

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

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

Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior (Fatec, Bolsista PIBIC/CNPq)
wellington.junior@inpe.br

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

COLABORADORES

Gustavo Luis Nascimento Pinto (CCST/INPE)

Julho de 2016

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Nome: **Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior**

Local de Trabalho: **CCST / INPE**

Título do Projeto: **Modelagem dos Impactos das Mudanças Climáticas na Operação dos Reservatórios da Bacia do Rio Xingu**

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

Período: **Janeiro/2016 a Julho/2016**

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

Wellington Luis Teodoro da Cruz Junior¹ (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)
Daniel Andres Rodriguez² (CCST/INPE, Orientador)
Gustavo Luiz Nascimento Pinto³ (CCST/INPE, Colaborador)

RESUMO

O rio Xingu, um dos principais tributários da calha sul do Amazonas, possui uma bacia que se estende por uma área de 531.250 km², equivalente a 13% da bacia Amazônica, sendo seu clima quente e úmido e seu relevo variado, com alturas desde 600 metros até 109 metros. Sua vazão média é de 22.000 m³, correspondente a 10% da vazão média do Rio Amazonas.

Este trabalho expõe o desenvolvimento de uma nova base de dados geomorfológicos e hidroclimáticos para a bacia do rio Xingu com o intuito de melhorar as simulações hidrológicas da bacia. Para o desenvolvimento desta nova base de dados, foram reunidas informações topográficas da bacia do rio Xingu, a partir das quais, utilizando uma ferramenta de Sistema de Informações Geográficas (SIG), foram extraídas informações sobre a direção de fluxo, áreas de aporte de fluxo acumuladas, área de drenagem e a delimitação de sub-bacias considerando a localização das estações de medição de vazões. As Unidades de Resposta Hidrológica uniforme (URH), foram consideradas como o resultado do cruzamento entre a informação topográfica e a cobertura do solo. O modelo digital do terreno foi utilizado para obter os diferentes ambientes ao longo da vertente, utilizando o algoritmo HAND para descrever a conectividade entre a vertente e a rede de drenagem. Logo foi realizada a obtenção e o controle de qualidade dos dados meteorológicos que alimentarão o modelo hidrológico: Precipitação, Pressão, Radiação, Velocidade do Vento, Ponto de Orvalho e Temperatura. Após todos os processos a base de dados está adequada para fornecer as entradas do Modelo Hidrológico Distribuído de Grandes Bacias do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE), iniciando assim o processo de calibração.

¹ Aluno do Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas- E-mail: wellington.junior@inpe.br

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

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre - E-mail: gustavo.luis@hotmail.com

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. BACIA DO RIO XINGU	3
3.1 Ciclo Hidrológico	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS	5
4.1 Dados Topográficos	5
4.2 Dados de Vegetação e Tipos de Solo	6
4.3 Dados Hidrometeorológicos	6
4.3.1 Dados Fluviométricos	6
4.3.2 Dados Meteorológicos	7
4.4. Metodologia	7
4.4.1 Extração da Direção de Fluxo	7
4.4.2 Extração das Áreas de Aporte de Fluxo Acumuladas	8
4.4.3 Extração da Rede de Drenagem	9
4.4.4 Unidades de Resposta Hidrológica uniforme	9
4.4.5 Implementação e Calibração do Modelo	10
5. RESULTADOS	11
5.1 Rede de Drenagem	11
5.2 Delimitação da Bacia	11
5.2 Obtenção das Unidades de Resposta Hidrológicas uniforme	12
5.4 Calibração do Modelo	13
6. DISCUSSÃO	15
7. REFERÊNCIAS	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia do rio Xingu.....	3
Figura 2 – Representação do ciclo hidrológico.....	4
Figura 3 - SRTM da bacia do rio Xingu.....	6
Figura 4 – Direção de fluxo da bacia do rio Xingu.....	8
Figura 5 – Áreas de aporte de fluxo acumulada.....	8
Figura 6 – Comparação da Rede de drenagem da bacia do rio Xingu.....	9
Figura 7 – Rede de drenagem da bacia do rio Xingu.....	11
Figura 8 - Delimitação das sub-bacias do rio Xingu.....	12
Figura 9 - Separação dos ambientes na bacia do rio Xingu.....	13
Figura 10 - Resultados da calibração para sub-bacia 7.....	14

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Amazonas, estende-se por cerca de 7 milhões de Km², contemplando 5 países, mais de 7 mil afluentes e é a maior bacia fluvial do mundo. Com descarga média anual do rio Amazonas de 175 mil m³/sec, a Bacia Amazônica representa 1/5 da água que é exultada ao oceano por todos os rios do planeta. Devido a esta dimensão, a bacia amazônica é foco de estudos e pesquisas de diversas áreas, desde engenharias até ciências socioeconômicas.

