



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

APLICAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE MACRO- ESCALA NA BACIA DO RIO MADEIRA.

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

José Lázaro de Siqueira Júnior (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: jose.lazaro@cptec.inpe.br

Dr. Javier Tomasella (CCST/INPE, Orientador)

E-mail: javier.tomasella@inpe.br

COLABORADORES

Daniel Andres Rodriguez (CCST/INPE)

JULHO DE 2010

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Nome: **José Lázaro de Siqueira Júnior**

Local de Trabalho: **CPTEC / INPE**

Título do projeto: **Aplicação de um modelo hidrológico de macro-escala na bacia do Rio Madeira.**

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

Período: **Agosto/ 2009 – Agosto/ 2010**

APLICAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO DE MACRO-ESCALA NA BACIA DO RIO MADEIRA.

José Lázaro de Siqueira Júnior¹ (FATEC, Bolsista PIBIC/CNPq)
Javier Tomasella² (CCST/INPE, Orientador)
Daniel Andres Rodriguez³ (CCST/INPE, Colaborador)

RESUMO

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste em uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos, devido à possibilidade de predição dos impactos hidrológicos das mudanças do uso da terra e do cambio climático. Neste sentido, o presente trabalho objetivou a aplicação de um modelo hidrológico de macro-escala na bacia do Rio Madeira com intuito em estudar os processos hidrológicos da região. Para a simulação do ciclo hidrológico na região, foram coletadas informações por meio de sensoriamento remoto, tais como: mapas de solo, vegetação e uso da terra; e o modelo digital de elevação do terreno. Também foram coletados dados de chuva e meteorológicos da base de dados existente no Grupo PROCLIMA do CPTEC/INPE. A classificação de solos e valores de parâmetros associados foram obtidos da EMBRAPA/IBGE e da fundação ISRIC - *World Soil Information*, também conhecida como SOTERLAC. Após a coleta, os dados foram preparados para alimentação de um modelo de grandes bacias. Devido às anomalias e ausência de dados fluviométricos, necessitou-se de uma criteriosa análise e busca de fontes alternativas que fornecessem informações consistentes para o período escolhido para o estudo (entre 1970 à 1990). Nesta etapa de pré-processamento dos dados, foram utilizadas diferentes metodologias de processamento à atingir resultados aceitáveis, onde, obtiveram-se os objetos hidrológicos constituídos no processo de representação do ciclo, utilizando ferramentas de geoprocessamento e programas computacionais em FORTRAN essenciais à execução da tarefa. Cito como resultados desta etapa: modelo digital de elevação corrigido (depressões preenchidas), direções de fluxo, área acumulada, rede de drenagem, delimitação de sub-bacias, trechos de rio, declividades, classificação dos tipos de solos e vegetação, e dados das estações meteorológicas selecionadas. Para a calibração do modelo hidrológico foram definidos os valores dos parâmetros de solos, de vegetação e parâmetros fixos, focando a geração de vazões semelhantes às observadas. Os valores dos parâmetros de vegetação e solo para a simulação foram obtidos a partir de diversos trabalhos presentes na literatura existente atual; Já os parâmetros fixos foram definidos a partir das informações gerais do modelo, como por exemplo, início da simulação, número de células, etc. Para dar continuidade a este trabalho de iniciação científica e avaliação da acurácia do modelo hidrológico de grandes bacias em representar o comportamento hidrológico na bacia do Madeira, ficam determinadas as seguintes atividades: execução das tarefas de calibração, simulação e previsão para o modelo.

¹ Aluno do curso de Tecnologia da Informação: Banco de Dados - **E-mail: jose.lazaro@cptec.inpe.br**

² Pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terra - **E-mail: javier.tomasella@inpe.br**

³ Pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terra - **E-mail: daniel.andres@cptec.inpe.br**

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Bacia Hidrográfica.....	3
2.2 - Bacia Amazônica.....	3
2.3 Bacia do Rio Madeira - Área de Estudo e Topografia	5
2.3.1 - Características Físicas da Bacia	6
2.4 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico	7
2.5 Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias	9
2.6 Modelos hidrológicos.....	10
2.6.1 Modelo MGB-IPH	10
CAPÍTULO 3 - BASE DE DADOS E METODOLOGIA	13
3.1 Modelo Digital de Elevação - DEM.....	14
3.2 Mapa de Solo	15
3.3 Mapa de Vegetação.....	17
3.4 Mapa de Usos da Terra.....	17
3.5 Dados Fluviométricos	18
3.6 Dados Meteorológicos.....	19
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES	22
CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa mostrando o trajeto do rio Amazonas, seus principais afluentes e a área aproximada de sua bacia hidrográfica.....	4
Figura 2 - Localização da bacia do rio Madeira.....	5
Figura 3 - Bacia Amazônica e área de estudo	6
Figura 4 - Topografia da Bacia do Rio Madeira	6
Figura 5 - Ciclo hidrológico.....	8
Figura 6 - Representação dos processos de preparação dos dados	11
Figura 7 - Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem.	12
Figura 8 - Modelo Digital de Elevação do terreno para região em estudo	14
Figura 9 - Mapa de Solos SOTERLAC.....	15
Figura 10 - Mapa de Solos: EMBRAPA e SOTERLAC	16
Figura 11 - Mapa de Vegetação PROVEG	17
Figura 12: Mapa de usos do solo.	18
Figura 13: Localização dos postos fluviométricos utilizados.	19
Figura 14 – Precipitação 31/12/1990	21
Figura 15 – Precipitação 01/01/1970	21
Figura 16 - Direções de Fluxo.....	22
Figura 17 - Área Acumulada e Rede de Drenagem	23
Figura 18 - Sub-bacias e Rede de Drenagem.	23
Figura 19 - Delimitação da Bacia.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DEM - *Digital Elevation Model*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO - *Food and Agricultural Organization of the United Nations*

FORTTRAN - *Formula Translation*

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

ISRIC - World Soil Information

MGB - Modelo de Grandes Bacias

PMTCRH - Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos

PROCLIMA - Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Amazônica

SIG - Sistemas de Informação Geográfica

SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

UNESCO - *United Nations Educational Scientific and Cultural Organization*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas problemas e desafios em escala global começaram a surgir em relação a mudanças climáticas, alterações no uso do solo, desenvolvimento de novas técnicas de previsão do tempo e clima, que despertaram o interesse em realizar simulações hidrológicas em grandes bacias, com a necessidade de se representar fenômenos hidrológicos importantes para identificar impactos gerados pelas mudanças no clima e uso do solo sobre os recursos hídricos.

Em geral, a região amazônica vem sofrendo nos últimos anos muitas influências e modificações em seu ambiente natural, considerando as evolutivas formas de exploração da região como, por exemplo, retirada de madeira das florestas, desenvolvimento da agricultura e pecuária, construção de usinas hidrelétricas, entre outras formas de exploração de riquezas naturais; ocorrências que são preocupantes à sociedade, mas, por outro lado incentivam a pesquisa para suprir o desafio do entendimento destas conseqüências.

Estes estudos abarcam desde pequenas bacias (alguns hectares) á grandes bacias, cujas áreas excedem a 10.000 km², estas iniciativas além de contribuírem na agregação de esforços a análises e monitoramentos já realizados regularmente por agências como, por exemplo, a ANA - Agência Nacional Águas e o INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, fomentam e motivam a análise e interpretação dos complexos processos hidrológicos ocorridos em bacias hidrográficas.

A partir das medições (vazão, precipitação, etc.) realizadas por estas instituições, torna-se possível realizar análise do ciclo hidrológico de determinada bacia hidrográfica. Uma forma de se obter a variação temporal e espacial dos processos hidrológicos em grandes bacias é por meio do uso de modelos matemáticos, que utilizam equações físicas e empíricas para a representação desses processos (RIBEIRO, 2006).

