel (fotossíntese, condutância estomática e respiração); fenologia vegetal e ciclo de carbono e nutrientes. O modelo divide o solo em 6 camadas, utilizando nesse trabalho espessura total de 4 metros, a partir da superfície. O cálculo de umidade no solo é baseado nas equações de fluxo de Richards (RICHARDS, 1931), sendo simulada para cada camada individualmente.

O InLand permite que o usuário opte por simular a infiltração de água no solo através da formulação de Green-Ampt (GREEN; AMPT, 1911) ou pela equação de Darcy (DARCY, 1856). Já a curva de retenção de água no solo e a captura de água pelas raízes é simulada pelo método proposto por Li et al. (2006) ou por Foley et al. (FOLEY et al., 1996) de acordo com a escolha do usuário. A vegetação é representada por duas camadas de dosséis, onde a superior corresponde as árvores e a inferior é representada pelos arbustos e gramíneas. Quanto à fisiologia das plantas, a fotossíntese e a respiração se diferenciam para plantas do tipo C3 e C4 e a transpiração é governada pela condutância estomatal acoplada à fotossíntese (BALL; WOODROW; BERRY, 1987). O escoamento da água é dividido em superficial e drenagem profunda, calculado em função das características do solo, do clima e da vegetação.

### **2.3.2 Descrição do modelo hidrológico THMB**

O modelo hidrológico Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry (THMB) foi desenvolvido, calibrado e validado para as bacias hidrográficas dos rios Amazonas e Tocantins,

como parte do projeto LBA-ECO/NASA, e tem como finalidade simular a variação temporal dos fluxos e armazenamento de água nos sistemas hidrológicos terrestres, como vazão dos rios e planícies de inundação (COE; COSTA; HOWARD, 2008).

O THMB utiliza como condição de contorno, dados climáticos e dos fluxos superficial e subsuperficial, gerados pelo modelo de processos superficiais InLand que simula o balanço de água na bacia, além dos dados geomorfológicos como curso do rio e área das planícies alagáveis. Os dados geomorfológicos foram gerados a partir de informações topográficas do modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM. O modelo opera com resolução espacial de 5 minutos (aproximadamente 9 km no equador) e intervalo de integração das equações de 1 hora.

São simulados pelo THMB, a descarga do rio, distribuição espacial e volumétrica dos lagos permanentes e fluxo e concentração de nitrogênio na superfície da água (COE, 2002). A variação do volume de água em cada célula de grade do modelo é governada por três equações diferenciais lineares, relacionadas a três reservatórios: reservatório do rio ( $W_r$ ), reservatório do escoamento superficial ( $W_s$ ) e reservatório do escoamento subsuperficial ( $W_d$ ). As Equações a seguir apresentam a variação dos reservatórios do escoamento superficial, subsuperficial e do rio, respectivamente.

$$\frac{d(W_s)}{dt} = R_s - \frac{W_s}{T_s} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\frac{d(W_d)}{dt} = R_d - \frac{W_d}{T_d} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\frac{d(W_r)}{dt} = \left( \frac{W_s}{T_s} + \frac{W_d}{T_d} \right) \times (1 - A_w) + (P_w - E_w) \times A_w - \left( \frac{W_r}{T_r} \right) + \sum F_{in} \quad (\text{Equação 4})$$

$A_w$  é a fração ocupada pelo rio na célula, e varia de 0 (não há rio) a 1 (completamente rio).  $T_s$ ,  $T_d$  e  $T_r$  são os tempos de residência dos reservatórios de escoamento superficial,

subsperficial e do rio (s), respectivamente,  $P_w$  e  $E_w$  são a precipitação e a evaporação sobre o rio ( $m^3/s$ ), respectivamente, e  $\Sigma F_{in}$  é a soma do fluxo de água à montante da célula ( $m^3/s$ ).  $R_s$  e  $R_d$  são, respectivamente, os valores da drenagem superficial e subsuperficial da célula ( $m^3/s$ ). Nas simulações,  $T_s$  e  $T_d$  foram parametrizados em 2 horas, e  $T_r$  é calculado em função da distância do centro da célula do rio considerada até o centro da célula à jusante e das características geomorfológicas e topográficas da calha do rio.

#### **2.4 Descrição da modelagem numérica**

As simulações numéricas foram feitas utilizando os modelos InLand e THMB, que se encontram acoplados. Como condição de contorno, o InLand usa dados climatológicos de precipitação, temperatura, nebulosidade, umidade e velocidade do vento. Os bancos de dados CRU e THRG foram testados, juntamente com os métodos de infiltração de água no solo e de captura de água pelas raízes, que podem ser selecionados no modelo InLand. Para o teste, foi selecionada a estação 18850000 – Altamira, que encontra-se próxima à foz da bacia, sendo considerada como representativa para toda a bacia e que tem a série de dados mais longa (1971 à 2009). Os dados de vazão ( $m^3/s$ ) da estação foram convertidos em lâmina d'água (mm/dia) e comparados ao escoamento total do modelo InLand. O melhor resultado dentre as oito possíveis combinações foi selecionado para dar sequência às análises.

Foram feitas duas simulações, onde dois cenários de uso do solo foram apresentados. No primeiro cenário, o modelo foi ajustado para não incluir desmatamento, onde toda a bacia encontra-se com a vegetação natural completamente preservada, com a finalidade de ser a simulação controle. Já no segundo cenário foram incluídos dados de desmatamento anual no modelo InLand. Nos dois casos, todos os parâmetros dos modelos foram deixados com seus valores padrão. O período simulado foi de 1940 a 2000, sendo que os dez primeiros anos foram para a inicialização do modelo, não sendo utilizados nas análises.

## 2.5 Validação dos modelos

A validação dos modelos foi feita através da comparação entre a vazão simulada pelo THMB e a medida pelas estações da ANA. Os dados de vazão simulada encontram-se especializados nos arquivos resultantes da simulação do modelo hidrológico. Foram extraídos os valores de vazão simulada do pixel correspondente à localização geográfica das estações fluviométricas para comparação.