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

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma nova base de dados geomorfológicos e hidroclimáticos para a bacia do rio Xingu com o intuito de melhorar as simulações hidrológicas da bacia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

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

2.2. Objetivos Específicos

- 1) Desenvolver uma nova caracterização das unidades de resposta hidrológica uniforme.
- 2) Implementar e calibrar o Modelo Hidrológico Distribuído desenvolvido pelo INPE para modelar as vazões das bacias do rio Xingu;

3. BACIA DO RIO XINGU

A bacia do rio Xingu possui uma área de drenagem de aproximadamente 531.250 km², representando cerca de 13% da Bacia Amazônica (Figura 1), atravessando dois biomas: Cerrado e Amazônia. Destaca-se como uma das maiores bacias da Amazônia Brasileira, sendo subdividida em: Alto, Médio e Baixo Xingu, com vazão média anual de 7966 m³/s, se estende do estado de Mato Grosso até o Pará, onde esta localizado seu exutório.



Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Xingu

3.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é definido como um fenômeno de circulação fechada da água entre a atmosfera e a superfície terrestre. Rutkowski (1999) afirma que “a capacidade de cada localidade de sustentar as atividades antrópicas que são dependentes hídricas, é determinada pelo comportamento local do ciclo hidrológico”.

O ciclo hidrológico é o começo fundamental de tudo o que se refere à água no planeta (TUCCI, 2005), sendo este o modelo pelo qual se representam a interdependência e o movimento ininterrupto da água nas fases sólida, líquida e gasosa. Evidentemente, a fase de maior interesse é a líquida, essencial para o uso e para satisfazer as necessidades do homem e de todos os outros organismos, animais e vegetais (TUNDISI, 2003; SPEIDEL et Al., 1988).

Embora, o movimento cíclico da água não tenha princípio nem fim, costuma-se iniciar seu estudo descritivo pela evaporação da água dos oceanos e da superfície continental, onde se torna parte da atmosfera. A umidade atmosférica precipita-se tanto nos oceanos como nos continentes. Nestes, a água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, pode escoar pela superfície dos terrenos, cair diretamente sobre os cursos d’água ou oceano, ou pode infiltrar-se no solo, como pode ser visualizado na figura 3. Assim, o ciclo da água envolve vários e complexos processos hidrológicos.