A simulação hidrológica é uma técnica de gestão de recursos que torna possível analisar e fazer previsões dos impactos hidrológicos resultantes das mudanças do uso da terra e do cambio climático sobre os recursos hídricos. Neste sentido é que desenvolve a presente pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

A presente pesquisa busca realizar a aplicação de um modelo hidrológico de macro-escala na bacia do Rio Madeira.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os processos hidrológicos em macro-bacias na região Amazônica, em particular na bacia do Rio Madeira.
- Preparar as informações necessárias para alimentação do modelo hidrológico visando a consistência e representatividade das informações no processo.
- Aplicar um modelo hidrológico de grande escala na bacia do Rio Madeira, para uso em estudos de mudanças da cobertura da terra e cambio climático.
- Analisar as variações dos parâmetros hidrológicos e o modelo.
- Identificar informações relevantes para o estudo do impacto hidrológico na mudança do uso da terra e do cambio climático.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Bacia Hidrográfica

Uma bacia hidrográfica é uma determinada área de terreno que drena água, partículas de solo e material dissolvido para um ponto de saída comum, situado ao longo de um rio, riacho ou ribeirão (DUNNE e LEOPOLD, 1978)⁴. Em outras palavras, bacia hidrográfica ou fluvial é uma porção de terras cortada por um rio principal e seus respectivos contribuintes (afluentes), onde a sua organização natural se apresenta por ordem do rio de menor volume para os mais caudalosos, que vai das partes mais altas para as mais baixas, funcionando como uma espécie de funil.

Basicamente, uma bacia é um sistema que possui elementos de entrada (volume de água precipitado) e saída (volume de água determinado pelo escoamento), considerando como perdas intermediárias as porções de água que são evaporadas e/ou infiltradas. Dependendo da dimensão e área de determinada da bacia hidrográfica, podem existir inúmeras sub-bacias internamente à bacia principal.

Bacias hidrográficas são áreas físicas importantes em sua unidade de planejamento e gerenciamento de recursos, visto que determinada ação local ou isolada na bacia pode acarretar conseqüências abrangentes, devido às interligações dos seus componentes que são feitas a partir da integração dos rios.

2.2 - Bacia Amazônica

A bacia amazônica é a maior bacia fluvial do mundo. Com uma área de 7 milhões de km² aproximadamente, compreendendo terras de vários países da América do Sul (Peru, Colômbia, Equador, Venezuela, Guiana, Bolívia e Brasil). De sua área total, cerca de 3,8 milhões de km² encontra-se em território brasileiro, compreendendo os estados do Acre, Amazonas, Roraima, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Amapá. Nela existe um grande número de afluentes, a maioria deles detentores de um grande volume de água (Madeira, Tocantins, Xingu etc.). O rio que dá nome à bacia (Amazonas) tem sua nascente nos Andes, mais precisamente no Peru. Durante o percurso do rio, o mesmo é denominado de maneiras

⁴ Disponível em: http://www2.uel.br/pessoal/amanthea/ctu/temas/rh/bacias_hidro.pdf

distintas. No Brasil, por exemplo, seu primeiro nome é Solimões, e passa a ser chamado de Amazonas quando converge com o Rio Negro.



Figura 1 - Mapa mostrando o trajeto do rio Amazonas, seus principais afluentes e a área aproximada de sua bacia hidrográfica

Fonte: <http://www.ludusportal.com.br/pesquisa/html/geografia/amazonia.php>

De dimensões continentais, a bacia está situada na zona intertropical, recebendo precipitações médias anuais de 2460 mm. A descarga líquida média é estimada em 209.000 m³.s⁻¹. O aporte médio de sólidos em suspensão e do Rio Amazonas ao Oceano é estimado em cerca de 600 milhões de toneladas por ano.⁵

Devido às suas dimensões geográficas, a bacia Amazônica é afetada por variações climáticas em escala global. A previsão de impactos hidrológicos extremos na região é de suma importância para o desenvolvimento e controle das atividades regionais e do ecossistema.

⁵ Disponível em: <http://www.ana.gov.br/hibam/>

2.3 Bacia do Rio Madeira - Área de Estudo e Topografia

A bacia em estudo está localizada na região amazônica, banhando os estados de Rondônia e do Amazonas, com superfície aproximada de 1.420.000 km² e área de drenagem de 1.324.727 km². A bacia representa 23% do total da bacia Amazônica e se estende por Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%), possuindo as seguintes unidades proporcionais: Andes (15%), planície Amazônica (44%) e território brasileiro (41%). Devido a essa característica estrutural, verificam-se grandes altitudes na parte montante da bacia, vastas zonas de inundação na planície e a presença de cachoeiras no escudo brasileiro, principalmente próximo a Porto Velho.

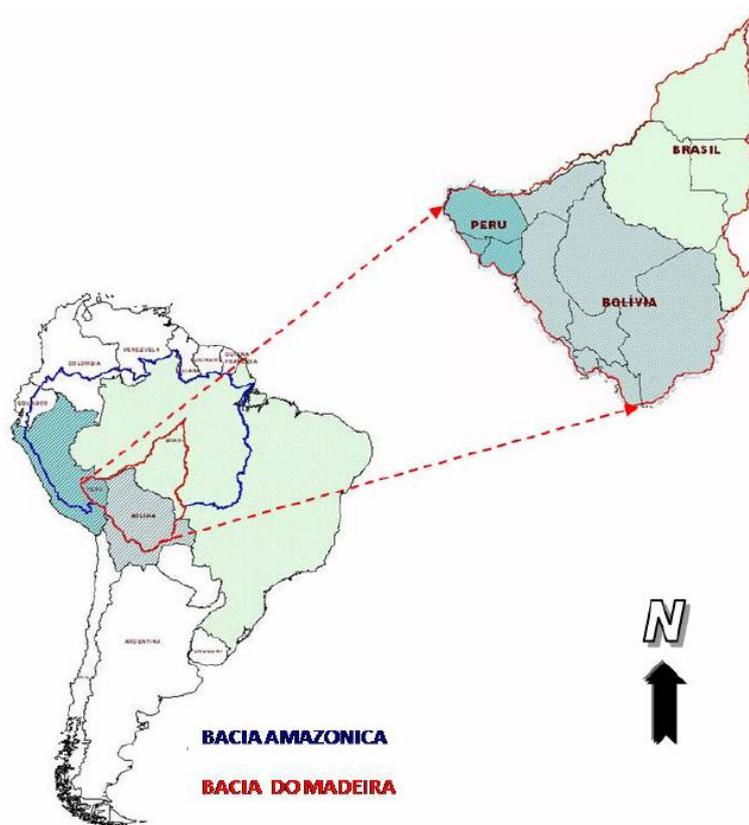


Figura 2 - Localização da bacia do rio Madeira
Fonte: ANDRADE (2008, p. 17)

A bacia do Madeira, assim como os outros afluentes meridionais da bacia Amazônica, possui baixa precipitação, coeficiente de escoamento e vazão específica, o que faz com que, apesar de sua área corresponder a 23% do total da bacia, sua contribuição para a descarga total seja de apenas 15%. As Figuras abaixo mostram a bacia Amazônica e a

localização da bacia do rio Madeira, juntamente com os principais rios formadores da bacia, e também a topografia da bacia em estudo.

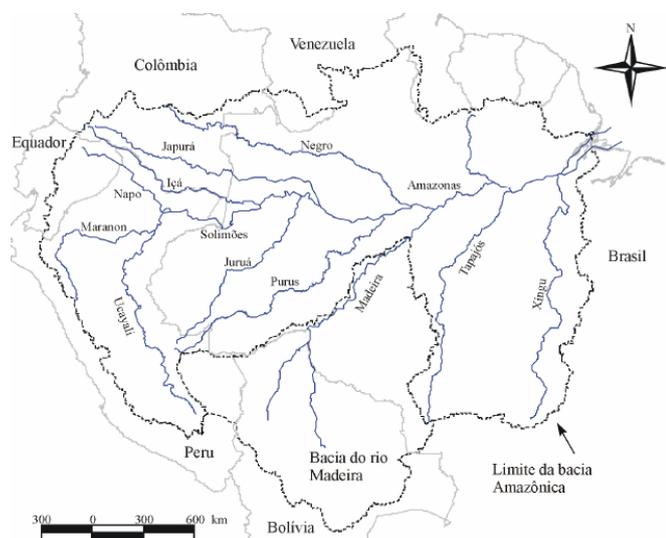


Figura 3 - Bacia Amazônica e área de estudo
Fonte: RIBEIRO (2006, p. 56)

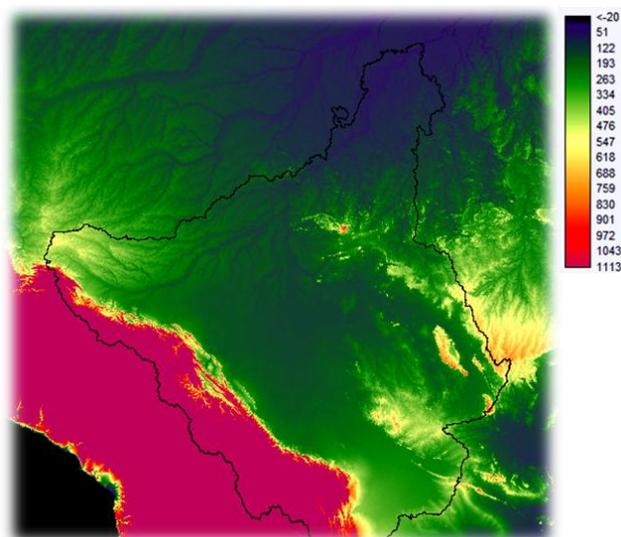


Figura 4 - Topografia da Bacia do Rio Madeira

Na figura 4, as cores escuras representam as menores altitudes e as cores que mais se destacam são as maiores altitudes. As regiões mais baixas correspondem às terras brasileiras e as regiões mais altas referem-se à cordilheira andina, no território Boliviano.