Para cada estação, foi feita a regressão linear, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), diferença média das vazões considerando toda série histórica (%), o viés médio (MBE,  $m^3/s$ ) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE,  $m^3/s$ ) para os dados mensais. Além disso, foram produzidos histogramas com o erro anual (quantidade de erro percentual por intervalo de classe) para cada uma das estações.

## 2.6 Análises estatística dos resultados

Para a análise dos resultados, foram usadas as séries simuladas correspondente ao pixel das 11 estações fluviométricas utilizadas na validação dos modelos. Com esses dados, foram traçadas duas frentes de investigação. A primeira verificou a existência de diferença significativa entre as séries simuladas com a vegetação natural preservada e com desmatamento incluído, através do teste dos desvios cumulativos (BUIHAND, 1982) aplicado na série formada pela diferença entre as duas simulações.

O objetivo do teste é identificar o ponto onde a descontinuidade de homogeneidade da série ocorreu. Assim, pode-se inferir que a partir do ponto desse ponto, o desmatamento passa a influenciar a simulação de maneira que os resultados tenham comportamentos diferentes. O teste é baseado na soma dos desvios cumulativos da média, dado por:

$$S_0^*=0, S_k^*=\sum_{i=1}^k (Y_i-\bar{Y}), k=1, 2, \dots, n \quad (\text{Equação 5})$$

onde  $S_k^*$  é a soma dos desvios cumulativos em  $k$  e  $n$  é o número de elementos da série. A soma é então ajustada pelo desvio padrão da série:

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{s} \quad (\text{Equação 6})$$

onde  $S_k^{**}$  é a soma dos desvios cumulativos em  $k$  corrigido pelo desvio padrão  $s$ . Calcula-se a estatística sensível à quebra de homogeneidade ( $Q$ ) da série:

$$Q = \max_{0 \leq k \leq n} |S_k^{**}| \quad (\text{Equação 7})$$

Valores elevados para  $Q$  indicam que a série é heterogênea, apresentando outra tendência a partir de determinado período. A Tabela 2, descrita em Buishand (1982), apresenta valores críticos da estatística do método da soma dos desvios cumulativos.

**Tabela 2** - Valores críticos da estatística do método da soma dos desvios cumulativos.

n	Q		
	$\frac{Q}{\sqrt{n}}$		
	90%	95%	99%
10	1,05	1,14	1,29
20	1,10	1,22	1,42
30	1,12	1,24	1,46
40	1,13	1,26	1,50
50	1,14	1,27	1,52
100	1,17	1,29	1,55
$\infty$	1,22	1,36	1,63

A segunda frente buscou verificar, através do teste t de Student, a existência de alteração na média da vazão anual entre os primeiros e últimos 15 anos de análises (1951 a 1965 e 1986 a 2000, respectivamente). Além disso, verificou-se também, se houve alteração no volume de precipitação e se essa alteração foi responsável pela alteração na vazão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Escolha do banco de dados climatológico

Os bancos de dados climatológicos foram testados juntamente com os métodos de infiltração de água no solo e com os métodos de captura de água pelas raízes, formando oito possíveis combinações, a partir de agora tratadas de acordo como descrito na Tabela 3.

**Tabela 3** - Tabela-resumo das combinações de banco de dados com os métodos de infiltração de água no solo e captura de água pelas raízes

Banco de dados	Método de infiltração de água no solo			
	Darcy		Green-Ampt	
	Método de captura de água pelas raízes		Método de captura de água pelas raízes	
	Foley et al., 1996	Li et al., 2007	Foley et al., 1996	Li et al., 2007
THRG (diário)	DDF	DDL	DGF	DGL
CRU (mensal)	MDF	MDL	MGF	MGL

Para a escolha da melhor combinação, foram considerados dois critérios de seleção: desempenho do banco de dados e desempenho da combinação de métodos. A Tabela 4 apresenta os dados de regressão linear das simulações das combinações em relação aos dados observados, da média de longa duração das séries e do erro médio.

**Tabela 4** – Resultado da análise estatística da comparação entre as combinações. O  $R^2$  refere-se ao coeficiente de determinação da regressão linear,  $\beta_0$  é o intercepto no eixo das ordenadas e  $\beta_1$  é o coeficiente de inclinação da reta.

Mês	Observações	DDF	DDL	DGF	DGL	MDF	MDL	MGF	MGL
Média	1,54	1,79	1,92	1,80	1,77	1,51	1,47	0,91	0,83
Erro médio	-	14%	20%	14%	13%	-2%	-5%	-69%	-86%
$R^2$	-	0,73	0,77	0,73	0,73	0,80	0,79	0,71	0,74
$\beta_0$	-	0,17	0,00	-0,02	0,12	0,06	0,64	0,65	0,94
$\beta_1$	-	1,05	1,15	1,13	1,08	0,92	0,91	0,67	0,62

Embora os resultados MDF e MDL apresentem bom desempenho, os resultados utilizando o banco de dados THRG são mais homogêneos, como pode ser observado na Tabela 4. Os valores médios do erro médio,  $R^2$ ,  $\beta_0$  e  $\beta_1$  utilizando o banco de dados THRG são melhores,

quando comparados aos resultados CRU. Logo, de acordo com o primeiro critério de seleção, o banco de dados THRG foi escolhido para ser utilizado nas simulações.

**Tabela 5** - Resultado da comparação entre os bancos de dados utilizando a média de todas as combinações de métodos de infiltração de água no solo e captura de água pelas raízes das plantas

	<b>THRG</b>	<b>CRU</b>
Média (mm/dia)	1,82	1,75
Erro médio (mm/dia)	0,15	-0,40
R <sup>2</sup>	0,74	0,76
$\beta_0$	0,07	0,58
$\beta_1$	1,10	0,78

Quanto ao critério da combinação de métodos de captura de água pelas raízes das plantas e infiltração de água no solo, de acordo com a Tabela 5, todas as combinações apresentaram desempenho semelhante. Trabalhos da mesma natureza (COE et al., 2011; COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003) usaram o modelo IBIS, que utiliza os métodos de Green-Ampt para infiltração de água no solo e de Foley et al. (1996) para de captura de água pelas raízes das plantas. Sendo o IBIS um modelo consagrado na literatura, a combinação DGF foi a escolhida para ser usada nesse trabalho.