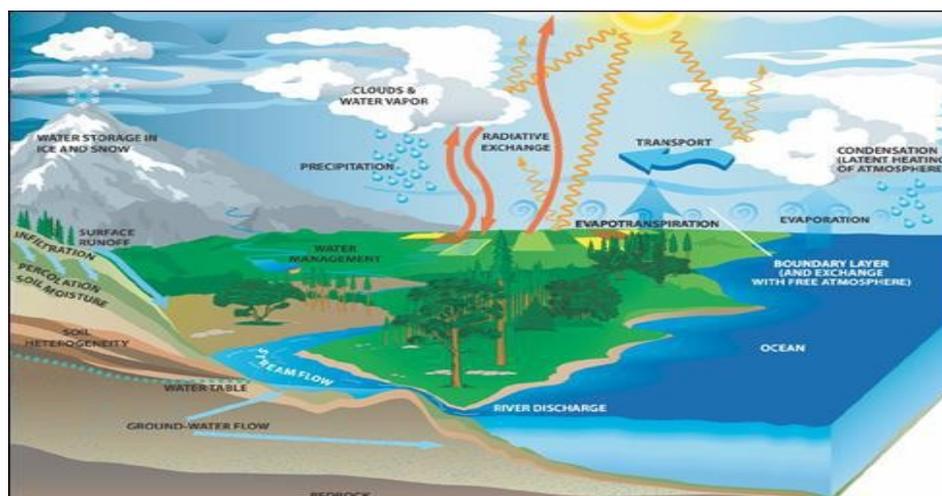


Figura 2 - Representação do ciclo hidrológico.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo teve como base a análise dos ciclos hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Xingu em conjunto a pesquisa dos modelos hidrológicos utilizados para realização de simulações e representação dos processos ocorridos em bacias fluviais. A modelagem hidrológica de grandes bacias necessita de informações geográficas, meteorológicas e fluviométricas, onde estas precisam ser tratadas de forma específica para serem utilizadas no modelo. Grande parte dos dados foram obtidos a partir de sensoriamento remoto juntamente aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Esta tecnologia refere-se a sistemas que realizam tratamento computacional de dados geográficos, armazenando a geometria e os atributos dos dados georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre em uma projeção cartográfica (VIOLA *apud* CÂMARA e MEDEIROS, 1998). Estas técnicas permitem levantar informações sobre um objeto, área ou fenômeno, por meio da análise de dados obtidos por um sensor que não esteja em contato com o objeto, a área ou o fenômeno em investigação (VIOLA *apud* LILLESAND e KIEFER, 1994).

A coleta de dados hidrológicos é importante, já que, quanto mais longos e precisos forem os registros, mais próximas e corretas serão as respostas aos diversos problemas da hidrologia (ANDRADE *apud* ANDRADE COELHO, 2006).

4.1 Dados Topográficos

O Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), é o resultado de um trabalho conjunto realizado pela *National GeoSpatial Intelligence Agency* (NGA) e a *National Aeronautics Space Administration* (NASA), com o objetivo de produzir um modelo topográfico digital de alta resolução para a terra (Saulo et al., 2010).

O STRM (Figura 2), com resolução de 90 metros, foi utilizada na elaboração deste trabalho com o intuito de obter o (MDE) Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Xingu. As

informações morfológicas da bacia e sua rede de drenagem foram obtidas a partir deste MDE, utilizando a ferramenta computacional Terra-Hidro (Rosim et al., 2012).

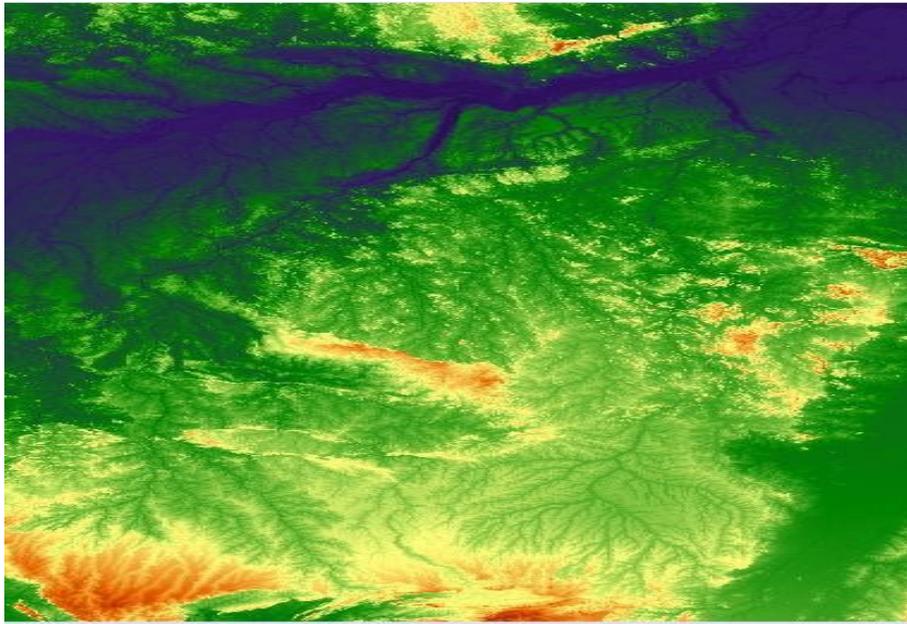


Figura 3 - SRTM da bacia do rio Xingu

4.2 Dados de Vegetação e Tipos de Solo

A cobertura vegetal e sua respectiva classificação atual foi obtida a partir do mapa desenvolvido pelo projeto PROVEG (SESTINI, et al, 2002). Este projeto é uma iniciativa que visa melhorar a representação da variabilidade espacial da vegetação nos modelos de previsão de tempo e clima, a partir da adaptação de uma base de dados mais detalhada e com parâmetros que representem de forma mais acurada as propriedades físicas dos solos e os tipos de vegetação do território brasileiro.

