

**INPE-13269-MAN/45**

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO MHD-INPE**  
**MANUAL DE IMPLEMENTAÇÃO**  
**Versão 1.0**

Manual para aplicação do Modelo  
Hidrológico Distribuído – MHD-  
INPE, desenvolvido pelo Instituto  
Nacional de Pesquisas Espaciais.

INPE - CCST  
Cachoeira Paulista, SP  
2016

**AUTORES:**

Anne Caroline Negrão

Caio Pages Camargo

Daniel Andrés Rodríguez

Elisa de Oliveira Giornes

Gustavo Luiz Nascimento Pinto

Javier Tomasella

José Lázaro de Siqueira Júnior

Lucas Garofolo Lopes

Maria Cecília Rodríguez do Prado

## RESUMO

O Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE representa os processos de transformação da chuva em vazão usando uma abordagem conceitual das componentes do balanço hídrico e da propagação de escoamento na bacia, que é discretizada em grades regulares. Em cada unidade de grade (denominada célula) são simuladas as trocas de matéria e energia entre a superfície e a atmosfera, variações de armazenamento no meio saturado e não saturado e escoamentos horizontais. O escoamento é propagado baseado na conectividade entre as células, cuja direção e sentido é definida pela rede de drenagem da bacia. Este manual descreve as diferentes etapas para a aplicação do modelo hidrológico MHD-INPE, desde a preparação dos dados de entrada até a interpretação dos dados de saídas. Detalha os procedimentos de Calibração, Simulação e Previsão através de exemplo de aplicação do modelo.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	5
2 Modelo hidrológico Distribuído MHD-INPE.....	1
2.1 Discretização da bacia .....	3
2.2 Dados de entrada do modelo.....	5
2.2.1 CELL.HIG .....	5
2.2.2 PARTOP.HIG.....	7
2.2.3 Dados Meteorológicos: Prec.bin e Met.bin .....	7
2.2.4 Dados meteorológicos previstos: PrePrev_<data>.bin e MetPrev_<data>.bin ...	8
2.2.5 Dados de vazões observadas: Qobs.hig .....	8
2.2.6 Arquivo de parâmetros fixos: ParFix.hig .....	9
2.2.7 Arquivo de parâmetros de escoamentos: ParBacia.hig .....	10
2.2.8 Arquivo de parâmetros de solos: ParSolo.hig .....	11
2.2.9 Arquivo de parâmetros de vegetação: ParVeg.hig .....	13
2.2.8 Arquivos de parâmetros de uso e cobertura do solo: Blocos.hig e URH_<ano>.hig .....	16
2.2.9 Arquivo de parâmetros calibráveis: ParAjuste.hig .....	18
2.3 Aplicação do Modelo .....	20
2.3.1 Simulação.....	20
2.3.2 Calibração: arquivo Calibra.hig.....	21
2.3.3 Previsão: arquivo ParPrev.hig .....	23
2.4 Medidas de Desempenho .....	24
2.4.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões .....	24
2.4.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões .....	25
2.4.3 Erro relativo de volume.....	25
2.4.4 Coeficiente de correlação das vazões .....	26

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27
ANEXO A - O MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO MHD-INPE .....	31
ANEXO B - TerraHidro .....	37
ANEXO C - ParTop .....	63
ANEXO D - Cria Entradas .....	75
ANEXO E - Cria entradas previsão .....	78
ANEXO F - Unidades de Resposta Hidrológicas .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

Um modelo hidrológico é uma representação simplificada do ciclo hidrológico, ou de uma parte dele, usando equações matemáticas que representam os diferentes processos. O domínio utilizado na maioria dos modelos hidrológicos é a bacia hidrográfica, uma vez que pelo princípio de conservação da massa a vazão de saída da bacia deve ser igual à soma das trocas líquidas entre a bacia e a atmosfera somado à variação de água armazenada na bacia.

Como muitos processos hidrológicos têm natureza complexa e por vezes não totalmente conhecidos, a sua representação matemática apresenta limitações, sendo necessárias simplificações e ocasionalmente parametrizações desses processos.

Além disso, os modelos podem diferir quanto a estrutura, podendo ser, por exemplo, concentrados ou distribuídos, estocásticos ou determinísticos, dentre outras características, sendo alguns métodos mais adequados que outros de acordo com diferentes aplicações. Portanto, a escolha de um modelo deve ser baseada nas características da área de estudo e na finalidade da modelagem. A escolha do detalhamento da simulação (escala espacial e temporal do modelo) depende das informações básicas disponíveis, que são utilizadas na representação e parametrização de processos e da capacidade computacional.

O Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE) é um modelo determinístico e distribuído. Já se mostrou satisfatório em simular condições históricas em grandes bacias (Mohor et al., 2015) e tem entre suas principais aplicações estudos de mudança e uso de cobertura do solo (Rodriguez e Tomasella; 2015), mudanças climáticas (Siqueira Jr et al. 2015) e prognóstico de vazões (Falck et al. 2015).

## **2 Modelo hidrológico Distribuído MHD-INPE**

O Modelo Hidrológico Distribuído do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MHD-INPE) (Rodriguez e Tomasella, 2015; Siqueira Jr et al. 2015; Mohor et al., 2015; Falck et al. 2015) foi desenvolvido a partir do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (Collischonn, 2007), tendo como principais modificações os processos de estimativa de evaporação, interceptação e a separação de escoamentos na célula.

O modelo representa os processos através de formulações conceituais de balanço hídrico e propagação de escoamento. Para tanto, utiliza-se uma distribuição espacial por grades regulares, sendo que em cada unidade de grade (célula) são simulados os processos do ciclo hidrológico cujo escoamento resultante é propagado por uma rede de drenagem. Para isso, o modelo está subdividido nos seguintes módulos de resolução:

- Balanço d'água no solo;
- Evaporação de superfície de água livre, áreas saturadas, interceptação e transpiração da vegetação (evapotranspiração);
- Escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo em cada célula;
- Escoamento na rede de drenagem.

O MHD-INPE foi desenvolvido com o intuito de interagir com modelos atmosféricos em estudos de mudanças ambientais globais. Por isso, a bacia é subdividida em uma grade de células regulares, o que facilita o intercâmbio de informações entre modelos. O tamanho da célula pode variar de acordo com a região onde está sendo aplicado.

Em cada célula podem ser considerados diversos tipos de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) resultantes da combinação de características locais da paisagem, como, por exemplo, o uso e cobertura do solo e os tipos de solo. Cada URH possui parâmetros associados que determinam os processos de geração de escoamento. O MHD-INPE utiliza como informação de entrada as percentagens de cada tipo de URH dentro da célula, compondo os fluxos totais na célula através de uma média ponderada dos fluxos resultantes de cada URH.