### 3.2 Validação dos modelos

Os modelos trabalham acoplados, onde os dados de escoamento gerados pelo InLand são utilizados pelo THMB sem a necessidade do usuário intervir no processo. Assim, a validação dos modelos foi feita de forma conjunta, onde a vazão simulada pelo THMB foi comparada com os dados observados da ANA.

Foi utilizada para a validação dos modelos a combinação DGF, definida anteriormente nesse trabalho. A validação foi feita através de regressão linear, erro da vazão de longa duração, viés médio (MBE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE). A Tabela 6 apresenta as estatísticas utilizadas para a validação dos modelos para as 11 estações fluviométricas.

**Tabela 6** - Dados estatísticos para validação dos modelos. O coeficiente  $\beta_0$  é o intercepto no eixo das ordenadas e o  $\beta_1$  é o coeficiente de inclinação da reta. O  $R^2$  é o coeficiente de determinação. A diferença média é a diferença percentual entre a média observada e simulada das séries. O MBE (Viés do Erro Médio) e o RMSE (Raíz do Erro Quadrático Médio) estão em  $m^3/s$

Código	Regressão linear		$R^2$	Erro na vazão de longa duração	MBE ( $m^3/s$ )	RMSE ( $m^3/s$ )
	$\beta_0$	$\beta_1$				
18430000	-1791,14	1,91	0,71	2,99%	60,19	1765,19
18470000	-1686,80	1,39	0,73	-7,96%	-269,32	2474,26
18500000	54,66	0,82	0,58	-12,69%	-94,16	625,51
18510000	-1821,26	1,32	0,72	-5,98%	-254,33	3016,09
18514000	-1552,94	1,22	0,74	-10,49%	-462,38	2960,75
18520000	-1560,83	1,22	0,73	-9,59%	-449,78	3115,76
18600000	61,54	1,04	0,70	8,13%	105,58	834,91
18650000	64,99	0,84	0,67	-9,07%	-70,00	483,83
18700000	325,08	0,83	0,71	-4,75%	-119,65	1529,80
18850000	-792,20	1,09	0,77	-0,63%	-50,07	4339,12
18901080	-663,46	1,09	0,75	1,13%	92,36	4630,88

Os valores ideais dos parâmetros beta da regressão linear é zero para  $\beta_0$  e um para  $\beta_1$ , ou seja, a reta intercepta a origem do plano cartesiano e tem  $45^\circ$  de inclinação. Entretanto, os valores dos parâmetros obtidos na regressão nem sempre são significativos a um determinado nível de confiança. Para determinar se os valores encontrados são diferentes dos valores ideais citados acima, deve-se proceder com o teste dos parâmetros beta.

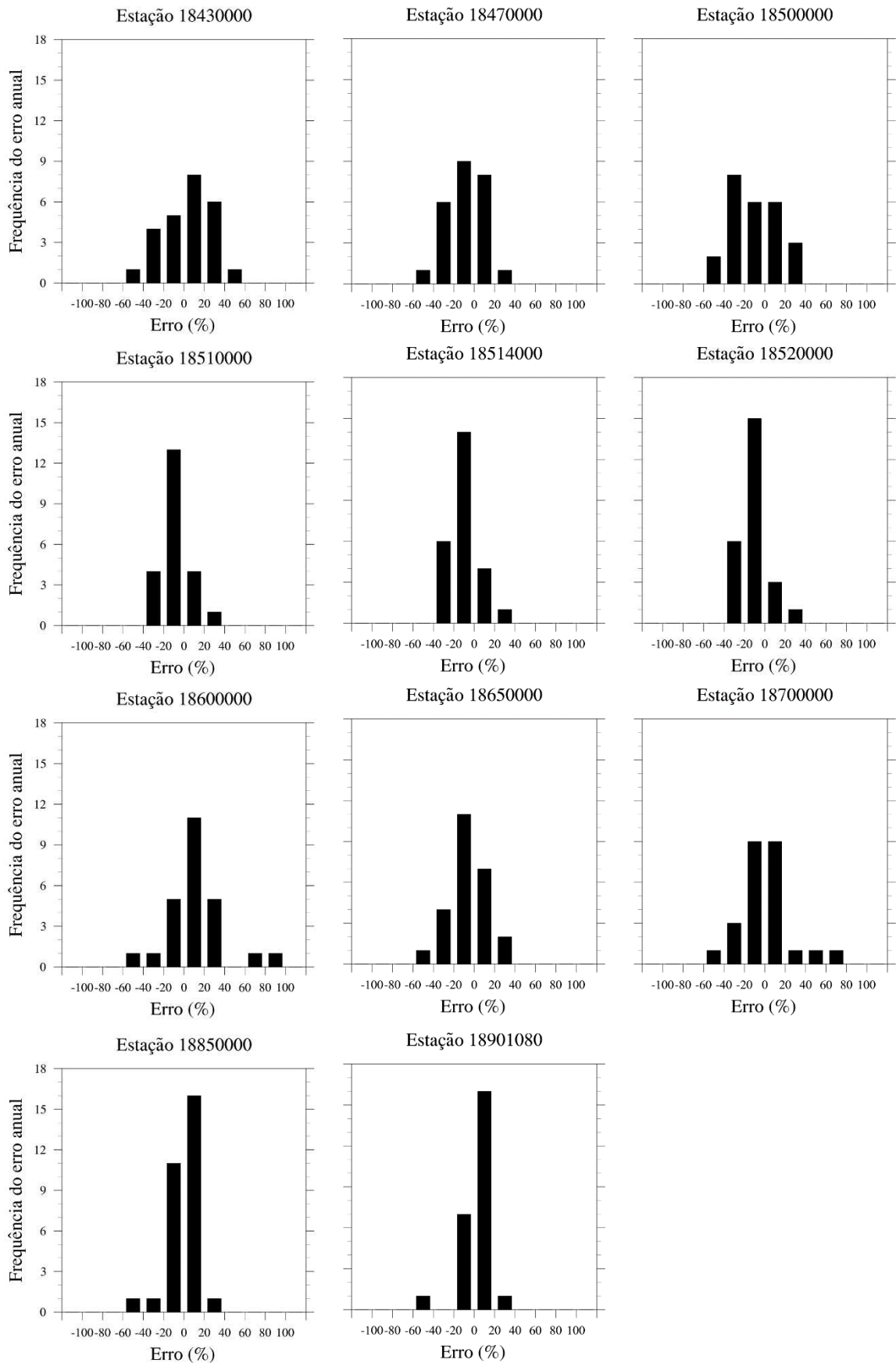
Os resultados do teste, apresentado na Tabela 7, mostra que cinco dos onze parâmetros  $\beta_0$  não são significativos para um nível de confiança de 99%. Isso significa que as regressões feitas para esses pontos interceptam o eixo das coordenadas.