4.3 Dados Hidrometeorológicos

4.3.1 Dados Fluviométricos

As estações fluviométricas fornecem séries de vazão que são coletados diariamente por instituições responsáveis por manter e disponibilizar informações de vazão.

Para o estudo da bacia do Rio Xingu, o critério utilizado na escolha dos pontos das estações foi a existência de uma serie consistente de vazão.

As estações utilizadas correspondem a series históricas consistidas e disponibilizadas pela Agencia Nacional de Águas (<http://www.ana.gov.br/>).

4.3.2 Dados Meteorológicos

As variáveis meteorológicas permitem o cálculo da distribuição diária da precipitação e evapotranspiração sobre toda a região, informações que combinadas com dados de solo, permitem a estimativa do nível de água no solo.

Dentre os dados coletados utilizados estão:

Precipitação: fenômeno relacionado à queda de corpos d' água (chuva, neve, granizo) sobre a superfície da Terra.

Radiação Solar: designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética.

Temperatura do ar: métrica que descreve as transferências de energia térmica, associados com calor ou frio.

Ponto de orvalho: temperatura na qual o vapor de água presente no ar ambiente passa ao estado liquido na forma de pequenas gotas (chuva).

Velocidade do vento: parâmetro que determina o deslocamento de massas de ar ou simplesmente como estas se movimentam.

4.4. Metodologia

4.4.1 Extração da Direção de Fluxo

A direção de fluxo oferece informações sobre o caminho seguido pelo escoamento de água em cada pixel do MDE. Esta direção é obtida considerando seus oito

pixels vizinhos, seguindo a metodologia de Rennó et al (2008). Durante o processo de extração das direções de fluxo, o MDE é corrigido, eliminando sumidouros. A Figura 4 mostra uma ilustração da direção de fluxo.

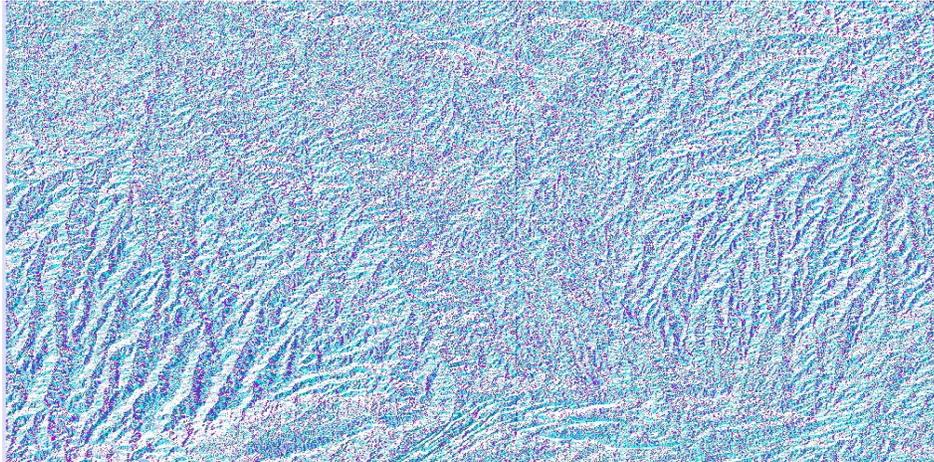


Figura 4 - Direção de fluxo da bacia do rio Xingu

4.4.2 Extração das Áreas de Aporte de Fluxo Acumuladas

O cálculo das áreas de aporte de fluxo é um passo essencial na obtenção das redes de drenagem da bacia, assim como na delimitação de sub-bacias e cálculo de suas áreas de aporte. O cálculo é realizado considerando as direções de fluxo para identificar todas os pixels que aportam para um determinado ponto da bacia. A Figura 5 mostra uma ilustração das Áreas de aporte de fluxo acumuladas.