Para a resolução da evapotranspiração e dos fluxos d'água na célula, o modelo considera

três camadas de solo. A camada superficial é responsável pela geração do fluxo superficial e pela resposta imediata às demandas atmosféricas. A camada inferior é responsável principalmente pela manutenção da resposta hidrológica da bacia durante a época de menores precipitações, ou seja, o fluxo de base. Por último, o MHD-INPE inclui a presença de uma camada de solo intermediária, responsável pelo retardo da recarga subterrânea com relação à ocorrência de chuvas, e pela manutenção da evapotranspiração durante a época seca em presença de vegetação com raízes profundas.

A estimativa da evapotranspiração na bacia é obtida pelo método proposto por Penman-Monteith (Allen et al., 1998), utilizando como dados de entrada as variáveis meteorológicas: temperatura do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar e umidade relativa do ar.

No MHD-INPE, os processos de geração de escoamento e a separação de fluxos são simulados através da combinação de conceitos de distribuição probabilística da capacidade de armazenamento, utilizada no modelo Xinanjiang (Zhao, 1992; Zhao e Liu, 1995), com os princípios utilizados no TopModel (Beven e Kirkby, 1979). Ambas metodologias correlacionam a resposta hidrológica da bacia com padrões de auto-organização observados na grande escala (Sivapalan, 2006).

A parametrização da geração de escoamento, utilizando conceitos topográficos, foi concebida para bacias onde os principais mecanismos de geração de escoamento correspondem a excesso de saturação e escoamento subsuperficial. Na parametrização proposta, o fluxo de base é obtido considerando a existência de uma relação entre a profundidade do lençol freático e o índice topográfico.

A perda d'água por interceptação é simulada no modelo através da metodologia proposta por Gash et al. (1995). A captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989). Cada célula do modelo possui um canal ao qual são entregues excedentes do balanço d'água através de reservatórios lineares simples. O transporte d'água entre células é realizado exclusivamente através da rede de canais, considerando a metodologia de Muskingum-Cunge para o traslado da onda (Tucci, 1998).

Maiores detalhes sobre o procedimento de cálculo e das equações envolvidas são apresentados no Anexo A.



O modelo MHD-INPE também conta com uma rotina de calibração automática, baseada no método de otimização SCE-UA proposto por Duan et al. (1992). O método de otimização apresenta propriedades desejáveis no conceito de calibração de modelos hidrológicos, são eles: (1) a convergência global, na presença de várias regiões de atração, (2) a capacidade de evitar mínimos locais da função objetivo, (3) robustez na presença de parâmetros com diferentes sensibilidades e de interdependência de parâmetros, (4) não-dependência da disponibilidade de uma expressão explícita para a função objetivo, (5) capacidade de lidar com um grande número de parâmetros ao mesmo tempo. Informações detalhadas do método estão disponíveis em Duan et al. (1992, 1994). É importante salientar que a calibração automática não é obrigatória na implementação do modelo.

A implementação do modelo hidrológico requer a preparação de uma série de dados de entrada, chamada de pré-processamento. Estes dados incluem as características biogeofísicas da bacia e suas forçantes climáticas. Nesta etapa, são coletadas diversas informações como o modelo digital de elevação, mapas de uso do solo, cobertura vegetal, tipos de solo e dados de postos pluviométricos e fluviométricos, utilizados para alimentar o modelo.

## **2.1 Discretização da bacia**

A discretização de uma bacia é a sub-divisão da área de drenagem em unidades menores e a organização destas unidades menores segundo um ordenamento topológico. A versão MHD-INPE representa espacialmente a bacia por uma grade regular onde cada subdivisão é chamada de célula. Essas células são comunicadas entre si por canais de drenagem retificados, que representam a rede de drenagem da bacia de uma maneira simplificada (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007), conforme apresentado na Figura 1.

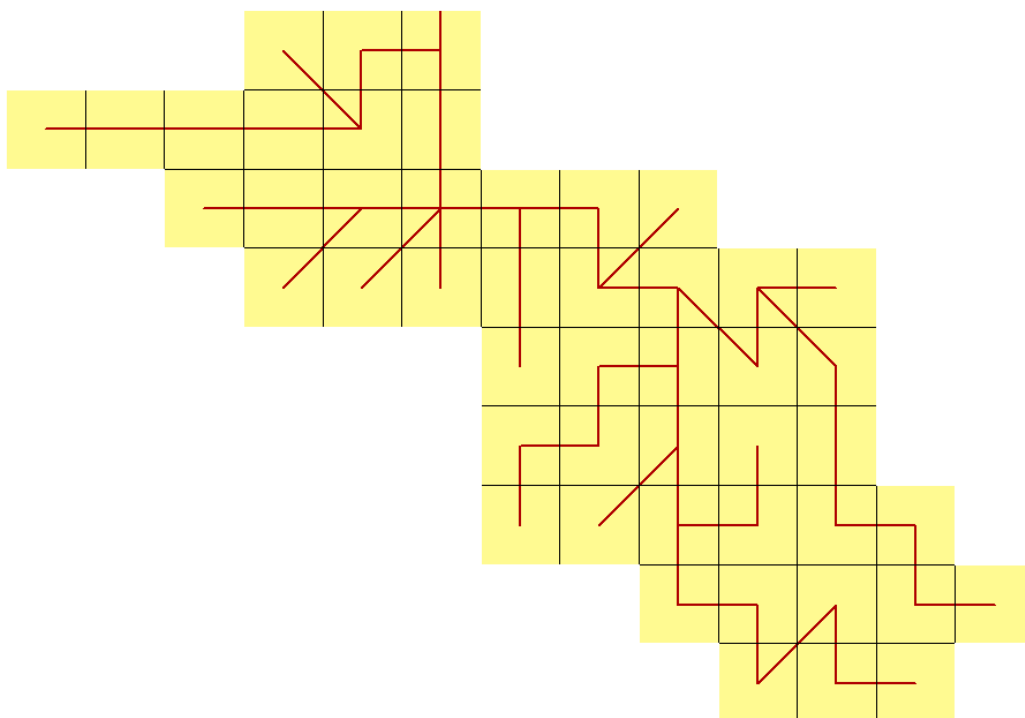


Figura 1: Bacia hidrográfica do Ji-Paraná dividida em células quadradas ligadas por linhas que ilustram a rede de drenagem.

O modelo também permite adotar uma divisão por sub-bacias, que são definidas pelas seções de interesse dentro da bacia, como, por exemplo, estações fluviométricas com dados disponíveis, reservatórios, obras hidráulicas, cidades, etc. Essa subdivisão é opcional, mas ela é útil para o processo de calibração do modelo hidrológico. Dessa forma, os níveis de subdivisão que são adotados no MHD-INPE são:

- Bacia Hidrográfica: região hidrográfica de estudo simulada pelo modelo;
- Sub-bacia Hidrográfica: subdivisão da bacia hidrográfica de estudo em grandes áreas de drenagem;
- Célula: subdivisão em células regulares quadradas, que possuem a resolução que será considerada na modelagem.