**Tabela 7** - Teste dos parâmetros  $\beta$  para as regressões lineares entre os dados observados e das simulações

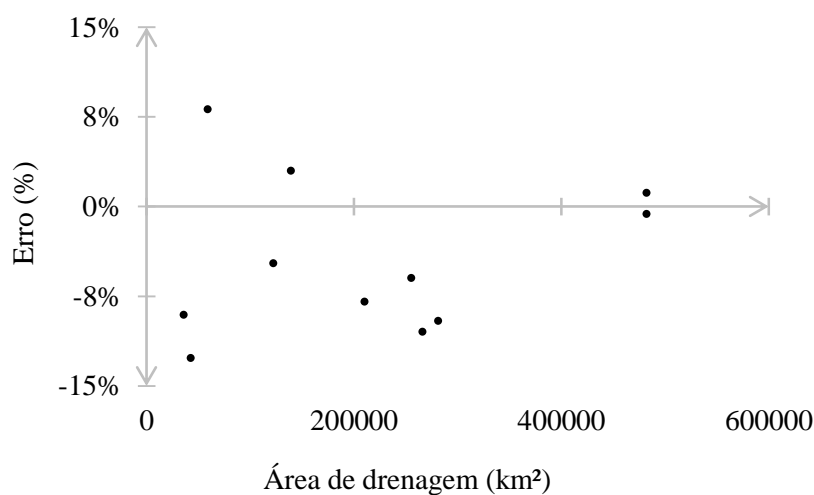
Estação	p-valor	
	$\beta_0$	$\beta_1$
18430000	< 0,01	< 0,01
18470000	< 0,01	< 0,01
18500000	0,26	< 0,01
18510000	< 0,01	< 0,01
18514000	< 0,01	< 0,01
18520000	< 0,01	< 0,01
18600000	0,36	< 0,01
18650000	0,10	< 0,01
18700000	< 0,01	< 0,01
18850000	0,02	< 0,01
18901080	0,10	< 0,01

Além disso, foram feitos histogramas com a frequência de erros anuais por intervalo de classe de 10% para cada estação. A Figura 6 mostra que os erros estão acumulados próximos de zero em todas as estações, mostrando baixo viés do erro.

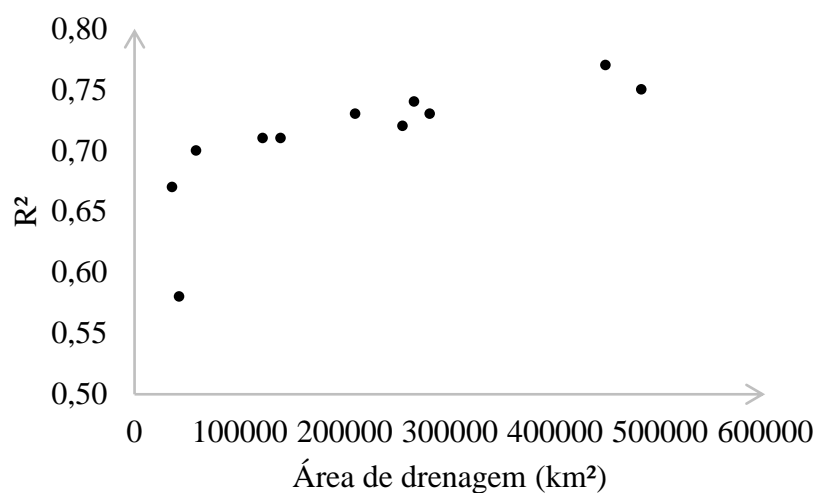
Nota-se ainda que o modelo THMB tem tendência em simular melhor pontos com maior área de drenagem, sendo que quanto maior a área drenada, menor será erro médio do ponto (Figura 4) e maior será o  $R^2$  (Figura 5). Esse resultado é esperado, uma vez que os modelos trabalham com tamanhos de grade diferentes. Cada pixel do modelo InLand tem aproximadamente 3 mil km<sup>2</sup>, enquanto o THMB simula com grade de aproximadamente 80 km<sup>2</sup>. Logo, a simulação de qualquer ponto com área de drenagem pequena, terá seu desempenho prejudicado pela falta de variabilidade espacial na simulação do escoamento.



**Figura 5** - Histogramas com frequência de erros anuais dividido em classes de 20%.



**Figura 6** - Relação entre a área de drenagem e o erro médio.



**Figura 7** - Relação entre a área de drenagem e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

A precisão dos dados de vazão medidos, também pode comprometer a validação do modelo. Esses dados são calculados através da medição do nível d'água, convertido em vazão através de uma curva-chave, atualizada ao longo do ano. De acordo com Coe et al. (2002), essa técnica pode apresentar erros na faixa de 10 a 15% na média anual.

Contudo, apesar das limitações apresentados acima, o THMB apresenta resultados consistentes em simular vazão, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,71 e erro médio da vazão de longa duração é de -4,5%.