2.3.1 - Características Físicas da Bacia

A bacia do rio Madeira possui aspectos semelhantes à bacia Amazônica, caracterizando-se por um clima quente e úmido (clima equatorial) com temperatura média anual variando entre 24 e 26 °C na planície Amazônica. Nos planaltos e nos Andes a temperatura média é mais baixa, sendo que, no caso dos Andes, verifica-se inclusive precipitação em forma de neve (RIBEIRO, 2006).

O rio Madeira é o mais importante tributário do rio Amazonas, na parte sul da bacia Amazônica, com uma descarga média anual de 31.200 m³ s⁻¹ (ANDRADE *apud* MOLINIER *et.al.*, 1997), favorecendo e potencializando a geração de energia elétrica, uma vez que muitos afluentes do rio possuem características que se adéquam às condições básicas para a construção de usinas hidrelétricas.

A região do Madeira apresenta clima e relevo variados com elevadas altitudes na região Andina (Bolívia) aproximando-se de 6400 metros, até profundos vales atingindo a

planície amazônica com quase 500 metros; além das zonas de instabilidade climática, influenciados por fenômenos de circulação atmosférica e chuvas intensas determinando um alto índice de vazão, e umidade da esfera gasosa que envolve a terra.

A distribuição de chuvas pode ser explicada, em geral, pela dinâmica das principais massas de ar ativas em parte da América do Sul, e pela influência das montanhas na cordilheira dos Andes, tanto na escala continental quanto na escala de vales.

2.4 Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico

A compreensão do ciclo hidrológico é essencial para o entendimento dos fundamentos que envolvem a simulação hidrológica. O ciclo hidrológico representa o fenômeno global de circulação da água entre o ambiente terrestre e a atmosfera, que se realiza por consequência da rotatividade da terra, contribuição da energia solar, aquecimento do ar, do solo e do volume de água superficial, ou seja, um processo interativo de troca de água entre os rios, oceanos, superfícies terrestres e a atmosfera por diferentes formas: vapor d'água, chuva, neve e granizo.

A partir dos fenômenos supracitados e principalmente dos seus resultados (aquecimento), temos a circulação de massas de ar e a evaporação. O vapor d'água por meio de vários processos decorrentes dos acontecimentos se condensa e devolve os fluidos à terra em forma de chuva. Uma porção da água precipitada pode ser interceptada pela vegetação retornando à atmosfera por meio da evapotranspiração. O restante da água pode infiltrar no solo ou escoar sobre uma superfície até atingir um rio, lago ou mar, sendo que essa água poderá sofrer qualquer fenômeno natural durante o seu percurso. Dessa maneira, o ciclo hidrológico sofre vários processos: precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, evaporação, armazenamento e escoamento.

Dentro os principais processos de transferência que constituem o ciclo hidrológico estão:

- **Evaporação** dos oceanos e outros corpos d'água no ar e transpiração das plantas terrestres e animais para o ar.
- **Precipitação**, pela condensação do vapor de água do ar e caindo para a terra ou no mar.
- **Escoamento**, representando o movimento das águas na superfície terrestre ou do solo para os mares.

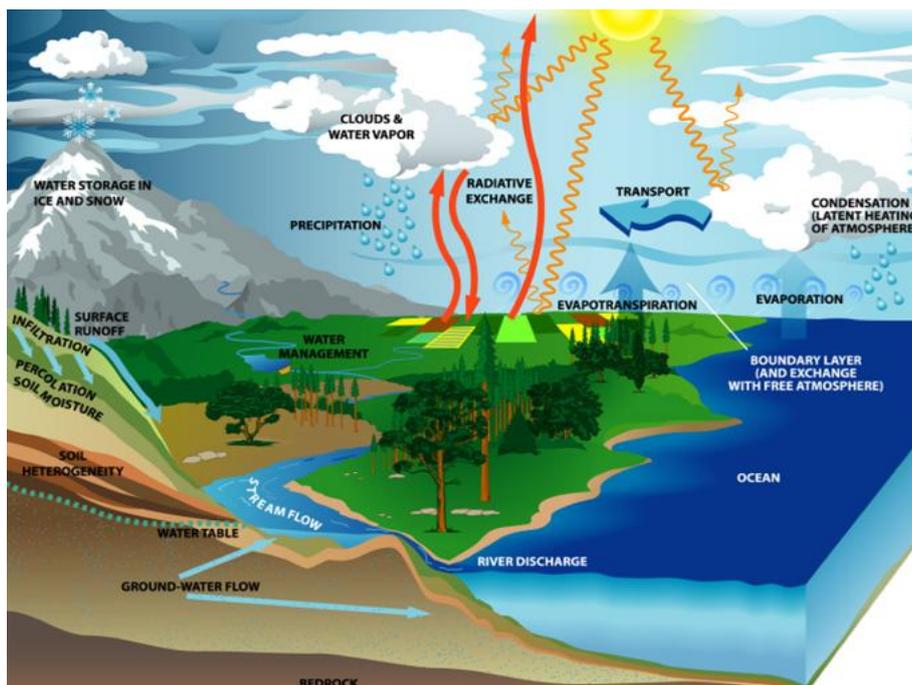


Figura 5 - Ciclo hidrológico

Fonte: <http://cd7.e2bn.net/e2bn/leas/c99/schools/cd7/website/BluePlanet.htm>

Para analisarmos o comportamento hidrológico de uma determinada bacia é essencial conhecermos os fatores que possuem relevância no ciclo da água. E para podermos explicar os fenômenos ocorridos neste processo e principalmente às vazões compreendidas no período, precisamos analisar o balanço hídrico.

O balanço hídrico numa determinada bacia hidrográfica refere-se às entradas e saídas de água que são ocorridas nela, representando o equilíbrio hídrico local. Tendo como sua principal entrada a precipitação e; as saídas: evapotranspiração e escoamento. O cálculo do balanço hídrico é feito pela seguinte fórmula:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - E - Q$$

Onde:

ΔV é a variação do volume de água armazenado na bacia (m³);

Δt é o intervalo de tempo considerado (s);

P é a precipitação (m³.s⁻¹);

E é a evapotranspiração (m³.s⁻¹);

Q é o escoamento ($m^3.s^{-1}$).

Por meio do balanço hídrico e suas representações matemáticas é possível identificar os fatores impactantes nos componentes do ciclo hidrológico e suas influências no clima da região.

2.5 Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias

Podemos compreender o conceito de simulação como a aplicação de um modelo matemático para representação do comportamento de um sistema, de maneira a produzir uma resposta, dado uma determinada entrada ou estímulo (TUCCI, 2005).

A simulação hidrológica pode ser utilizada para diversas aplicações como na estimativa de disponibilidade de recursos hídricos, previsão de vazões, análise de variações hidrológicas e conseqüências no uso do solo sobre os recursos hídricos. PIMENTEL e EWEN (2006) afirmam que a hidrologia de pequenas bacias difere da hidrologia de grandes bacias nos seguintes aspectos: variedade do relevo, diferentes usos e tipos de solo, diversidade da vegetação e representação da rede de drenagem. Portanto, podemos dizer que os modelos hidrológicos para pequenas bacias são inadequados à simulação de cenários globais.

O uso da terra e suas mudanças afetam as variáveis do ciclo hidrológico numa bacia. Estes efeitos, além de ser um resultado das características inerentes a cada tipo de uso da terra, são integradores de processos de características heterogêneas em diferentes escalas espaciais e temporais. Tais heterogeneidades, no caso do uso da terra, caracterizam-se por paisagens fragmentadas, constituindo um dos padrões de paisagem característico das florestas tropicais na atualidade, que afeta diretamente os processos ecológicos nos ecossistemas, assim como os processos hidrológicos e climáticos.