Os primeiros passos de uma modelagem hidrológica é definir a bacia de estudo e a sua abrangência, os pontos dentro dessa bacia em que se tem interesse de obter as séries de vazões simuladas, escolher a resolução espacial que será considerada e o passo de tempo de cálculo. A resolução e o passo de tempo de cálculo dependem da disponibilidade, da distribuição e da frequência de medição dos dados hidrometeorológicos.

## 2.2 Dados de entrada do modelo

O modelo utiliza os seguintes arquivos de entrada:

- Descritor da rede de drenagem: Cell.hig
- Descritor topográfico: ParTop.hig
- Dados Meteorológicos: prec.bin e met.bin
- Dados meteorológicos previstos: PrePrev\_<data>.bin e MetPrev\_<data>.bin
- Dados de vazões observadas: Qobs.hig
- Arquivos de parâmetros fixos: ParFix.hig
- Arquivo de parâmetros de escoamentos: ParBacia.hig
- Arquivo de parâmetros de solos: ParSolo.hig
- Arquivo de parâmetros de vegetação: ParVeg.hig
- Arquivos de parâmetros de uso e cobertura do solo: Blocos.hig e URH\_<ano>.hig
- Arquivo de parâmetros calibráveis: ParAjuste.hig
- Calibração: arquivo Calibra.hig
- Previsão: arquivo Parprev.hig

Todos esses arquivos devem ser armazenados em um diretório com nome /dados\_entrada. O conteúdo e a preparação desses arquivos é detalhado nas seções seguintes.

### 2.2.1 CELL.HIG

O arquivo Cell.hig descreve a bacia hidrográfica através de células nas quais as informações topográficas estão organizadas de acordo com a rede de drenagem. A rede de drenagem é obtida através do processamento, realizado em um Sistema de Informações Geográfica (SIG), de um Modelo Digital de Elevação (MDE), que é a representação matricial da topografia em que cada pixel tem associado sua altitude média. O MDE geralmente é obtido de fontes como o SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), que disponibiliza as resoluções espaciais de 30 e 90 metros.

Diversos planos de informação essenciais para alimentar o modelo hidrológico são derivados do MDE, tais quais:

- Direções de Fluxo: é a direção de fluxo de cada célula para a célula vizinha de menor altitude, ou seja, indica a direção em que a água escoar;
- Rede de Drenagem: mapa com a rede de drenagem representada pela ligação das células através das direções de fluxo, na resolução escolhida para a implementação do modelo;
- Área Acumulada: Indica a área que drena para um ponto determinado da bacia. A partir da grade com as direções de fluxo, a área acumulada é obtida somando a área das células na direção indicada.
- Delimitação da bacia: indica a delimitação da bacia considerando todos os fluxos até o seu exutório.
- Delimitação de sub-bacias: a delimitação das sub-bacias é realizada considerando seu exutório e as direções de fluxo. Os exutórios são escolhidos preferencialmente em locais com postos fluviométricos para facilitar a calibração do modelo;
- Declividades: declividade do terreno correspondente a cada célula;
- Trechos de Rio: comprimento do trecho de rio associado a cada célula.

Para obter essas informações, é necessário a utilização de uma ferramenta de SIG. Neste manual será descrito a utilização do software TerraView/Hidro (Rosim et al., 2012), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e disponível para download em <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro/>.

Os procedimentos a serem executados em SIG devem ser realizados tanto na alta resolução, que é a resolução do MDE, como na baixa resolução, que corresponde à resolução definida para o modelo, ou seja, a resolução da célula. Detalhes sobre a utilização do software TerraView/Hidro são apresentados no Anexo B.

Finalizados os procedimentos de SIG realizados pelo TerraView/Hidro, o arquivo Cell.hig é gerado contendo em cada coluna as seguintes informações para cada célula:

- número da célula;
- latitude da célula (graus decimais);
- longitude da célula (graus decimais);
- número da sub-bacia a qual a célula pertence;
- área acumulada até a célula (km<sup>2</sup>);
- área superficial da célula (km<sup>2</sup>);

- elevação máxima do terreno dentro da célula (m);
- elevação mínima do terreno dentro da célula (m);
- comprimento do trecho de rio associado à ligação da célula em questão com a célula de jusante (km);
- declividade do trecho de rio associado à ligação da célula em questão com a célula de jusante ( $\text{mm}^{-1}$ );
- número da célula que recebe a água drenada da célula em questão.

### **2.2.2 PARTOP.HIG**

A entrada ParTop.hig contém o índice topográfico de cada célula, que também é obtido a partir do Modelo Digital de Elevação. Em síntese, ele representa a área relativa da célula que aporta para uma determinada vertente (Rodriguez, 2011). Seu cálculo é realizado pela rotina MTFD\_AC.f90, implementada em FORTRAN com base nas suas formulações, as quais podem ser consultadas em Rodriguez (2011). O arquivo de saída gerado pela rotina é denominado ParTop.hig. Detalhes sobre o procedimento de geração do ParTop.hig são apresentados no Anexo C.

### **2.2.3 Dados Meteorológicos: Prec.bin e Met.bin**

O MHD-INPE exige como entradas séries de dados das seguintes variáveis meteorológicas:

- precipitação;
- temperatura do ar;
- temperatura do ponto de orvalho;
- velocidade do vento a dez metros de altura;
- pressão atmosférica e;
- radiação global incidente.

Essas variáveis podem ser agregadas de diversas fontes, como ANA (Agência Nacional de Águas), ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), INMET (Instituto

Nacional de Meteorologia) e INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), elas devem estar dentro do passo de tempo escolhido para a integração do modelo e devem ser consistidas e interpoladas em pontos de grade considerando a abrangência da bacia simulada e a resolução desejada. Em caso que o modelo seja implementado visando a previsão de vazões, também são necessários dados de modelos numéricos de previsão de tempo.

Os dados interpolados devem estar associados a cada célula da bacia que será simulada. Para isso, utiliza-se as rotinas em fortran `cria_entradas_met.f90` e `cria_entradas_prec.f90`, que, com o auxílio do arquivo `Cell.hig`, preparam os dados meteorológicos para serem reconhecidos pelo modelo. Os arquivos de entrada resultantes são o `Prec.bin`, que contém a série de dados de precipitação, e o `Met.bin`, que contém a série de dados das demais variáveis meteorológicas.

Detalhes sobre o procedimento de geração dos arquivos `Prec.bin` e `Met.bin` são apresentados no Anexo D.

#### **2.2.4 Dados meteorológicos previstos: `PrePrev_<data>.bin` e `MetPrev_<data>.bin`**

No caso dos dados meteorológicos previstos, a formatação das entradas é realizada pela rotina `cria_entradas_preprev.f90` e `cria_entradas_metprev.f90`, que armazenam apenas uma data em cada arquivo binário (`PrePrev_<data>.bin` e `MetPrev_<data>.bin`).