### 3.3 Análise estatística do efeito do desmatamento na vazão anual

A alteração na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica pode alterar o balanço hídrico na região. O desmatamento altera a porosidade do solo pelo selamento dos poros durante eventos de precipitação, mudando suas propriedades hidráulicas. Quando o solo se torna menos poroso, a infiltração é reduzida, aumentando o escoamento superficial, causando incremento nas vazões máximas e diminuindo as vazões mínimas no ciclo sazonal. Também pode interferir na evapotranspiração, através do aumento do albedo, diminuição da rugosidade aerodinâmica e também a profundidade das raízes, em relação à floresta tropical, causando aumento na vazão de longa duração (COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003). O balanço hídrico de longa duração é dado por:

$$P = E + R + \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (\text{Equação 8})$$

onde P é a precipitação, E é evapotranspiração, R é o escoamento total e  $\frac{\Delta S}{\Delta t}$  é a troca líquida de umidade no solo por unidade de tempo, desconsiderado para períodos longos.

Para verificar o efeito do desmatamento na vazão, foi feita uma simulação-controle, onde os dados de desmatamento foram omitidos. Para esse teste, foram geradas séries da diferença algébrica entre a simulação de vazão com e sem desmatamento. Essas séries foram submetidas ao teste de homogeneidade dos desvios cumulativos.

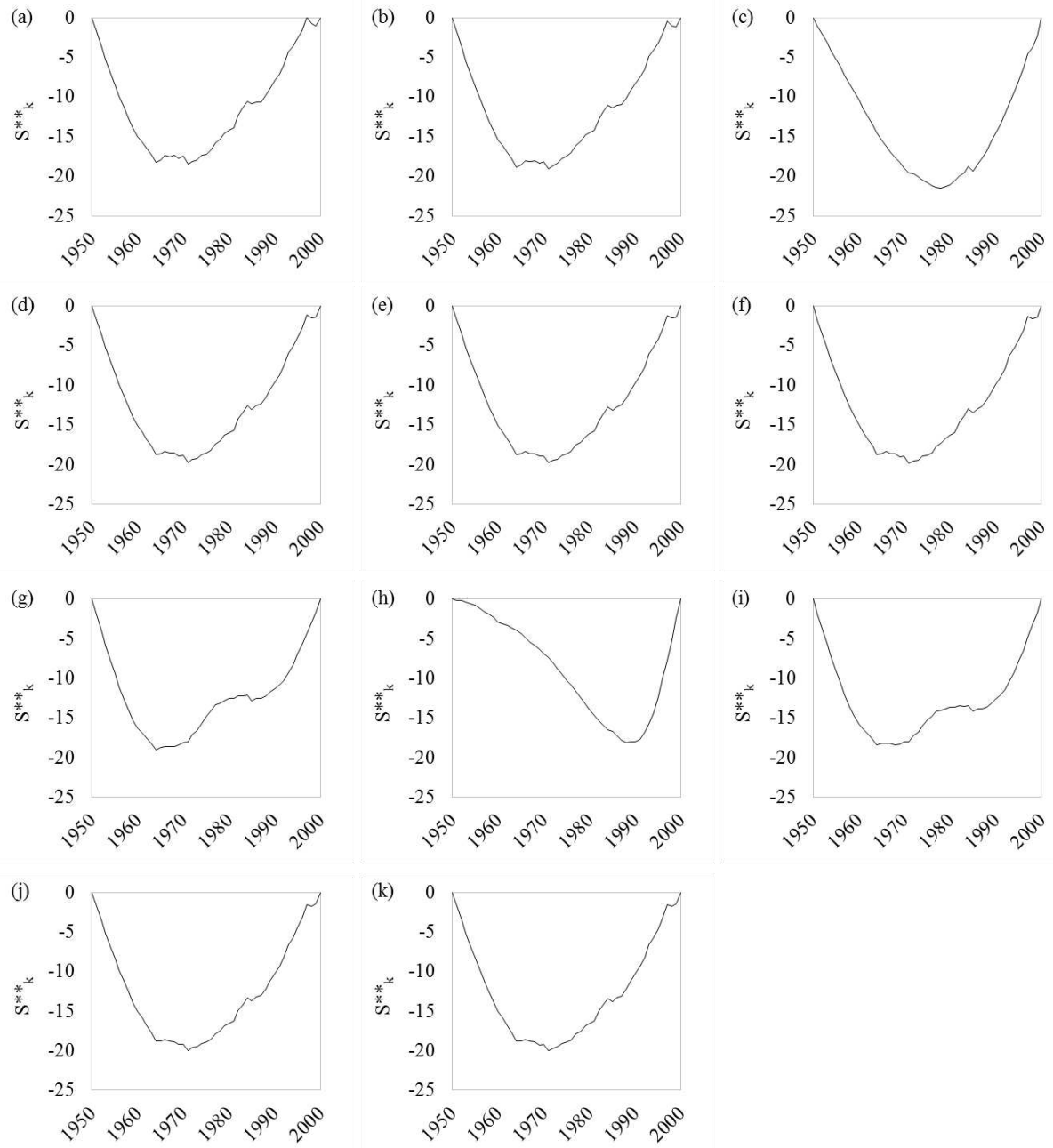
O ponto de corte do teste para probabilidade de 99%, com amostra  $n = 50$ , apresentado na Tabela 2 é  $\frac{Q}{\sqrt{n}} = 1,52$ . Logo, todas as séries de diferenças geradas são heterogêneas, apresentando em determinado ano mudança de tendência, como mostrado na Tabela 9. A Figura 7 mostra o comportamento dos desvios cumulativos em todos os pontos analisados.