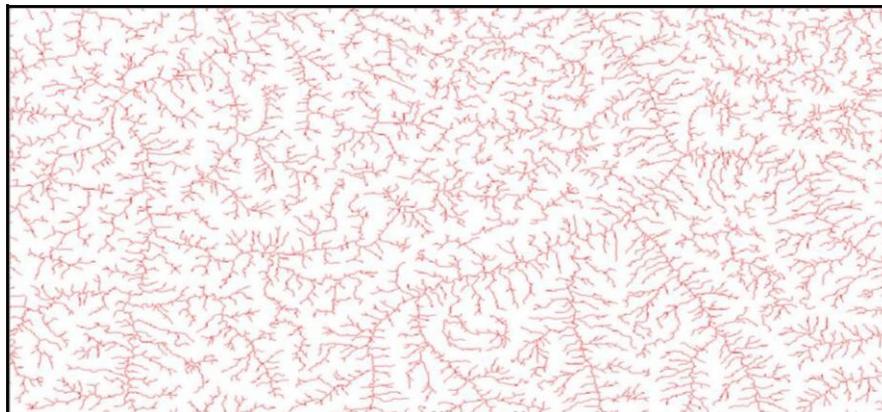


Figura 5 – Áreas de Aporte de Fluxo Acumuladas

4.4.3 Extração da Rede de Drenagem

A rede de drenagem identifica os locais da bacia onde o fluxo de água é canalizado através dos rios, permitindo o cálculo de longitudes e declividades dos trechos de rios. Para isto, é considerado um valor limiar de área acumulada, a partir do qual o fluxo de água é concentrado em canais. A rede de drenagem obtida desta forma foi comparada com a obtida pela Agência Nacional de Águas (ANA) com o intuito de verificar sua concordância, como mostra a Figura 6.

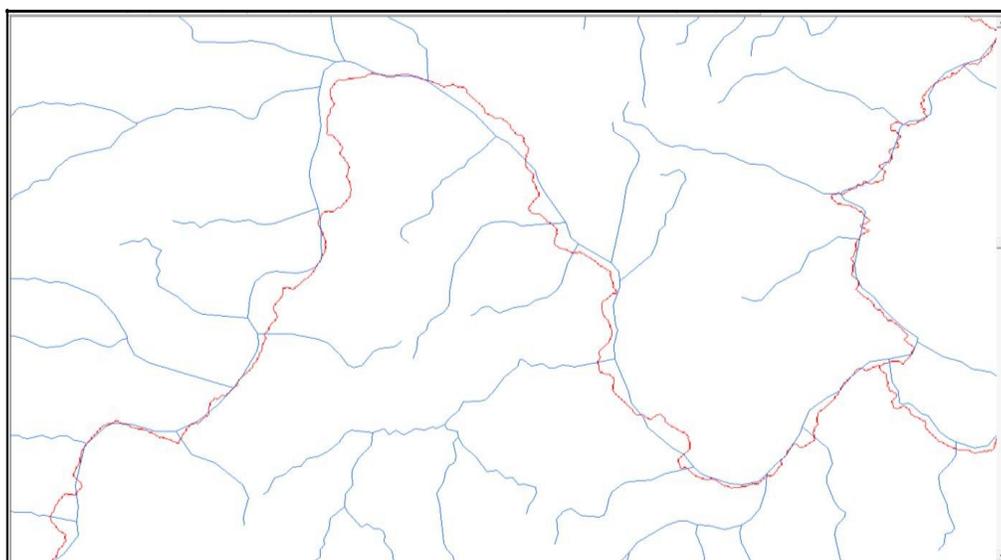


Figura 6 - Comparação da Rede de drenagem da bacia do rio Xingu.

4.4.4 Unidades de Resposta Hidrológica uniforme

Para confecção das Unidades de Resposta Hidrológicas Uniforme, constituiu-se o HAND - Height Above the Nearest Drainage (Renno et al 2009, Nobre et al., 2011). O modelo HAND tem como finalidade a normalização da topografia no que se refere a rede de drenagem através de conjuntos de procedimentos que são realizados a partir do Modelo Digital de Elevação. Dos conjuntos e procedimentos primeiro são executadas sequências computacionais para criar um novo Modelo Digital de Elevação

hidrologicamente coerente, para assim definir os caminhos de fluxo e delinear os canais de drenagem. O segundo procedimento utiliza-se como parâmetro as instruções de drenagem locais, juntamente com a rede de drenagem, com a finalidade de gerar uma drenagem mais próxima (Renno et al 2009, Nobre et al., 2011).