Detalhes sobre o procedimento de geração dos arquivos são apresentados no Anexo E.

#### **2.2.5 Dados de vazões observadas: `Qobs.hig`**

O processo de calibração requer dados fluviométricos de vazão observada, no passo de tempo escolhido para a implementação do modelo. Eles devem ser organizados no arquivo de entrada `Qobs.hig`, seguindo a ordem de numeração das sub-bacias obtida após o procedimento de SIG.

Os dados de vazão não são efetivamente utilizados no processo de simulação, eles apenas são usados na comparação de resultados e no cálculo de índices de desempenho do modelo. Cada posto fluviométrico utilizado no modelo é definido como o exutório de cada sub-bacia, permitindo assim realizar os processos de calibração e validação do

modelo.

### **2.2.6 Arquivo de parâmetros fixos: ParFix.hig**

O arquivo de entrada que define o tipo de procedimento adotado pelo modelo é o ParFix.hig, no qual também são definidas as seguintes informações:

- Data inicial dos dados hidrometeorológicos (arquivos met.bin, prec.bin e Qobs.hig);
- Data final dos dados hidrometeorológicos (arquivos Met.bin, Prec.bin e Qobs.hig);
- Data inicial da simulação/calibração;
- Data final da simulação/calibração;
- Número de dias a serem desconsiderados no cálculo da função objetivo (spin-up do modelo);
- Intervalo de tempo em segundos;
- Número de células, de usos e de sub-bacias;
- Procedimento a ser adotado pelo modelo (simulação, calibração ou previsão);
- Data final da previsão;
- Número da sub-bacia para a qual se deseja imprimir os resultados da função objetivo;
- Número de postos com vazão observada e nome do arquivo que contem os dados de vazão observada (Qobs.hig);
- Número das células que correspondem aos postos fluviométricos com dados observados: essa informação deve ser obtida no Cell.hig;
- Número de pontos em que se deseja gravar hidrogramas e lista com o número das células que correspondem a esses pontos;
- Número de mapas de uso da terra: precisa ter pelo menos um;
- Data inicial do mapa e nome do arquivo correspondente em sequência;
- Células cuja vazão será substituída por vazões observadas.

### 2.2.7 Arquivo de parâmetros de escoamentos: ParBacia.hig

Alguns parâmetros fixos necessários para o modelo são obtidos a partir dos dados de vazão, eles são definidos no arquivo de entrada ParBacia.hig:

Coeficientes de regionalização da largura do rio (BC1, BC2 e BC3) [m]: Função (polinomial ou potência) que relaciona a área de drenagem [km<sup>2</sup>] e a largura do rio de todas as bacias utilizadas.

CB [dias]: Parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo, definido para cada sub-bacia. Ele é estimado a partir das series de dados observados, considerando o período de recessão dos hidrogramas:

$$C_B = - \frac{ND}{\ln(Q_{FR}/Q_{IR})}$$

sendo que ND é o número de dias do período de recessão do hidrograma; QIR é a vazão no início da recessão e QFR é a vazão no final da recessão.

- Vazão específica por sub-bacia (QB): média da vazão diária, da série histórica considerada, dividida pela área de drenagem da sub-bacia;
- Vazão média específica (QMESP) [m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>]: a média de QB considerando todas as sub-bacias. Exemplo:

Tabela 1: Exemplo de cálculo do QB e QMESP

Sub-bacia	Vazão Média[m <sup>3</sup> /s]	Área de drenagem[km <sup>2</sup> ]	QB
1	126.9	23134.8	0.005485
2	8382.6	638443.8	0.01313
3	18425.3	956145.5	0.01927
		<b>QMESP</b>	-----> 0.012628



- Coeficiente do reservatório linear simples do fluxo superficial e subsuperficial (CS).

Além dos dados relacionados a vazão, o arquivo ParBacia.hig também possui alguns parâmetros fixos de referência para o solo:

- Transmissividade máxima de referência (Tsub) [m<sup>2</sup>/dia];
- Coeficiente de decaimento da transmissividade com a profundidade (MU);
- Fator de anisotropia da camada superior do solo (alpha);

### **2.2.8 Arquivo de parâmetros de solos: ParSolo.hig**

O arquivo de parâmetros do solo define as características de condutividade hidráulica e das curvas de retenção de umidade dos diferentes tipos de solos, conhecidos como parâmetros de Brooks Corey, que influenciam diretamente o balanço hídrico do solo:

- Condutividade hidráulica saturada (Ksat) [mmh<sup>-1</sup>]
- Pressão de entrada do ar (Psib) [kPa]: usado para a determinação da saturação efetiva e da saturação crítica de início do estresse hídrico;
- Parâmetro 'b' da curva de retenção: expoente na determinação dos mesmos parâmetros que 'Psib', e também na determinação do coeficiente de condutividade hidráulica não saturada;
- Umidade volumétrica na saturação (THS) [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>]: Também determinada como capacidade de campo;
- Umidade volumétrica residual (THR) [m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>].

Os tipos de solo e seus respectivos parâmetros podem ser definidos pelo usuário conforme sua preferência. Como exemplo, este manual considerou a classificação textural de Zabler (1986). Seus parâmetros foram obtidos a partir de dados de perfis de solo distribuídos por diferentes regiões do Brasil (Tomasella, 1998). Cada perfil de solo inclui informações, tais como: tipo de solo, textura, profundidade dos horizontes, conteúdo de carbono orgânico, etc. Os parâmetros hidráulicos de cada tipo de solo foram obtidos a partir da aplicação de funções de pedotransferência (Tomasella et al., 2005; Doyle e Tomasella, 2010). As características observadas nos perfis foram associadas com as manchas de classificação de tipos de solos disponibilizados pela Empresa Brasileira de

Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1981) e da ISRIC - World Soil Information (DIJKSHOORN, HUTING & TEMPEL, 2005), agrupando numa classificação de 13 tipos texturais, como apresentado na Tabela 2. A Figura 2 apresenta o mapa de tipos de solo para todo o Brasil.