**Tabela 8** - Resultado do teste dos desvios cumulativos da série com a diferença entre as simulações com e sem desmatamento. O tamanho da amostra  $n$  é igual a 50

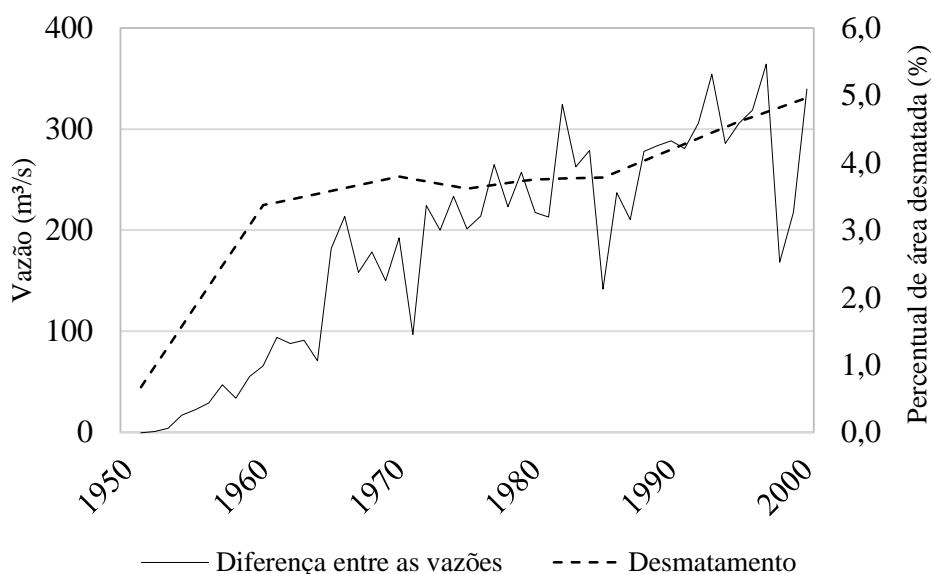
Pontos	Estatística $\frac{Q}{\sqrt{n}}$	Ano da mudança de tendência
18430000	2,62	1971
18470000	2,70	1971
18500000	3,04	1978
18510000	2,79	1971
18514000	2,80	1971
18520000	2,81	1971
18600000	2,68	1964
18650000	2,56	1988
18700000	2,61	1964
18850000	2,83	1971
18901080	2,83	1971

Distingue-se quatro padrões diferentes de mudança na homogeneidade das séries, caracterizando quatro sub-bacias onde os pontos se encontram inseridos, de acordo com a Figura 9. O ponto 18500000 está inserido na bacia do rio Fresco, enquanto o ponto 18650000 encontra-se na bacia do rio Cururuá. Os pontos 18600000 e 18700000 estão na bacia do rio Iriri, e o restante encontra-se no rio Xingu. Esse comportamento distinto entre as sub-bacias revela que o modelo foi capaz de simular as vazões de acordo com as diferentes características da região.

Os resultados do teste dos desvios cumulativos mostram que, a partir de determinado momento (Tabela 9), as vazões simuladas com e sem desmatamento começam a divergir, apoiando a hipótese de que o desmatamento causa aumento na vazão de longa duração. A Figura 9 apresenta a evolução da diferença entre as simulações e do desmatamento para ponto 18901080, o mais próximo da foz.



**Figura 8** - Gráficos dos desvios cumulativos. Os pontos referentes às estações estão numerados: (a) 18430000; (b) 18470000; (c) 18500000; (d) 18510000; (e) 18514000; (f) 18520000; (g) 18600000; (h) 18650000; (i) 18700000; (j) 18850000; (k) 18901080.



**Figura 9** - Relação entre desmatamento médio na área de drenagem no ponto 18901080 e diferença entre as vazões simuladas com e sem desmatamento. Nota-se que a diferença entre as vazões aumenta com o incremento no desmatamento.

Nota-se que o comportamento da diferença entre as vazões simuladas com e sem desmatamento (linha contínua na Figura 10) segue a tendência do aumento do desmatamento (linha pontilhada na Figura 10). No período de maior desmatamento, a diferença entre as vazões também cresce de maneira mais intensa, sendo que num segundo momento, onde o incremento do desmatamento é maior, a diferença entre as vazões tem um comportamento médio menos intenso, apesar da forte variação, resultante dos ciclos interanuais.

Além disso, como a bacia hidrográfica do rio Xingu apresenta histórico de desmatamento recente, mostrado na Figura 2, é possível comparar o comportamento da vazão em relação ao período anterior à alteração na cobertura vegetal, uma vez que os teste de homogeneidade dos desvios cumulativos mostrou que há mudança de tendência nas séries das diferenças das vazões simuladas com e sem desmatamento. Para isso, foram criadas duas séries com dados anuais de vazão e precipitação com duração de quinze anos para cada ponto analisado. A primeira abrange o período de 1951 a 1965 e a segunda, de 1986 a 2000 (daqui

em diante, chamada de período 1 e período 2, respectivamente). Também foi calculada a evapotranspiração pela diferença entre a precipitação e a vazão transformada em lâmina d'água.

Para cada ponto analisado, foi realizado o teste t de Student para a precipitação e a vazão com duas amostras em par para médias, comparando os dois períodos. Através do teste, buscou-se verificar se a média no período 2 é maior que no período 1 (teste unicaudal) para a vazão, como apresentada na Tabela 8.

Nota-se que todos os pontos apresentaram diferença significativa ( $p\text{-valor} < 0,01$ ) entre as vazões dos períodos 1 e 2, com exceção do ponto 18430000. Em média, as vazões de longa duração do período 2 aumentaram em 23%, quando comparadas com o período 1.

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que houve alteração nos componentes do balanço hídrico anual de longa duração da bacia entre os períodos. O incremento na vazão é acompanhado pela redução na evapotranspiração.

Também com a finalidade de investigar o comportamento da precipitação nos mesmos períodos, foi realizado o teste t de Student nos dados precipitação. Buscou-se investigar com o teste, se a média da precipitação no período 1 difere do período 2 (teste bicaudal). A Tabela 8 apresenta os resultados desse teste.

Observa-se que, com nível de significância de 1%, não houveram mudanças significativas na precipitação entre os períodos analisados para nenhum dos pontos. Assim, o aumento na precipitação sobre a bacia não pode explicar sozinho o incremento na vazão.