Os resultados obtidos são classificados em classes HAND, que são definidas com base em dados ou conhecimento do terreno local, gerando assim mapas de ambiente de solo. Para isto foram considerados os limiares sugeridos por Cuartas et al (2012), conforme é apresentado na Tabela 1.

Classes de Terreno Hand	Paisagens
HAND < 5.0 m	Baixio
5.0 m <= HAND <= 15.0 m	Ecótono
HAND > 15.0 m e Slope > 7.6%	Vertente
HAND > 15.0 m e Slope < 7.6%	Platô

Tabela 1 – Classificação HAND

4.4.5 Implementação e Calibração do Modelo

O MHD-INPE é composto por várias rotinas em Fortran que realizam a leitura e o processamento dos dados de entrada, os cálculos de balanço hídrico dentro de cada célula, a propagação de vazão pela rede de drenagem e a preparação dos dados de saída. Existem basicamente três procedimentos disponíveis no MHD-INPE: Simulação, Calibração e Previsão. Os procedimentos utilizados neste trabalho são: Simulação e Calibração.

Simulação: Este procedimento é aplicado visando a verificação dos dados de entrada exigidos pelo modelo.

Calibração: A calibração de modelos hidrológicos é um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente, até que o hidrograma calculado reproduza o hidrograma observado com boa precisão (Collischonn, 2001). Adicionalmente, podem ser utilizadas funções objetivos, que procuram quantificar a qualidade do ajuste dos hidrogramas (Tucci, 1998). Além disso,

podem ser utilizados métodos automáticos de otimização de parâmetros, como o método proposto por Duan et al. (1992, 1994), adotado no MHD-INPE.

5. RESULTADOS

5.1 Rede de Drenagem

A rede de drenagem foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação de 90 metros. Após definida a resolução das células na bacia, a rede de drenagem foi gerada de forma automatizada através do software TerraHidro.

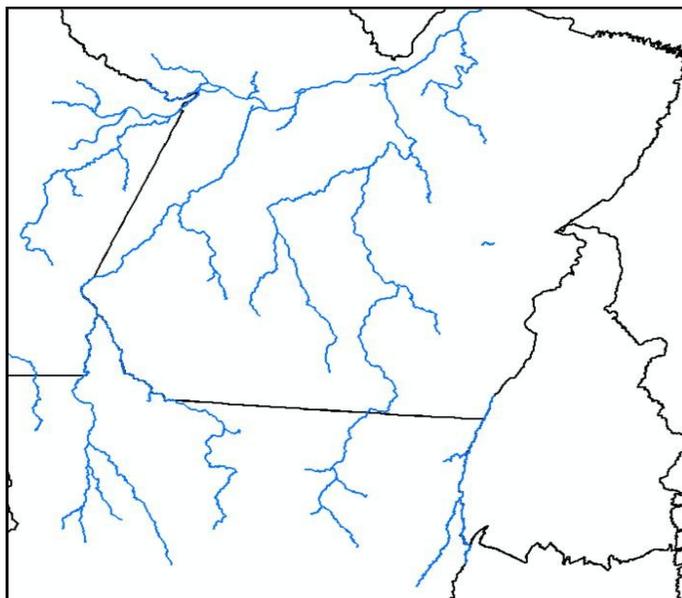


Figura 7 - Rede de drenagem da bacia do rio Xingu

5.2 Delimitação da Bacia

As sub-bacias (Figura 7) foram delimitadas a partir das coordenadas das estações disponibilizadas pela (ANA) Agência Nacional de Águas. O critério utilizado na escolha dos pontos das estações foi à existência de uma série consistente de vazão.



Figura 8 - Delimitação das sub-bacias da bacia do rio Xingu

5.2 Obtenção das Unidades de Resposta Hidrológicas uniforme

Considerando que o modelo MHD-INPE necessita das unidades de paisagens que refletem um comportamento hidrológico similar na exposição de variabilidade das características físicas de cada célula da bacia, por este motivo há a necessidade do uso das Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs), também conhecidas como blocos. Estas unidades são geradas através da combinação dos tipos de solo, cobertura vegetal e usos do solo.

Para confecção das URHs, utilizou-se o algoritmo HAND, no qual obteve como dado topográfico o Mapa de Elevação Digital obtido a partir do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). O fatiamento HAND em tipos de paisagens características da Amazônia foi realizado seguindo a metodologia proposta por Cuartas et al (2012).