Tabela 2: Tipos de solos

<b>Classe</b>	<b>Tipo de Solo</b>	<b>Tradução</b>	<b>Terminologia</b>
<b>1</b>	Clay	Argiloso	Argiloso
<b>2</b>	Sandy Clay	Argilo-Arenoso	Arg-Are
<b>3</b>	Sandy Clay Loam	Franco-Argilo-Arenoso	Fr. Arg-Are
<b>4</b>	Sandy Loam	Franco-Arenoso	Fr. Are
<b>5</b>	Loamy Sand	Areia Franca	Are Franca
<b>6</b>	Sand	Arenoso	Arenoso
<b>7</b>	Clay Loam	Franco-Argiloso	Fr. Arg
<b>8</b>	Loam	Franco	Franco
<b>9</b>	Silty Clay	Argilo-Siltoso	Arg-Silt
<b>10</b>	Silty Clay Loam	Franco-Argilo-Siltoso	Fr. Arg-Silt
<b>11</b>	Silt Loam	Franco-Siltoso	Fr. Silt
<b>12</b>	Silt	Siltoso	Siltoso
<b>13</b>	Histosol	Organossolo	Organos

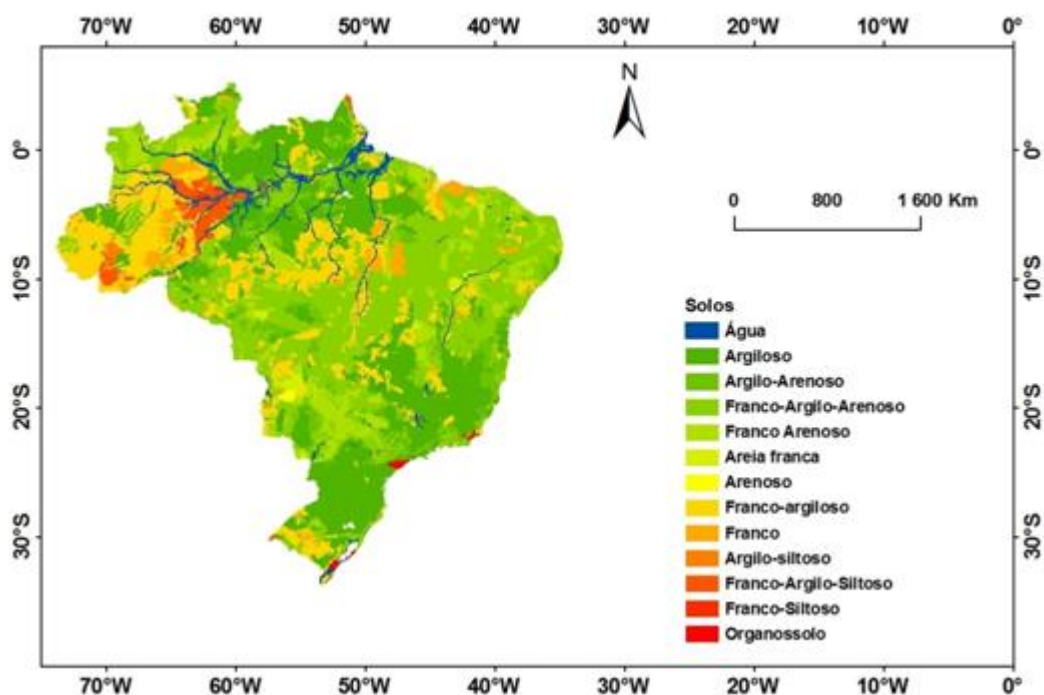


Figura 2: Mapa de Solos

### 2.2.9 Arquivo de parâmetros de vegetação: ParVeg.hig

O arquivo ParVeg.hig contém os parâmetros descritores da cobertura vegetal para cada classe de vegetação. Esses parâmetros influenciam os processos de interceptação, evapotranspiração e absorção de água do solo, descritos a seguir:

- Albedo: parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua cobertura vegetal. Pode variar de acordo com a fase do ciclo de cultivo, e regiões com destacada época sazonal, sendo determinado mensalmente;
- Índice de Área Foliar (IAF) [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]: expressa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. Pode ser medido ou estimado a partir de sensoriamento remoto. Demonstra variabilidade com o ciclo anual da planta, sendo determinado mensalmente;
- Altura da vegetação (Zveg) [m]: os valores adotados para a altura média da cobertura vegetal, que servem para calcular a resistência aerodinâmica à evapotranspiração. A resistência aerodinâmica representa a dificuldade com que a umidade deixa a superfície das folhas e do solo, é considerada menor onde a altura média da vegetação é maior e intensifica a turbulência do vento;

- Cobertura da vegetação: porcentagem da área coberta por vegetação, que irá interceptar a chuva que de outro modo cairia diretamente sobre o solo. Como o IAF, é determinado mensalmente;
- Profundidade radicular ( $\Delta Z$ ): profundidade média das raízes que efetivamente retira água do solo;
- Plano de deslocamento zero ( $D_0$ ) [m]: deslocamento vertical da trajetória de uma parcela de ar que passa a partir de uma superfície de referência lisa (com  $d = 0$ ) para a superfície áspera considerada (TAJCHMAN, 1981). Necessário o cálculo da resistência aerodinâmica. É considerada em variação sazonal;
- Rugosidade ( $Z_0$ ) [m]: necessária ao cálculo da velocidade da resistência aerodinâmica. É determinada mensalmente;
- Resistência superficial ( $r_c$ ) [ $s\ m^{-1}$ ]: representa a resistência ao fluxo de umidade do solo, através das plantas, até a atmosfera. Um único valor é determinado por tipo de vegetação. Depende da disponibilidade de água no solo e de variáveis ambientais, como a umidade do solo, a temperatura do ar e a radiação recebida pela planta;
- Capacidade máxima do dossel ( $S_c$ ) [mm]: volume de chuva que o dossel consegue armazenar, temporariamente, até que ocorra a evaporação;
- EPR: razão das intensidades médias de evaporação pela de precipitação. Utilizada no modelo de interceptação por vegetação esparsa de Gash (1995);
- Ômega crítico ( $\Omega_c$ ): porcentagem da umidade do solo a partir da qual a absorção de água pela planta é máxima, utilizada no modelo de Jarvis (1989). Constante em todo o domínio de simulação;
- Fator de distribuição de raízes (FR): utilizado no cálculo da proporção de raízes em cada camada de solo. Constante em todo o domínio de simulação.

As classes de vegetação e os valores dos parâmetros relacionados podem ser considerados conforme a preferência do usuário. Neste manual foi considerada a classificação SiB (Sellers et al., 1986) dos 12 tipos de vegetação apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tipos de vegetação

<b>Classe</b>	<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>Terminologia</b>
<b>1</b>	Árvores latifoliadas perenes	ArLatP
<b>2</b>	Árvores latifoliadas decíduais	ArLatD
<b>3</b>	Árvores latifoliadas /aciculadas	ArLatAc
<b>4</b>	Árvores aciculadas decíduas	ArAcD
<b>5</b>	Árvores aciculadas perenes	ArAcP
<b>6</b>	Árvores latifoliadas com cobertura arbustiva/herbácea	ArLat-cobArb
<b>7</b>	Gramíneas e herbáceas	Gr-Herb
<b>8</b>	Arbustos latifoliados com cobertura herbácea perene	ArbLat-cobHerb
<b>9</b>	Arbustos latifoliados com solo exposto	ArbLat-SoloExp
<b>10</b>	Árvores anãs e arbustos com cobertura herbáceas	Anas-Arb-cobHerb
<b>11</b>	Solo exposto	Solo exposto
<b>12</b>	Cultivos	Cultivos

A distribuição espacial dessas 12 classes de vegetação foi obtida a partir das informações de vegetação do RADAM-IBGE (IBGE, 1992) e do Projeto PROVEG (Sestini et al., 2002) com resolução de 1x1 km. Este projeto integra os dados de desflorestamento provenientes do Programa Amazônia da OBT/INPE, e reclassifica o mapa de vegetação conforme uma compatibilização entre as classes do RADAM-IBGE (IBGE, 1993) e classes derivadas do esquema de classificação fisionômica de Kuchler (Sellers et al., 1986), onde são agregados os tipos de vegetação considerados homogêneos com relação aos valores de seus parâmetros. O mapa de vegetação resultante para todo o território brasileiro é apresentado na Figura 3.