**Tabela 9** - Tabela-resumo dos resultados dos testes t de Student para precipitação e vazão. Também foi calculado a evapotranspiração pela diferença entre a precipitação e a vazão, transformada em lâmina d'água. As últimas três colunas da tabela apresentam o coeficiente de escoamento superficial, dado pela razão entre a vazão e a precipitação (ambas em mm/ano)

Estações	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Percentual de área desmatada (%)		Precipitação (mm/ano)				Vazão (m <sup>3</sup> /s)				Evapotranspiração (mm/ano)			Coeficiente de escoamento		
		Médias		Diferença	p-valor do teste t de Student	Médias		Diferença	p-valor do teste t de Student	Médias		Diferença	Período 1	Período 2	Diferença		
		Período 1	Período 2			Período 1	Período 2			Período 1	Período 2						
		1951 - 1965	1986 - 2000	1951 - 1965	1986 - 2000	1951 - 1965	1986 - 2000	1951 - 1965	1986 - 2000	1951 - 1965	1986 - 2000	1951 - 1965	1986 - 2000				
18430000	139000	8,44	10,00	1894	1947	2,7%	0,41	1588	1931	17,8%	0,03643	1533	1508	-1,6%	0,190	0,225	15,5%
18470000	210000	7,00	8,29	1921	1977	2,8%	0,26	2631	3271	19,6%	0,00565	1526	1485	-2,7%	0,206	0,249	17,2%
18500000	42400	2,38	8,55	1899	1981	4,1%	0,08	507	733	30,8%	0,00275	1522	1436	-5,9%	0,199	0,275	27,8%
18510000	255000	6,19	8,30	1917	1977	3,0%	0,19	3192	4092	22,0%	0,00157	1523	1471	-3,5%	0,206	0,256	19,5%
18514000	266000	5,88	7,96	1918	1980	3,1%	0,16	3295	4272	22,9%	0,00098	1527	1474	-3,6%	0,204	0,256	20,4%
18520000	281000	5,59	7,61	1917	1984	3,4%	0,12	3450	4554	24,2%	0,00047	1529	1473	-3,9%	0,202	0,258	21,6%
18600000	58700	0,75	1,08	2085	2122	1,7%	0,02	1038	1313	20,9%	0,00003	1527	1417	-7,8%	0,268	0,333	19,5%
18650000	35600	0,15	0,53	2136	2163	1,2%	0,19	644	791	18,6%	0,00026	1566	1462	-7,1%	0,267	0,324	17,6%
18700000	122000	0,41	0,68	2082	2121	1,8%	0,07	1975	2562	22,9%	0,00006	1571	1458	-7,7%	0,245	0,312	21,5%
18850000	448000	3,68	5,13	1950	2025	3,7%	0,03	5853	8038	27,2%	0,00002	1538	1459	-5,4%	0,211	0,279	24,4%
18901080	482000	3,51	4,93	1941	2028	4,3%	0,02	5887	8121	27,5%	0,00002	1556	1497	-4,0%	0,198	0,262	24,3%

## **2.1 Comparação dos resultados da bacia do rio Xingu com as bacias do Tocantins e Araguaia**

A bacia hidrográfica do rio Tocantins está localizada na porção central do Brasil. Costa et al. (2003) estudaram os efeitos da mudança na cobertura do solo na vazão utilizando dados diárias da estação fluviométrica de Porto Nacional, no estado do Tocantins com área de drenagem de 175.360 km<sup>2</sup>. O período estudado foi de 1949 a 1998, sendo dividido em dois períodos de vinte anos cada.

Os resultados encontrados por Costa et al. (2003) mostraram que a vazão aumentou em 24%, enquanto a precipitação aumentou em 3%, insignificante ao nível de 5%, e o coeficiente de escoamento superficial (razão entre escoamento e precipitação) subiu de 0,237 para 0,285 entre os dois períodos analisados. Os autores concluíram que a alteração na cobertura do solo afetou a vazão de longa duração do rio Tocantins.

A bacia hidrográfica do rio Araguaia também está localizada no Brasil central, sendo adjacente à bacia do rio Tocantins. Coe et al. (2011) estudaram os efeitos do desmatamento e da variabilidade climática na vazão utilizando a modelagem na sub-bacia Aruanã que drena uma área de 82.632 km<sup>2</sup>. O período de simulações foi de 1915 a 2000, sendo dividido em dois períodos de vinte anos de 1971 a 1980 e 1991 a 2000.

Coe et al. (2011) encontraram que houve aumento de 27% nas vazão de longa duração do primeiro período analisado em relação ao segundo, enquanto a precipitação aumentou em 2,5% e coeficiente de escoamento superficial subiu de 0,181 para 0,225. Os autores concluíram também que a substituição da vegetação natural causa aumento na vazão de longa duração alterando o balanço hídrico da superfície ao mudar a evapotranspiração. A Tabela 9 mostra de forma resumida os resultados encontrados por Costa et al. (2003), Coe et al. (2011) e nesse trabalho.

**Tabela 9** - Resultado dos estudos dos efeitos da mudança na cobertura vegetal das bacias hidrográficas dos rios Tocantins (COSTA et al., 2003), Araguaia (COE et al., 2011) e Xingu na vazão de longa duração. Na tabela a seguir, a bacia do rio Xingu é representada pelo ponto 18901080, que é o mais próximo da foz. C é o valor do coeficiente de escoamento superficial

<b>Bacias hidrográficas</b>	<b>Períodos</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Precipitação (mm/ano)</b>	<b>C</b>
Tocantins (COSTA et al., 2003)	1949 - 1968	2056	1540	0,237
	1979 - 1998	2532	1588	0,285
Araguaia (COE et al., 2011)	1971 - 1980	804	1693	0,181
	1991 - 2000	1025	1735	0,225
Xingu	1951 - 1965	5887	1941	0,198
	1986 - 2000	8121	2028	0,262

É importante destacar que nas bacias dos rios Tocantins e Araguaia, o bioma predominante é o Cerrado, diferente daquele predominante na bacia do Xingu. No ciclo hidrológico do Cerrado, naturalmente a taxa de evapotranspiração é menor, quando comparada com a da Floresta Amazônica.