Mudanças no uso da terra são tipicamente estudadas como fenômenos locais, com impactos que decrescem com o tamanho da bacia. A escala do impacto destas mudanças depende do contexto em que elas acontecem. A mudança no uso da terra afeta a resposta hidrológica da bacia através do impacto direto na produção de água (BRUIJNZEEL, 2004; ANDREASSIAN, 2004), e também tem um efeito indireto através de mecanismos de retroalimentação (*feedbacks*) com o clima local. Por outro lado, os impactos gerados pelas mudanças no clima possuem uma maior escala, abrangendo pequenas e grandes bacias.

Em bacias de grande escala, os diversos componentes e processos hidrológicos apresentam um comportamento relativamente variável em coerência à sua escala. Esta não linearidade provém da existência de diversos tipos de uso da terra, de suas mudanças temporais, dos padrões espaciais da chuva e da existência de consumo de água para diversos e específicos usos dentro da bacia. Também se deve considerar o efeito da fragmentação da paisagem, que afeta localmente as variáveis do ciclo hidrológico e na agregação de processos dentro da bacia, bem como o processo de recuperação da evapotranspiração e da capacidade de infiltração (BRUIJNZEEL, 2004) que ocorre com floresta secundária (capoeiras). Estas características afetam a forma em que os efeitos da mudança no uso da terra e no clima se integram na resposta hidrológica de grandes bacias. A modelagem hidrológica, considerando diferentes cenários do clima futuro e diferentes condições de vegetação resulta ser uma poderosa ferramenta para o entendimento destes processos.

2.6 Modelos hidrológicos

Tradicionalmente existe uma dificuldade em estimar cotas de vazões mínimas, cotas de inundações, volume necessário para regularização dos fluxos etc., para bacias em grande escala. Alternativas diversas para simulação e previsão desses processos são comumente encontradas para regiões classificadas em pequena escala, onde seus processos possuem um grau de detalhamento elevado. Porém, em grandes bacias estes processos tornam-se inviáveis e precisam ser tratados de forma particular e específica, sendo necessário um embasamento físico para a representação da bacia. É proposta neste trabalho a utilização do modelo distribuído para grandes bacias MGB-IPH.

2.6.1 Modelo MGB-IPH

O modelo hidrológico de grandes bacias, também chamado de MGB-IPH é um modelo distribuído que foi projetado para ser aplicado em áreas excedentes á 10.000 Km². Construído por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o modelo em questão busca representar séries de vazão e previsão de vazões para uma determinada região, com base em informações referentes ao cenário local (vegetação, tipo de solo, topografia do terreno, rede de drenagem etc.), onde estas são confeccionadas previamente. Na figura 6 são apresentados os processos de preparação dos dados para o modelo.

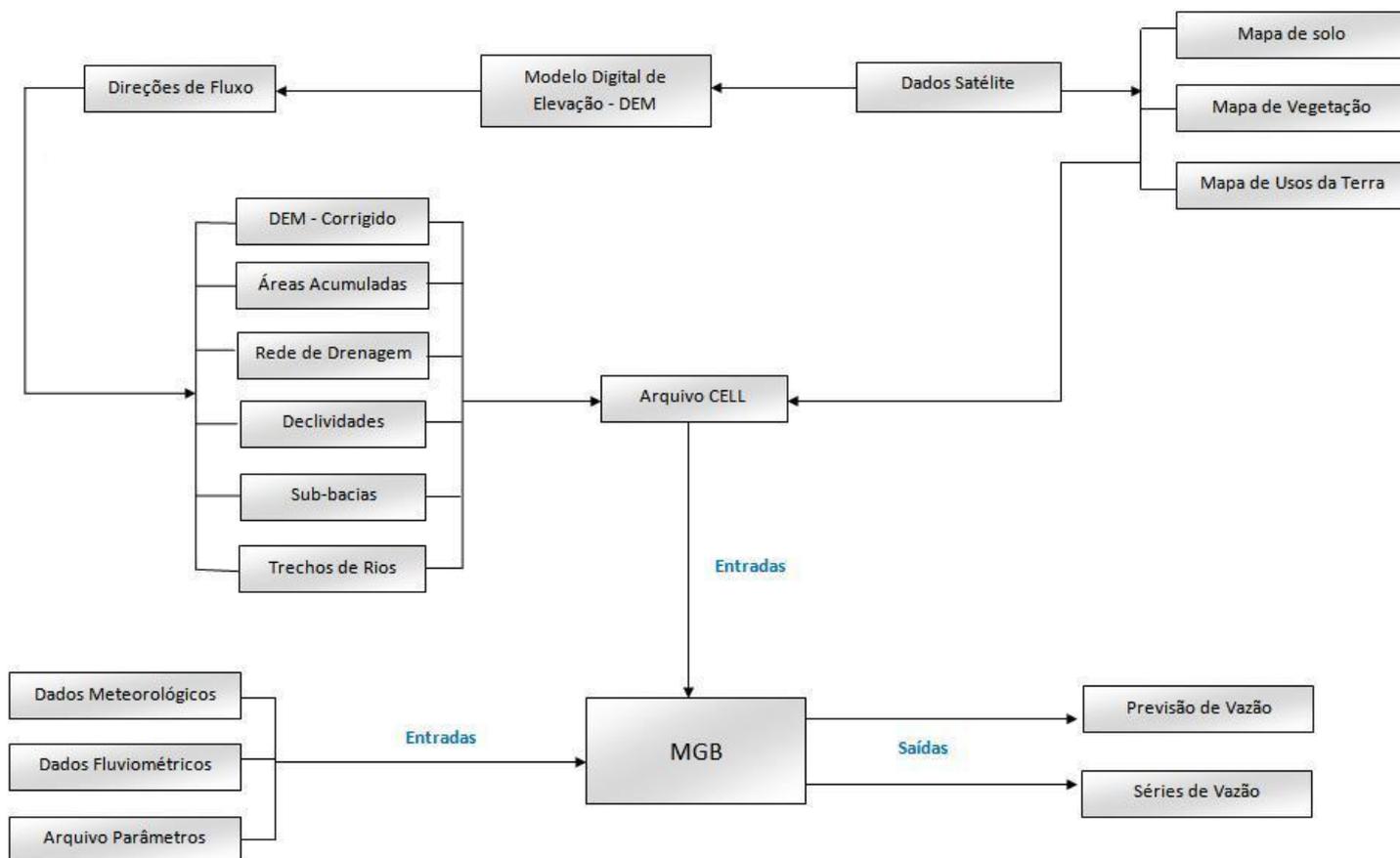


Figura 6 - Representação dos processos de preparação dos dados

Outras informações referentes a etapa de pré-processamento dos dados(MGB-GIS) podem ser encontradas em: http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/ClimaRH/software/MGB_Gis.htm.

O MGB trabalha com sub-bacias, para as quais são definidos parâmetros específicos que podem ser ajustados para uma melhor representação. O estabelecimento e escolha destes elementos são realizados considerando alguns pontos importantes, os principais são: objetivos do estudo, estações fluviométricas com informações consistentes disponíveis, mapas de solo, topografia, vegetação e usos da terra com qualidade e características detalhadas da região.

A bacia hidrográfica na qual será aplicado o modelo é dividida igualmente em células quadradas que são interligadas por canais de drenagem. Logo, a bacia delimitada é classificada em grupos que possuem as características mais frequentes de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo. Estas áreas agrupadas, também são nomeadas de blocos de usos dentro das células. A figura a seguir exemplifica uma bacia discretizada em células:

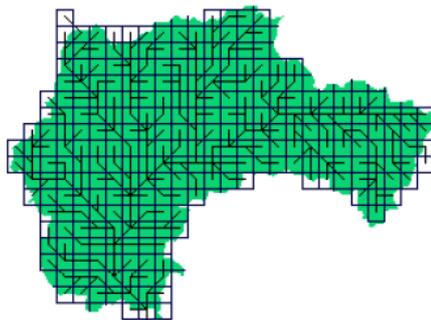


Figura 7 - Bacia discretizada em células ligadas entre si por canais de drenagem

Fonte: COLLISCHONN (2001, p. 47)

Os dados fluviométricos e climatológicos para cada célula devem ser interpolados de acordo com os seus postos climatológicos vizinhos ou aqueles mais próximos. O balanço de água no solo é realizado independentemente para cada bloco de uso, juntamente com suas características e parâmetros do referido bloco.