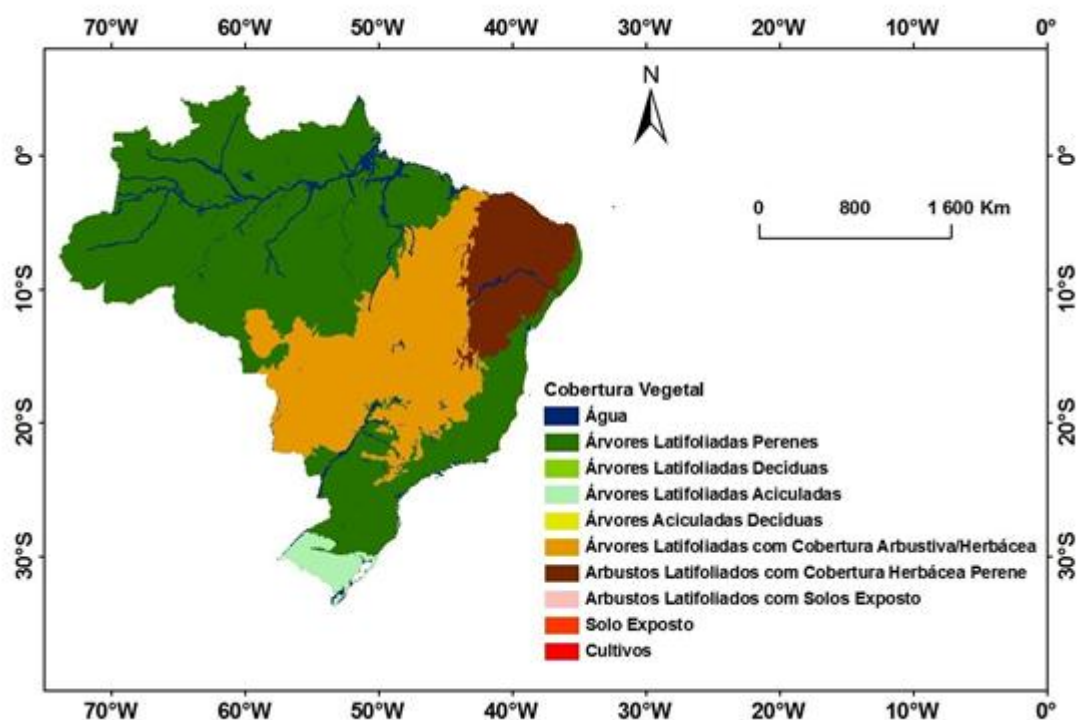


Figura 3: Mapa da Cobertura Vegetal

Outras informações também podem ser agregadas ao mapa de vegetação, como, por exemplo, informações sobre o uso do solo. Leite et al. (2010) apresenta uma base de dados geográficos históricos das mudanças no uso do solo na Amazônia entre 1940 e 1995. Esta informação pode ser combinada com a cobertura vegetal de uma bacia localizada na região amazônica, obtendo-se, assim, mapas anuais de classificação do uso do solo para o período de interesse.

#### 2.2.8 Arquivos de parâmetros de uso e cobertura do solo: Blocos.hig e URH\_<ano>.hig

O MHD-INPE considera unidades de paisagem que refletem um comportamento hidrológico similar na representação da variabilidade das características físicas de cada célula da bacia. Para isso, Unidades de Resposta Hidrológicas (URHs), também chamadas de Blocos, são geradas através da combinação dos tipos de solo, cobertura vegetal e usos do solo. Considera-se que o comportamento hidrológico das URHs possa

ser explicado por características físicas relacionadas aos solos (e.g. capacidade de armazenamento d'água, profundidade, porosidade, condutividade hidráulica) e à cobertura vegetal (e.g. índice de área foliar, interceptação, profundidade das raízes, albedo, rugosidade). Com base nesses conceitos, as entradas Blocos.hig e URH\_<ano>.hig são geradas.

Podemos observar na Figura 4, cada célula do modelo, dada sua dimensão, poderá apresentar diferentes tipos e uso do solo e de cobertura vegetal em sua área, o que resulta em múltiplas URHs em uma mesma célula. O seu tratamento dentro do modelo se dá pela porcentagem da área coberta por cada bloco de uso, independente da sua localização na célula.

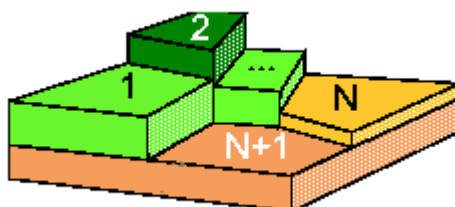


Figura 4: Divisão de célula em blocos

As URHs foram formadas pelo cruzamento dos tipos de solo e vegetação e uso do solo. Por exemplo, o cruzamento dos 13 tipos de solo e das 12 classes de cobertura vegetal (descritas nas seções anteriores) mais a superfície coberta por água, resultam em 157 possíveis classes. Entretanto, nem todas estas combinações são existentes dentro de uma determinada célula. Desta forma, em cada bacia é realizada uma análise criteriosa das combinações sugeridas pelo cruzamento, considerando sua factibilidade e a porcentagem de área coberta. A Figura 5 apresenta as URHs obtidas para todo o Brasil que possuem presença de ao menos 0,1% da área do Brasil.





variam conforme o processo de calibração. Detalhes sobre a utilização desses parâmetros consta no ANEXO A.