Os resultados obtidos na bacia do rio Xingu mostram-se consistentes com os demais estudos da mesma natureza realizados por Costa et al. (2003) e Coe et al. (2011). Apesar das particularidades, como o bioma predominante e o tamanho da área de drenagem dos pontos comparados, os resultados são semelhantes. A mudança na cobertura vegetal das bacias causa alteração na vazão de longa duração numa faixa entre 20 a 30%, mudando também a quantidade de precipitação que se transforma e escoamento também na faixa de 0,20 a 0,30.

#### 4 RESUMO E CONCLUSÃO

O percentual de área desmatada na bacia hidrográfica do rio Xingu era de apenas 5% na região no ano 2000. Esse desmatamento não ocorreu de forma homogênea em toda bacia, sendo que a principal região que sofreu alteração na ocupação do solo foi a região de cabeceira. Esse trabalho buscou verificar se existe relação entre a alteração da cobertura vegetal natural com mudança no regime de vazões de longa duração utilizando vários pontos da bacia hidrográfica, correspondentes à localização de estações fluviométricas.

Com a finalidade de gerar séries longas e sem falhas, a modelagem foi utilizada como ferramenta nesse trabalho. Foram utilizados um modelo de superfície para gerar o balanço de água e um modelo hidrológico para o calcula das vazões. A validação dos modelos ocorreu pela comparação dos dados simulados com observações obtidas em estações fluviométricas. As simulações abrangeram o período de 1951 a 2000, sendo dividido em dois períodos de igual duração de 15 anos. O intervalo entre os períodos foi necessário para que fosse possível detectar a influência do desmatamento na vazão.

Os resultados mostraram que a vazão de longa duração do período de 1986 a 2000 foi, em média, 23% superior ao valor encontrado para o período de 1951 a 1965. A precipitação aumentou, em média para todos os pontos considerados, em 3%, sendo insignificante com nível de confiança de 99%. Mesmo assim, foi possível observar que coeficiente de escoamento superficial aumentou de aproximadamente 0,21 para 0,26 em média.

O aumento expressivo na vazão, o aumento insignificante na precipitação e o aumento na parcela de precipitação que se transforma em escoamento é acompanhado pela redução na evapotranspiração, que diminuiu em torno de 4% quando comparados os dois períodos de 15 anos estudados.

Os resultados encontrados são coerentes com aqueles obtidos por Costa et al. (2003) e Coe et al. (2011), onde a vazão aumentou em 24% e 27%, respectivamente. Assim, de maneira análoga a esses trabalhos citados anteriormente, é possível concluir que a redução na taxa de evapotranspiração causada pela supressão da vegetação nativa e a introdução de pastagem e culturas agrícolas alteram o balanço hídrico da região, sobretudo afetando a evapotranspiração, fazendo com que maior quantidade de água escoe superficialmente, aumentando a vazão dos corpos d'água.

A utilização da modelagem também possibilitou estimar o comportamento da diferença entre a vazão simulada com a ocorrência de desmatamento e com a área inteiramente preservada. Foi observado que as vazões apresentavam comportamento semelhante até determinado momento, a partir do qual a variação existente na série passou a ter tendência significativamente diferente em relação ao período anterior. Notou-se também que a evolução da série de desmatamento e da diferença entre as vazões apresentaram comportamento semelhante no tempo, indicando que possivelmente existe relação entre elas.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALL, J. T.; WOODROW, I. E.; BERRY, J. A. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions. In: BIGGINS, J. (Ed.). **Progress in Photosynthesis Research**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987. p. pp 221–224.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444–9, 13 jun. 2008.

BORLAUG, N. E. Feeding a world of 10 billion people: The miracle ahead. **In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant**, v. 38, n. 2, p. 221–228, mar. 2002.

BOSCH, J.; HEWLETT, J. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1-4, p. 3–23, fev. 1982.

BRUIJNZEEL, L. A. A. Hydrological impacts of tropical forest conversion. **Nature Resource**, v. 27, p. 36–46, 1991.

BUIHAND, T. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. **Journal of Hydrology**, v. 58, n. 1-2, p. 11–27, ago. 1982.

COE, M. T. Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 8044, 2002.

COE, M. T. et al. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1-3, p. 119–131, 23 fev. 2011.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 14, p. 2542–2553, 1 jul. 2008.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. 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**, v. 369, n. 1-2, p. 165–174, maio 2009.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1-4, p. 206–217, dez. 2003.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Water balance of the Amazon Basin: Dependence on vegetation cover and canopy conductance. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D20, p. 23973, 1 out. 1997.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau.** [s.l.: s.n.]. p. 647

DAVIDSON, E. A. et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321–8, 19 jan. 2012.

FOLEY, J. A. et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603–628, 14 dez. 1996.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–4, 22 jul. 2005.

GREEN, H. W.; AMPT, G. A. Studies on Soil Physics. **The Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 01, p. 1–24, 27 mar. 1911.

HARRIS, I. et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 3, p. 623–642, 15 mar. 2014.

INMET, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normas climatológicas.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 11 fev. 2013.

LEITE, C. C. et al. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 26, n. 2, p. n/a–n/a, 5 jun. 2012.

LI, K. Y. et al. Root-Water-Uptake Based upon a New Water Stress Reduction and an Asymptotic Root Distribution Function. **Earth Interactions**, v. 10, n. 14, p. 1–22, jun. 2006.

MACEDO, M. N. et al. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, n. 4, p. 1341–6, 24 jan. 2012.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite.** Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf\\_chm\\_rbbio/\\_arquivos/relatoriofinal\\_cerrado\\_2010\\_final\\_72\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatoriofinal_cerrado_2010_final_72_1.pdf)>.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318, 1931.

SAHIN, V.; HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. **Journal of Hydrology**, v. 178, n. 1-4, p. 293–309, abr. 1996.

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E. F. Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling. **Journal of Climate**, v. 19, n. 13, p. 3088–3111, jul. 2006.