CAPÍTULO 3 - BASE DE DADOS E METODOLOGIA

Este estudo partiu inicialmente da análise dos ciclos hidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Madeira 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).

Para o pré-processamento das informações foram utilizadas variadas metodologias, dentre elas cito: rotinas específicas desenvolvidas em linguagem FORTRAN e para operações auxiliares de manipulação de arquivos o software de geoprocessamento IDRISI, considerando que o formato dos arquivos de entrada e saída das rotinas segue o padrão do software mencionado.

Inicialmente para geração das direções de fluxo foi utilizada a metodologia de preparação de informações topográficas proposta por JENSON e DOMINGUE(1988)⁶, em que são propostas rotinas específicas a cada etapa de preparação das informações. Porém os resultados apresentaram imprecisão e baixa qualidade, na representação da bacia do rio madeira. Para a mesma finalidade citada, não foi possível obter seguimentos satisfatórios utilizando o método de geração implementado no software IDRISI. A Metodologia utilizada

⁶ Disponível em: http://www.asprs.org/publications/pers/scans/1988journal/nov/1988_nov_1593-1600.pdf

que proporcionou resultados aceitáveis foi a proposta pelo MGB-GIS (PAZ, A. R.,2008) (Etapa inicial do processamento das informações para o MGB, com rotinas específicas à geração dos objetos hidrológicos).

Nesta seção, apresentam-se as bases de dados utilizadas na modelagem hidrológica da Bacia do Rio Madeira.

3.1 Modelo Digital de Elevação - DEM

O modelo digital de elevação (DEM) proporciona valores de altitude de uma determinada superfície ou parâmetros relacionados a topografia da região, a qual podem ser identificados montanhas, morros, depressões etc, com base em suas características fisiográficas que são definidas pela tendência das informações mais adequadas.

O DEM utilizado na pesquisa foi obtido do GeoPortal CGIAR-CSI, onde são fornecidos dados referentes ao mapeamento digital de todo o globo a partir do SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) com resolução espacial de 90 metros no Equador em forma de mosaicos de 5° x 5° graus⁷. A figura abaixo mostra o DEM da área de estudo:

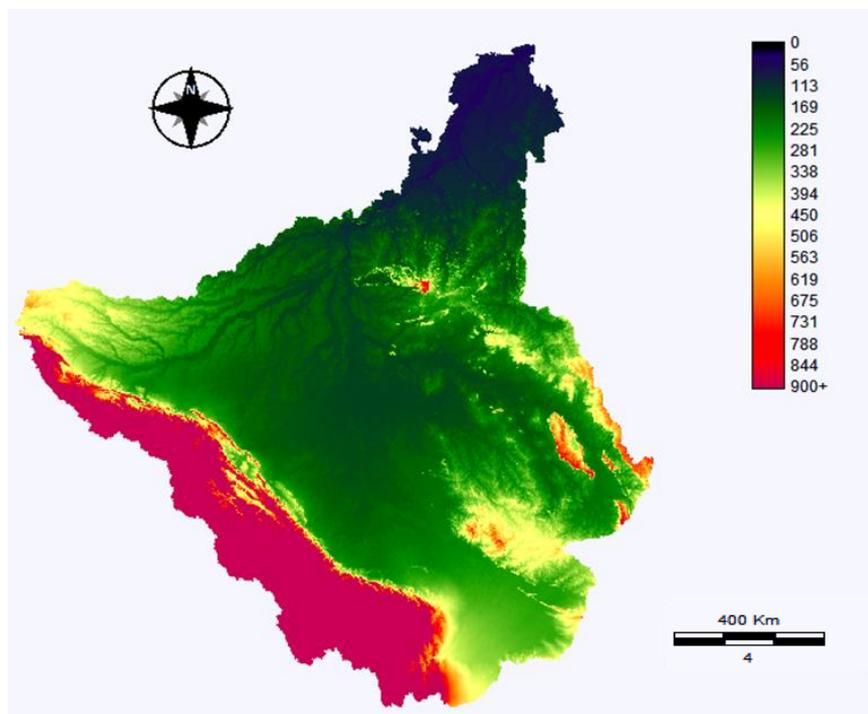


Figura 8 - Modelo Digital de Elevação do terreno para região em estudo

⁷ Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

3.2 Mapa de Solo

O mapa de solo utilizado foi obtido da fundação independente ISRIC - *World Soil Information* também conhecida como SOTERLAC. Esta organização objetiva realizar pesquisas e estudos aplicados ao uso da terra e recursos hídricos, visando manter, disseminar e disponibilizar dados de cobertura vegetal em nível global, contribuindo e fomentando ativamente à pesquisas científicas. Para agregar a estes esforços, diversos órgãos públicos nacionais e internacionais estão apoiando o trabalho desenvolvido pelo ISRIC, tais como:

- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO)
- JRC-IES - Institute for Environment and Sustainability (European Commission)
- United Nations Environment Programme (UNEP) - Cooperating Institute
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
- Wageningen University and Research Centre (Wageningen UR)
- Etc.

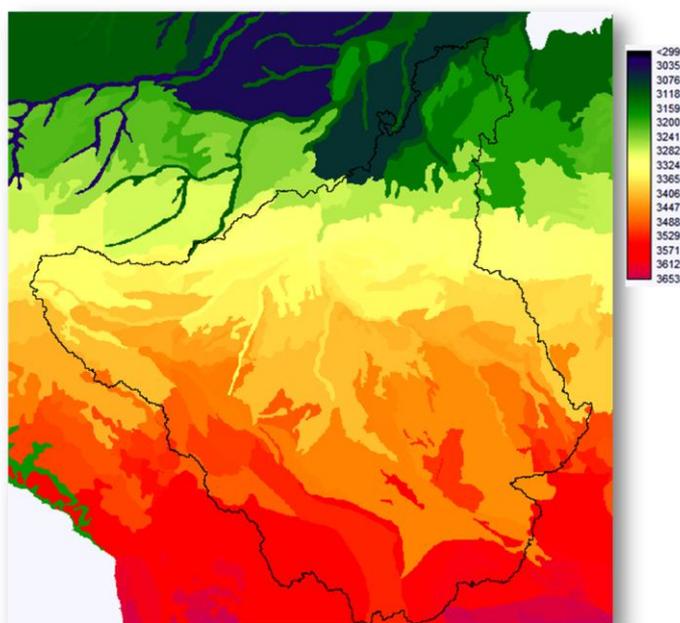


Figura 9 - Mapa de Solos SOTERLAC

Para analisar os dados e as informações contidas no mapa de solos da base ISRIC, foi necessário realizar a classificação e agrupamento dos tipos de solos, baseando-se em

características e propriedades estruturais dos seus componentes. Após, o agrupamento e classificação dos solos foi feito um comparativo entre os mapas do ISRIC e da EMBRAPA, apenas na porção de terras brasileira da bacia, pois, o mapa da EMBRAPA fornece informações somente para o território nacional, como mostra a figura abaixo:

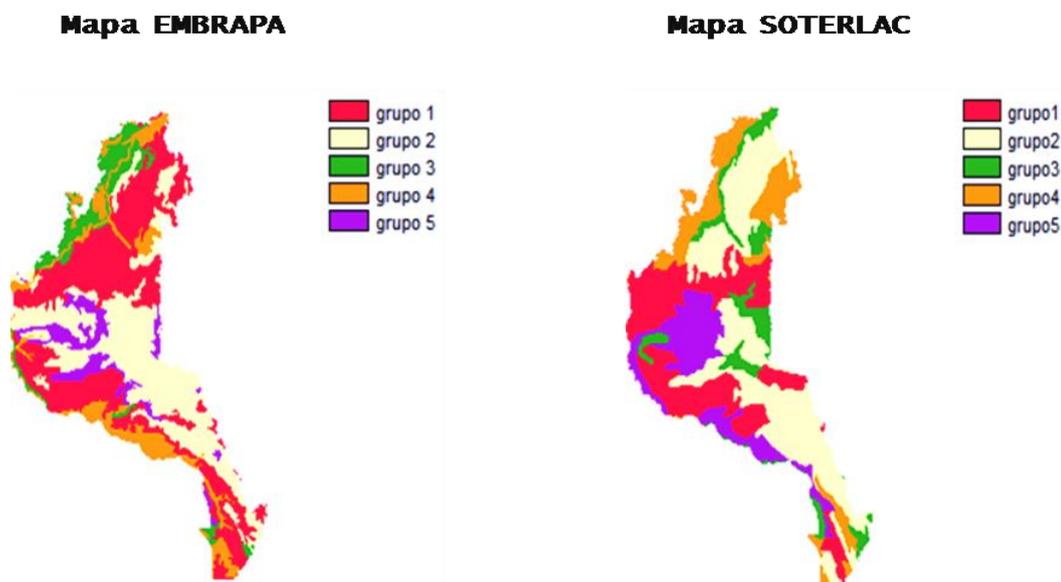


Figura 10 - Mapa de Solos: EMBRAPA e SOTERLAC

Pela análise dos mapas de solo da EMBRAPA e do SOTERLAC, podemos destacar que o primeiro apresenta maior detalhamento em suas características e propriedades físicas, visto que suas atualizações e melhorias são mais frequentes e constantes. Já o mapa do SOTERLAC representa as características da região de uma forma similar à base de dados da EMBRAPA (aspectos visuais e propriedades físicas), mas com proporções divergentes em relação a cada grupo. Nas tabelas abaixo, segue os tipos de solos das bases de dados utilizadas e seus respectivos grupos ao qual pertence:

Tabela 1 - Tipos solo EMBRAPA

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Latossolo	Nitissolo	Espodossolo	Gleissolo	Alissolo	Água
-----	Argissolo	Neossolo	Luvissolo	-----	-----
-----	-----	-----	Planossolo	-----	-----
-----	-----	-----	Plintossolo	-----	-----

Tabela 2 - Tipos solo SOTERLAC

grupo 1	grupo 2	grupo 3	grupo 4	grupo 5	grupo 6
Latossolo	Argissolo	Cambissolo	Gleissolo	Neossolo L.	Água
-----	Neossolo Q.	Neossolo F.	Luvissolo	-----	-----
-----	-----	-----	Planossolo	-----	-----
-----	-----	-----	G. Sálcos	-----	-----
-----	-----	-----	Neossolo R.	-----	-----

3.3 Mapa de Vegetação

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. Segue abaixo a representação do mapa de vegetação:

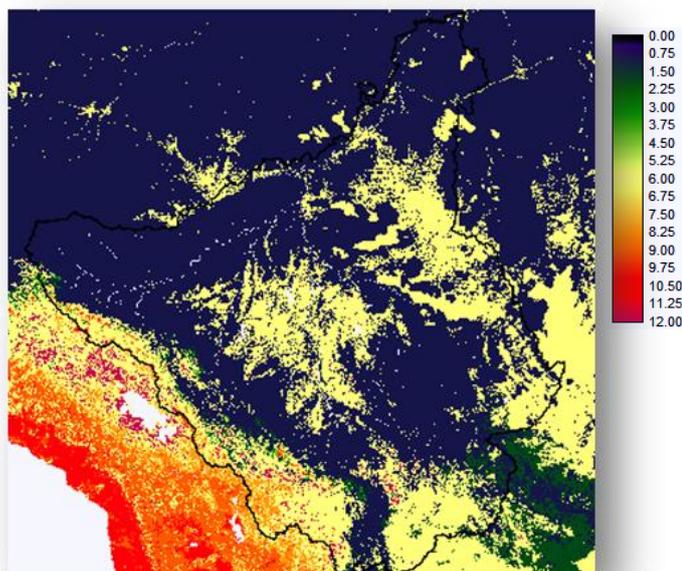


Figura 11 - Mapa de Vegetação PROVEG

3.4 Mapa de Usos da Terra

O mapa de usos da terra (cerrado, floresta e pastagem) foi obtido a partir do trabalho desenvolvido por CARDILLE e FOLEY (2003), onde foram utilizados dados

censitários e também dados de satélites para a representação da distribuição e evolução do uso da terra no período de 1940 e 1995. Segue abaixo uma amostra dos mapas utilizados:

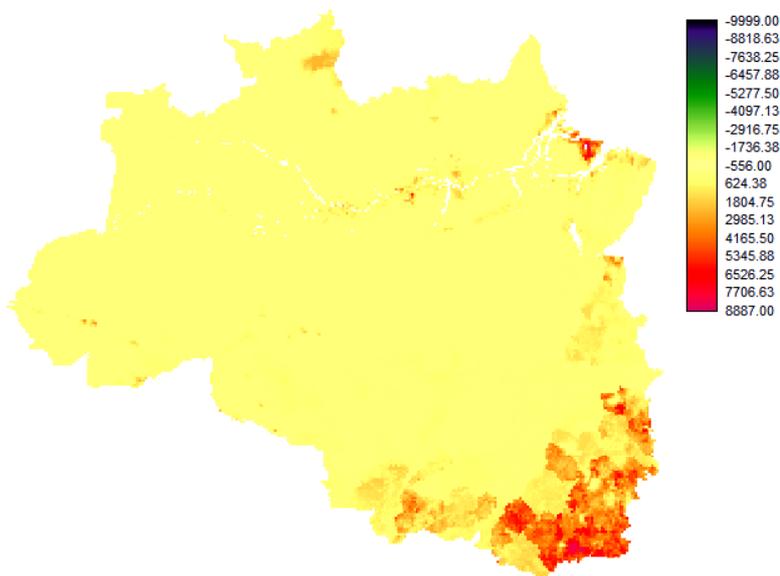


Figura 12: Mapa de usos do solo
Fonte: CARDILLE e FOLEY (2003)

3.5 Dados Fluviométricos

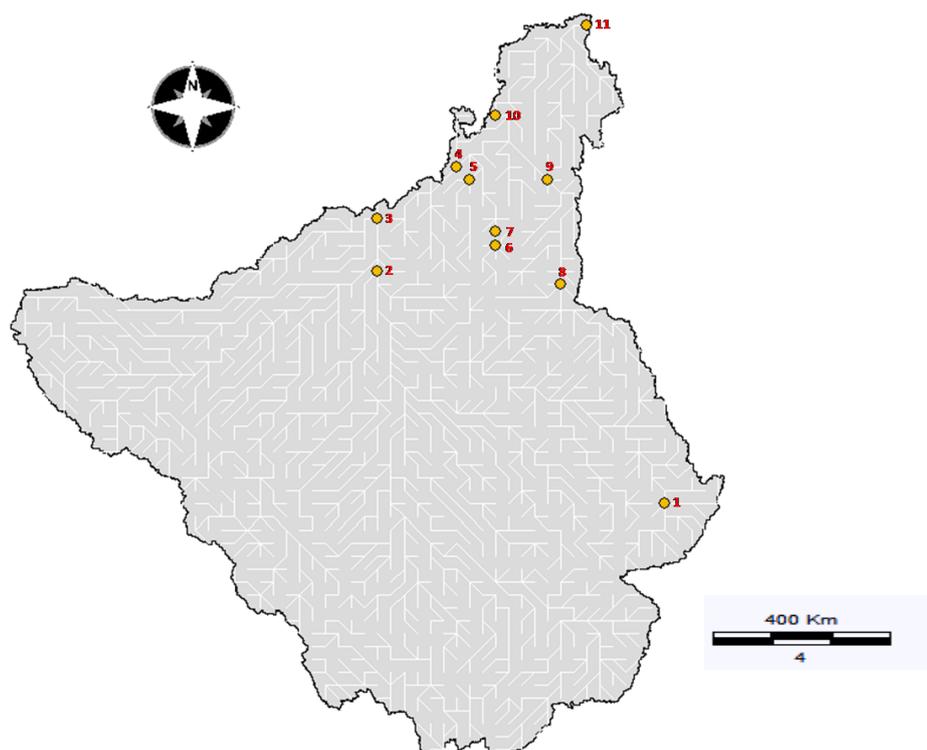
As estações fluviométricas fornecem séries de vazão que são coletados diariamente por instituições responsáveis por manter e disponibilizar informações de vazão. Estes dados podem ser utilizados para a comparação com as descargas simuladas pelo modelo hidrológico.

Para o estudo da bacia do Rio Madeira fez-se necessário uma análise minuciosa para escolha das estações utilizadas, visto que os dados de chuva fornecidos apresentam muitos erros e anomalias, não mantendo regularidade em seu grau de consistência.