Os parâmetros calibráveis são alterados, durante a etapa de calibração. Os valores dos parâmetros são escolhidos a fim de alcançar um melhor ajuste entre resultados calculados e os dados observados de vazão, para cada posto fluviométrico. Os parâmetros sujeitos a calibração são:

- Profundidades das camadas do solo ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) [m]: representam a espessura média das camadas superficial, subsuperficial e subterrânea, representativas de um solo;
- Condutividade hidráulica da camada superior ( $K_{SS}$ ) [ $\text{mdia}^{-1}$ ]: Multiplica a condutividade hidráulica da camada superior, estipulada inicialmente por tipo de solo;
- Coeficiente de transmissividade horizontal por área saturada ( $T_{SUB}$ ) [ $\text{m}^2\text{dia}^{-1}$ ]: Multiplica a transmissividade horizontal por área saturada da camada subterrânea;
- Coeficiente de decaimento da transmissividade com a profundidade (MU): define a forma do perfil de umidade do solo e afeta a geração de escoamento;
- Porcentagem mínima de armazenamento subterrâneo para gerar escoamento (CSI) [%]: multiplica a saturação efetiva para início do escoamento subterrâneo;
- Coeficiente do tempo de retardo da camada superficial (CS) [s]: altera o parâmetro tempo de retardo do reservatório superficial;
- Coeficiente do tempo de retardo da camada subterrânea (CB) [s]: altera o parâmetro tempo de retardo do reservatório subterrâneo.

#### **2.2.10 Parâmetros fixos no código do modelo**

Além dos parâmetros já mencionados, como os parâmetros associados ao tipo de vegetação e características do solo, o modelo também requer parâmetros intrínsecos aos processos de modelagem, são eles:

- Modelo de interceptação de Gash et al. (1995): calculado na rotina `Evaporacao.f90`;
- Modelo de propagação de Muskingum-Cunge (Cunge, 1969): definido na rotina `Vars_Main.f90` com número máximo de sub-trechos (`ntrmax`) igual a 20;

- Modelo de absorção de água de Jarvis (1989): calculado na rotina Transpiracao.f90;
- Coeficiente de rugosidade de Manning (rugman): definido na rotina Vars\_Main.f90 com o valor de  $0,030 \text{ s.m}^{-1/3}$ .

## 2.3 Aplicação 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. Essas rotinas são detalhadas e apresentadas no fluxograma do Anexo G.

Para a execução do modelo, todas as rotinas devem ser guardadas em um mesmo diretório. Dentro desse diretório também devem ser criados os seguintes diretórios:

- dados\_entrada: local onde ficam todas as entradas;
- dados\_saida: local onde são gravadas as saídas;
- dados\_previsao: local onde ficam os dados de entrada meteorológicos para a previsão.

Existem basicamente três procedimentos disponíveis no MHD-INPE:

- Simulação
- Calibração
- Previsão

Em um primeiro momento, visando verificar as entradas, é interessante rodar o modelo no modo simulação com os parâmetros calibráveis iguais a um.

### 2.3.1 Simulação

Para realizar o procedimento de Simulação, deve-se indicar no arquivo ParFix.hig em icalib o valor zero, que corresponde ao procedimento de simulação, e definir o intervalo de datas desejado. Após a rodada do MHD, os seguintes dados de saída serão gerados:

- bacia<nb>.hig: com os dados médios obtidos para a bacia incremental (sendo nb o número da sub-bacia incremental);

- vazao.hig: com a série de vazões calculadas;
- estatisticas.hig: com os valores de desempenho obtidos através da comparação entre vazão observada e vazão calculada;
- nosolo.hig: com precipitação, evapotranspiração, lâmina interceptada, evapotranspiração potencial, área de saturação, armazenamento na camada superior do solo, armazenamento na zona radicular, armazenamento na camada inferior do solo, escoamento subterrâneo, escoamento subsuperficial e escoamento superficial de um dado bloco de uma dada célula. A célula e o bloco a terem seus valores imprimidos são determinados na rotina Modelo.f90, por meio das variáveis jc e ju, respectivamente.
- qprop.hig: com parcela de vazão superficial, vazão sub-superficial e vazão de base, respectivamente, para cada passo de tempo para a bacia definida no arquivo parfix.hig.

### **2.3.2 Calibração: arquivo Calibra.hig**

Ainda que uma equação seja fisicamente baseada, sua aplicação em larga escala ou em uma escala diferente para a qual foi desenvolvida, se torna uma representação conceitual. Como a condutividade hidráulica, que é mensurada usualmente em laboratório para pequenas amostras, e passa a ser aplicada em um modelo como valor homogêneo para extensas áreas (Ewater, 2013).

As diferenças do comportamento hidrológico entre a escala local em que são feitas as medições e a escala regional ou global em que os modelos são aplicados, e a pequena quantidade de dados disponíveis limitam muito a qualidade das representações numéricas de processos (Shuttleworth, 1991).

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 objetivo, 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.

O modelo MHD-INPE é alimentado por uma série de parâmetros relacionados com a topografia da bacia (e.g. área de drenagem, declividade), informações extraídas do MDE através de ferramentas de geoprocessamento. Esses parâmetros são definidos a priori ou regionalizados como é o caso do coeficiente de rugosidade de Manning, enquanto outros parâmetros, como por exemplo os relacionados ao movimento de água no solo, precisam ser calibrados.

O procedimento de calibração automática do MHD-INPE utiliza a metodologia *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA versão 2.1) proposta por Duan et al. (1992). Para utilizá-la, é necessário definir os seguintes parâmetros no arquivo de entrada Calibra.hig:

- maxn: número máximo de tentativas permitidas antes do fim da otimização. Tem o objetivo de finalizar o processo de otimização antes que o tempo computacional se torne muito grande. O valor recomendado é 10000;
- kstop: número máximo de ciclos dentro do qual o critério pode ter uma melhora acima de uma porcentagem definida. O valor recomendado é 5;
- pcento: porcentagem que o critério deve melhorar dentro de um determinado número de ciclos. O valor recomendado é 0,1;
- ngs: número de complexos da população inicial. O valor recomendado é entre 1 e 20, dependendo do número de parâmetros otimizados e da complexidade do problema;
- iseed: semente aleatório;
- ideflt: indicador para utilizar valores padrão das seguintes variáveis;
  - npg: número de pontos em cada complexo;
  - nps: número de pontos em um sub-complexo;
  - nspl: número de evoluções permitidas para cada complexo antes da combinação entre complexos;
  - mings: número mínimo de complexos necessário, se o número de complexos permite reduzir o rendimento da otimização;
  - iniflg: indicador sobre a possibilidade de inclusão de valores iniciais na população.

Além dos parâmetros do SCE-UA, também é necessário indicar no arquivo Calibra.hig o número da bacia que será calibrada e o número da estação cujos dados serão utilizados,

quais os parâmetros que serão calibrados e o intervalo de variação de cada parâmetro, ou seja, os limites máximos e mínimos.

Após a calibração, será gerado o arquivo *Evolucao.hig*, que contém um resumo do processo de calibração, a evolução dos parâmetros e de algumas estatísticas. Os melhores critérios obtidos para cada evolução são apresentados e o usuário deve escolher o conjunto de parâmetros que melhor atenda as suas expectativas.

Os parâmetros selecionados devem ser substituídos no arquivo de entrada *ParAjuste.hig* e um novo processo de simulação deve ser executado para gerar as saídas e realizar as comparações e análises dos resultados.