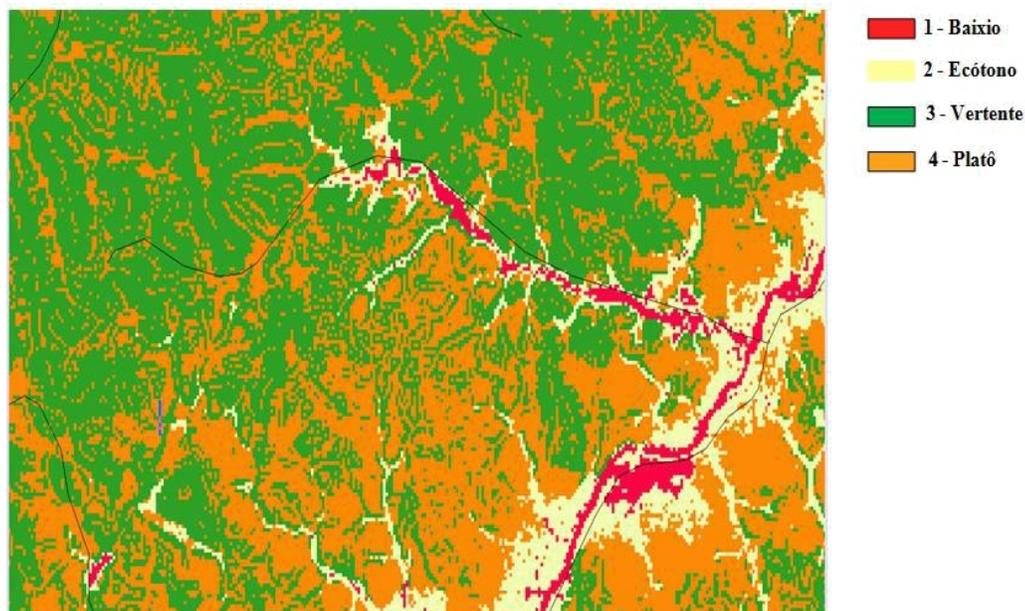


Figura 9 – Separação de ambientes na Bacia do rio Xingu

5.4 Calibração do Modelo

Após a implementação do modelo, deu-se início ao processo de calibração do MHD-INPE. Esta é realizada de acordo com os postos fluviométricos selecionados para o estudo, isto é, aqueles com mais informações disponíveis no período entre 1970-1990. Para calibração do modelo, foram consideradas quatro funções-objetivo: o coeficiente Nash-Sutcliffe aplicado às vazões (NSE) e o mesmo coeficiente aplicado ao logaritmo das vazões (NSLOG), o coeficiente de determinação (R^2) e o erro de volume (ΔV). O processo de calibração automática é realizado em forma iterativa através do método SCE-UA, proposto por Duan et al (1992,1994), implementado no modelo. Na Figura 7 e na Tabela 2 é apresentado o resultado do primeiro passo da calibração realizada na sub-bacia 7. O ajuste ainda não é satisfatório, mas, no primeiro passo, o modelo consegue capturar as recessões dos hidrogramas e a sazonalidade das vazões. Os parâmetros de calibração deverão ser ainda adequados para conseguir uma melhor representação dos picos.