As estações utilizadas correspondem a series históricas consistidas e disponibilizadas pela Agencia Nacional de Águas (<http://www.ana.gov.br/>). Abaixo segue uma tabela com informações referentes às bacias utilizadas no estudo:

Tabela 3 - Características das estações fluviométricas da área de estudo

Número	Nome da Estação	Código	Rio	Área de drenagem (km ²)
1	Mato Grosso	15120001	Rio Guaporé	23814
2	Guajará-mirim	15250000	Rio Mamoré	589497
3	Abunã	15320002	Rio Madeira	899761
4	Porto Velho	15400000	Rio Madeira	954285
5	Santa Isabel	15550000	Rio Candeias	12640
6	Humaitá	15630000	Rio Madeira	1066240
7	Ariquemes	15430000	Rio Jamari	7795
8	Ji-Paraná	15560000	Rio Ji-Paraná	33012
9	Tabajara	15580000	Rio Ji-Paraná	60212
10	São Carlos	15440000	Rio Jamari	9884
11	Manicoré	15700000	Rio Madeira	1157516

**Figura 13:** Localização dos postos fluviométricos utilizados

3.6 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da base de dados do grupo PROCLIMA - Programa de Monitoramento Climático em Tempo Real da Região Nordeste, executado pelo INPE/CPTEC e pelos Estados da Região Nordeste, Minas Gerais e Espírito Santo, através dos

núcleos e laboratórios estaduais participantes do PMTCRH - Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos. O PROCLIMA é uma iniciativa conjunta da SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - e do Ministério da Integração Nacional, para monitorar a estação chuvosa na Região Nordeste e fornecer informações meteorológicas em tempo real, realizando o acompanhamento da evolução da precipitação a nível diário, semanal e mensal.

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.
- Nebulosidade: refere-se à fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular.
- Radiação Solar: designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação electromagnética.
- Temperatura do ar: métrica que descreve as transferências de energia térmica, associados com calor ou frio.
- Umidade relativa do ar: é a relação existente entre a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do mesmo ar no ponto de saturação a mesma temperatura.
- Velocidade do vento: parâmetro que determina o deslocamento de massas de ar ou simplesmente como estas se movimentam.

As figuras abaixo mostram o nível de precipitação na região de estudo em dois períodos distintos: dezembro/1990 e janeiro/1970.

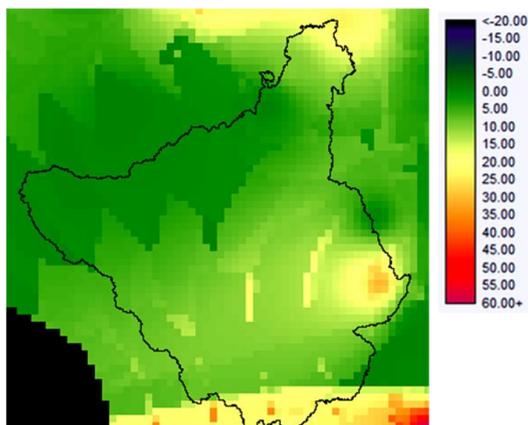


Figura 14 – Precipitação 31/12/1990

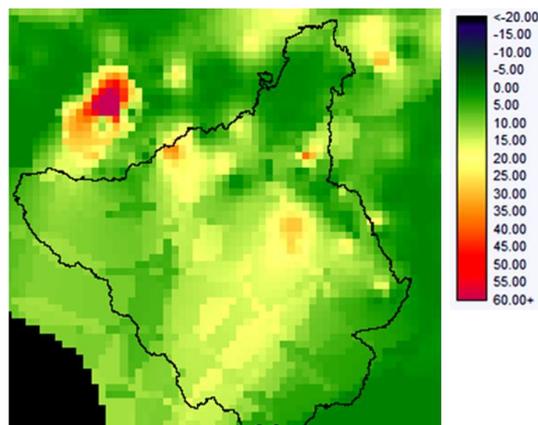


Figura 15 – Precipitação 01/01/1970

Os dados climatológicos foram interpolados e ajustados conjuntamente à entrada do modelo de grandes bacias, ou seja, após a interpolação obteve-se uma base com informações diárias com todas essas variáveis relacionadas.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES

As sub-bacias selecionadas para o estudo são correspondentes às estações fluviométricas citadas anteriormente, estas representam apenas parte da bacia Amazônica. O método utilizado para a geração da rede de drenagem e para a extração das sub-bacias combina o uso de imagens (Modelo Digital de Elevação - DEM e declividade do terreno) obtidos a partir de tecnologias de sensoriamento remoto.

Para a geração das sub-bacias foi necessário realizar uma amostragem (*resample*) do modelo digital de elevação original para uma amostra na resolução de 500 metros, pois, não foi possível a obtenção de uma rede de drenagem satisfatória numa malha mais fina (maior resolução) utilizando a mesma metodologia.

Apresentam-se nesta seção os resultados de todo o processo de preparação dos dados ou obtenção dos objetos hidrológicos para utilização no modelo:

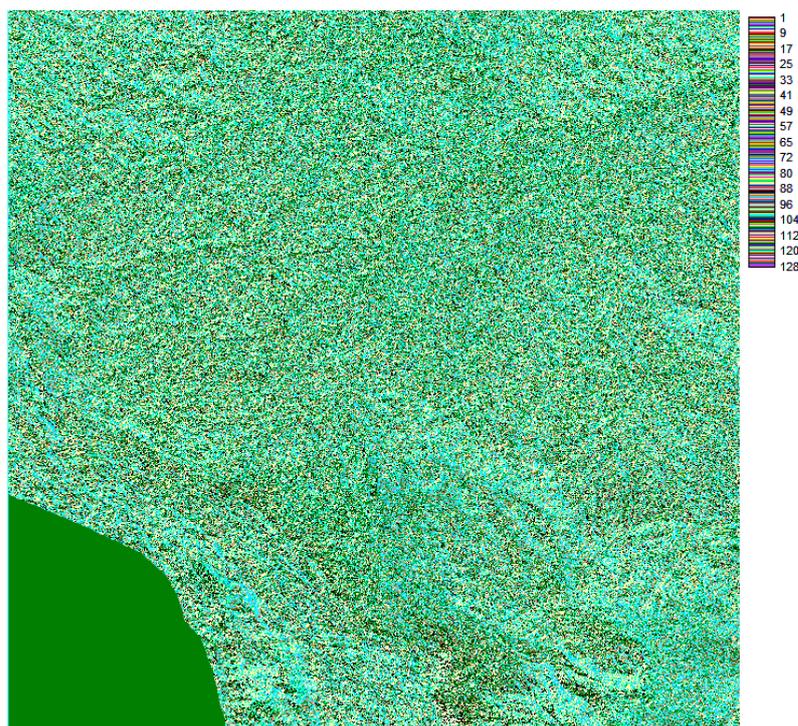


Figura 16 - Direções de Fluxo

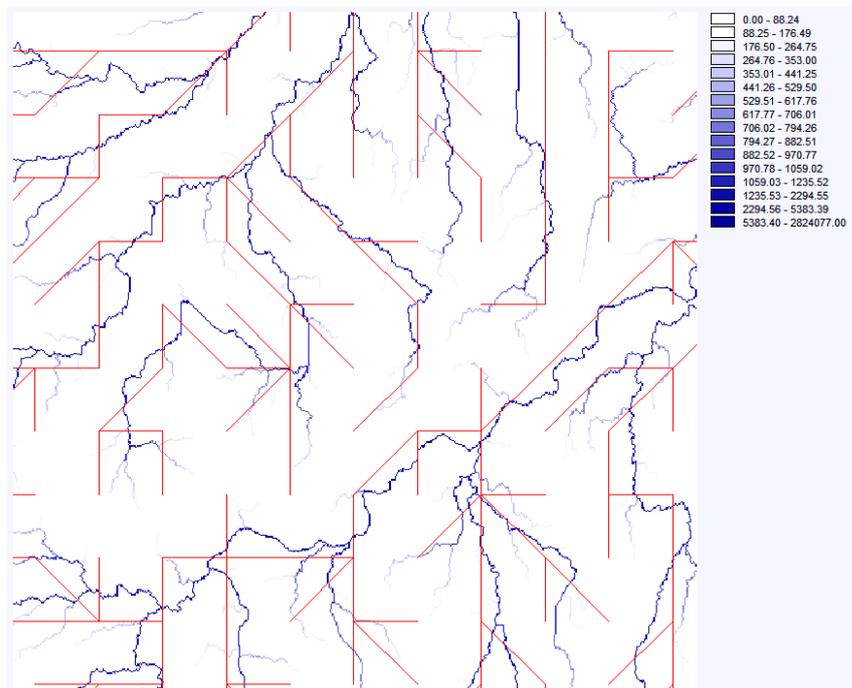


Figura 17 - Área Acumulada e Rede de Drenagem

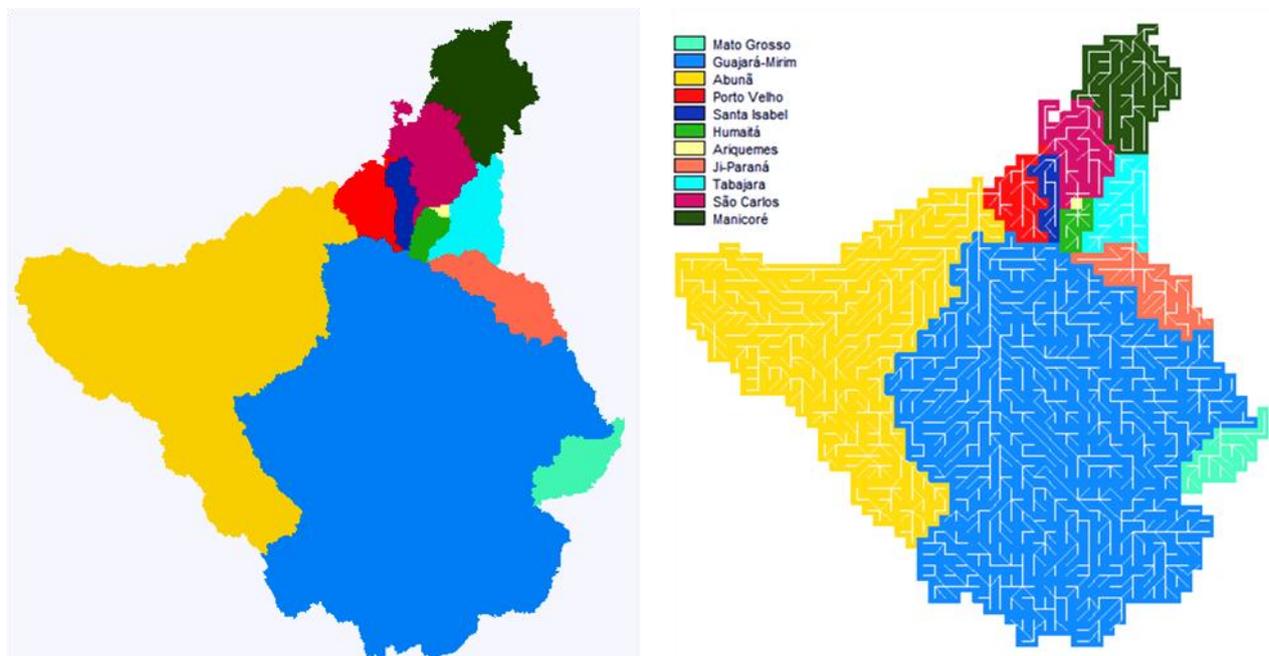


Figura 18 - Sub-bacias e Rede de Drenagem

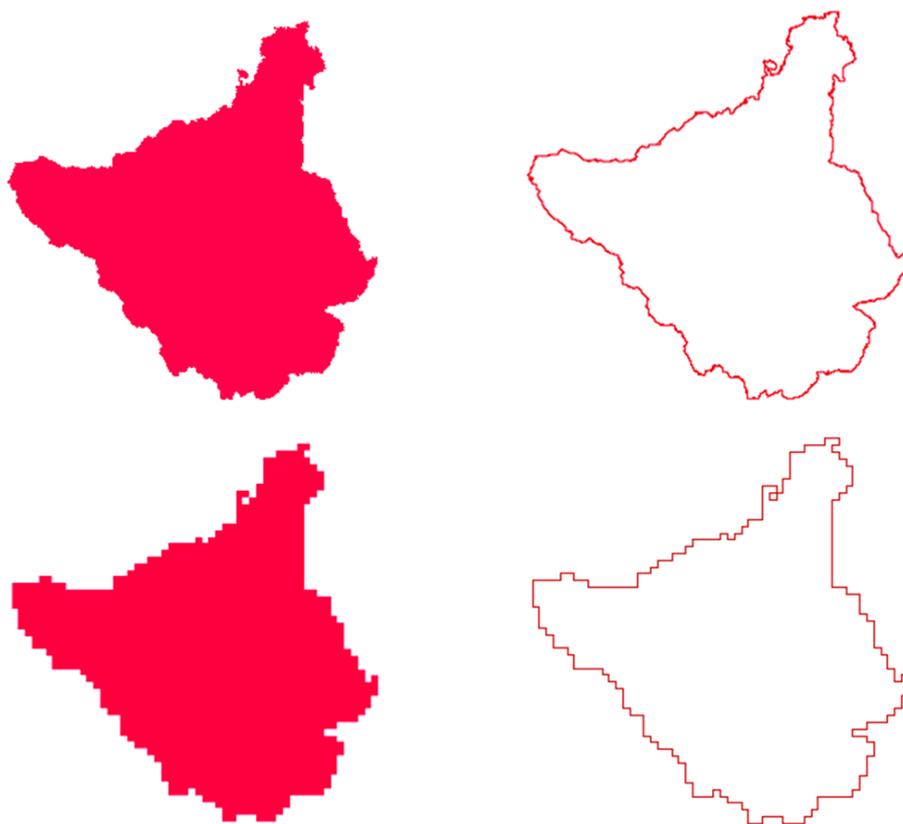


Figura 19 - Delimitação da Bacia

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal estudar o processos hidrológicos na bacia rio do madeira, assim como, preparar todo o conjunto de informações necessárias à utilização e avaliação do modelo.

A metodologia utilizada para pré-processamento dos dados e geração das entradas para o modelo de grandes bacias foi satisfatória, visto que os produtos obtidos apresentaram boa qualidade em suas características e propriedades, representando de forma adequada o cenário da região.

Em geral, os dados de fluviométricos disponibilizados pela ANA apresentaram boa qualidade e consistência, mas, para determinados postos havia apenas informações mensais de vazão acumulada ou simplesmente não tinha informação nenhuma.

As bases de dados utilizadas em sua totalidade proporcionaram a formação das entradas para o modelo satisfatoriamente, permitindo realizar a representação dos principais objetos do cenário da região.

Apresenta-se agora sugestões de atividades que podem ser realizadas para dar seguimento à este trabalho:

- Executar um modelo hidrológico em macro-escala e analisar os resultados gerados a partir das simulações;
- Avaliar a acurácia do modelo desenvolvido para simular processos hidrológicos em grandes bacias da região Amazônica;
- Realizar otimizações na rotina implementada na etapa de pré-processamento, responsável pela geração das direções de fluxo com intuito em reduzir o tempo de processamento e execução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. D.: **Análise pluviométrica da bacia transfronteiriça do rio Madeira**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.2008.

ANDRÉASSIAN V.: **Waters and forests: from historical controversy to scientific debate**. Journal of Hydrology, V. 291, I. 1-2, p. 1-27, 2004.

BROWN, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. **A review of paired catchments studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation**. Journal of Hydrology, v.310, p.28-61, 2005.

BRUIJNZEEL, L. A.: **Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?** Agriculture, Ecosystems & Environment, v.104, p.185-228, 2004.

COLLISCHONN, W.: **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, p. 46-48, 2001.

JENSON, S. K. e DOMINGUE, O. : **Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis**, PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING, Vol. 54, No. 11, November 1988, pp. 1593-1600.

PAZ, A. R., MGB-GIS (2008), **Manual do Usuário**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS, versão 2.0.

PIMENTEL DA SILVA, L. e EWEN, J., 2000, “**Modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas metodologias**”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5, n. 4, pp. 81-92.

RIBEIRO NETO, ALFREDO: **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira** [Rio de Janeiro] 2006. XVII, 178 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SESTINI, M. F. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos.** São José dos Campos: INPE, 2002.

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

U.S. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Séc. 4, Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1985.

VIOLA, M.R. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG /** Marcelo Ribeiro Viola. -- Lavras : UFLA, 2008. 120 p. : il.

Bacias Hidrográficas, conceitos e exemplos. Disponível em: http://www2.uel.br/pessoal/amanthea/ctu/temas/rh/bacias_hidro.pdf. Acesso em: 13/10/2009.

Introdução ao Fortran 90, Apostila de Treinamento. Disponível em: http://www.cenapad.unicamp.br/servicos/treinamentos/apostilas/apostila_fortran90.pdf. Acesso em: 08/09/2009.

Notas de Aula de Hidrologia. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/apostila-de-hidrologia-pdf-a48571.html>. Acesso em: 08/03/2010.