Bacia	NASH	LNASH	R2
7	0.51	0.52	0.51

Tabela 2 - Funções objetivo dos postos fluviométricos

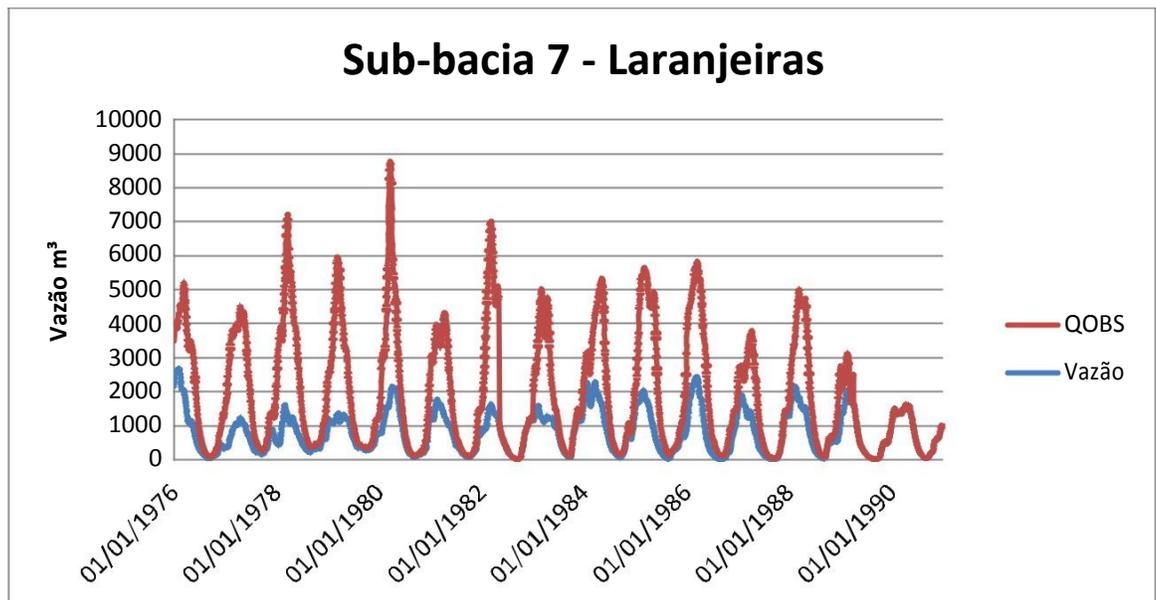


Figura 10 – Resultados da calibração para sub-bacia 7

6. DISCUSSÃO

Este trabalho, iniciado em Janeiro de 2016, teve por objetivo desenvolver uma nova base de dados geomorfológicos e hidroclimáticos para a bacia do rio Xingu, focando na descrição de unidades de resposta hidrológica uniforme, que consideraram um indicador de conectividade vertente-canal. Esta nova base de dados gerada é utilizada como entrada para o Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE). O processo de calibração foi apenas iniciado, mostrando a necessidade de adequação de parâmetros, principalmente para conseguir uma melhor representação dos picos dos hidrogramas.

7. REFERÊNCIAS

BRASÍLIA-DF. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/informacoeshidrologicas/redehidro.aspx>>. Acesso em: 17 mai. 2016.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 5, 22.

CUARTAS, L. A., TOMASELLA, J., NOBRE, A. D., NOBRE, C. A., HODNETT, M. G., WATERLOO, M. J., ... E FERREIRA, M. (2012). Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of hydrology*, 462, 15-27.

DPI/INPE. **TerraHidro - Sistema para Modelagem Hidrológica Distribuída**: Cachoeira Paulista, 2011. Color. Disponível em: <http://wiki.dpi.inpe.br/lib/exe/fetch.php?media=conhecer:terrahidro_10-06-10b.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2016.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 1015–1031, 1992. 4, 5, 22, 87.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Optimal use of the sce-ua global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, Elsevier, v. 158, n. 3, p. 265–284, 1994. 5, 22.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Manual de Implementação**, São Paulo, 84 pp.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., HODNETT, M., RENNÓ, C. D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A., ... & SALESKA, S., 2011: **Height above the nearest drainage—a hydrologically relevant new terrain model**. Acesso em 13/05/2016.

RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.112, n.9, p.3469-3481, 2008.

RUTKOWSKI, E. **Desenhando a Bacia Ambiental - subsídios para o planejamento das águas doces metropolitan(izad)as**. [Dissertação de doutorado, FAU/USP, 1999].

ROSIM, S; ABREU, E.S.; RENNO, C.D.; et al. **Terrahidro a distributed hydrological system to delimit large basins**. IGARSS 2012 – IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 2012, Munique. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International (2012), pp. 546–549.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da UFRGS ABRH 678p, 2005.

TUCCI, C. E. et al. Modelos hidrológicos. [S.l.]: UFRGS, 1998. 4, 22

VITAL, S. R. O.; SILVEIRA, T. A.; ALENCAR, H. M. Q.; FERREIRA, B. Uso de imagem SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para o mapeamento geomorfológico na microbacia do açude Taperoá II, Paraíba, Brasil. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2010. Disponível em:<https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/FotoeSR/SR_e_PDI/A_37.pdf>. Acesso em: 24/06/2015.