### **2.3.3 Previsão: arquivo *ParPrev.hig***

Para realizar o procedimento de Previsão, deve-se indicar no arquivo *ParFix.hig* em *icalib* o valor dois, que corresponde ao procedimento de previsão. Além disso, deve-se definir o intervalo de datas em que será realizado a simulação, ou seja, as datas que receberam como entradas dados observados. Esse intervalo de simulação é utilizado no aquecimento do modelo e deve ser respeitado seu spin-up. A partir da data final de simulação até a data final de previsão, que também deve ser definida em *ParFix.hig*, os dados de entrada passam a ser as previsões meteorológicas. Esses dados de previsão devem estar organizados dentro do diretório *dados\_previsao* em diretórios nomeados com a primeira data de previsão. Por exemplo, deseja-se realizar uma previsão a partir do dia 01/12/2013 com um horizonte de 10 dias. Então, dentro do diretório 0112201300 devem estar armazenados 10 arquivos *MetPrev\_<data>.bin* e mais 10 arquivos *PrePrev\_<data>.bin* com datas que vão do dia 01/12/2013 até o dia 10/12/2013. No arquivo *ParFix.hig*, a data final de simulação será 30/11/2013 e a data final de previsão será 10/12/2013.

Também é necessário disponibilizar o arquivo de entrada *ParPrev.hig* utilizado no processo de atualização. Esse arquivo informa o número das sub-bacias que passam pelo processo de atualização, o número de intervalos de tempo considerados nos cálculos e a tolerância admitida no erro da estimativa da vazão para cada sub-bacia.

No final da previsão é gerado o arquivo de saída *Prev\_<data>.hig*, que contém as vazões atualizadas e as vazões previstas em cada sub-bacia.

## 2.4 Medidas de Desempenho

Os parâmetros do modelo foram inicialmente determinados com base no conhecimento dos hidrólogos sobre os dados físicos da bacia e, posteriormente, refinados pela metodologia de calibração automática, baseada no método proposto por Duan et al. (1992). Para avaliação da qualidade do ajuste foram consideradas as funções objetivo: coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões (ENS); coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões (ENSLog); erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias ( $\Delta V$ ); e coeficiente de correlação das vazões mensais (R2).

### 2.4.1 Coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é uma forma de medir o quanto o modelo proposto é melhor do que um modelo alternativo, que, no caso particular deste coeficiente, é a média de longo termo. O valor é adimensional e pode variar entre  $-\infty$  a 1. Valores próximos de 1 indicam que o modelo é bastante superior à média de longo termo. Valores próximos de zero indicam que o modelo é tão ruim quanto a média. Valores positivos indicam que o modelo é melhor que a média. Valores negativos indicam que o modelo é pior que a média.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é calculado pela equação 1:

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QO_i - \overline{QO})^2} \quad (1)$$

onde  $QC_i$  é a vazão calculada num intervalo de tempo  $i$ ;  $QO_i$  é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo;  $n$  é o número de intervalos de tempo; e  $\overline{QO}$  a média das vazões observadas no período de  $n$  intervalos de tempo.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe tem a tendência de dar mais valor a erros nos picos das vazões. Desta forma, ajustar o modelo apenas com o objetivo de maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe pode resultar em um mau ajuste nos períodos de recessão, quando a vazão é mais baixa.

### 2.4.2 Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões

O coeficiente de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado com os dados de vazão ou com os dados de vazão transformados por algum procedimento, como a raiz quadrada, o inverso ou os logaritmos. O objetivo de calcular o coeficiente de eficiência usando os logaritmos das vazões é que desta forma se obtém uma medida de desempenho menos sensível aos picos e mais sensível aos períodos de recessão de vazão.

Da mesma forma que o coeficiente de Nash-Sutcliffe das vazões, o coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões tem um valor adimensional que pode variar entre  $-\infty$  e 1.

O coeficiente de eficiência de Nash-Suttcliffe dos logaritmos das vazões é calculado pela equação 2:

$$\text{ENSLog} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln Q C_i - \ln Q O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\ln Q O_i - \overline{\ln Q O})^2} \quad (2)$$

onde  $\overline{\ln Q O}$  é a média dos logaritmos natural das vazões observadas no período de  $n$  intervalos de tempo.

### 2.4.3 Erro relativo de volume

O erro relativo de volume é uma forma de avaliar se existe um desvio sistemático de super-estimativa ou subestimativa da vazão. O erro relativo de volume é adimensional, mas pode ser apresentado em termos percentuais. Um erro volumétrico relativo de -20%, por exemplo, indica que o modelo hidrológico gera, ao longo de todo o período de simulação, uma vazão média 20% inferior à vazão observada. Idealmente os erros de volume deveriam se manter numa faixa de -10% a +10%, que pode ser considerada razoável em função das incertezas dos próprios dados medidos.

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^n Q C_i - \sum_{i=1}^n Q O_i}{\sum_{i=1}^n Q O_i} \quad (3)$$

#### 2.4.4 Coeficiente de correlação das vazões

Duas variáveis apresentam uma correlação linear quando os pontos do diagrama de dispersão se aproximam de uma reta. O coeficiente de correlação linear, também chamado de covariância normalizada, é igual a zero quando duas variáveis são estatisticamente independentes. O coeficiente de correlação linear,  $R^2$ , é uma medida da dependência linear entre as variáveis e, em algumas situações, podem apresentar dependência funcional não linear.

O coeficiente de correlação linear de Pearson é adimensional e varia entre -1 e +1. Assim, as unidades adotadas pelas variáveis não afetam o valor do coeficiente de correlação. Caso os dados se alinhem perfeitamente ao longo de uma reta com declividade positiva teremos a correlação linear positiva perfeita com o coeficiente de Pearson igual a 1.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i \cdot QO_i) - \sum_{i=1}^n (QC_i) \cdot \sum_{i=1}^n (QO_i)}{\sqrt{[n \cdot \sum_{i=1}^n (QC_i)^2 - (\sum_{i=1}^n (QC_i))^2] \cdot [n \cdot \sum_{i=1}^n (QO_i)^2 - (\sum_{i=1}^n (QO_i))^2]}} \quad (4)$$



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, D. R.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water**. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>>. Acesso em 14 de julho de 2010.
- BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. **A physically based variable contributing area model of basin hydrology**, *Hydrological Sciences Bulletin*, v. 24, p. 43-69, 1979.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling**. *Hydrol. Sci. J.*, v.52, p.878-895, 2007.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. **Simulação hidrológica de grandes bacias**, 2001.
- CUNGE, J.A. 1969. **On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method)**. *J. of Hydraulic Res.*, 7(2):205-230.
- DIJKSHOORN JA, HUTING JRM and TEMPEL P 2005. **Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0)**. Report 2005/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen.
- DOYLE M.E. ; TOMASELLA, J. . **Experiments Using New Initial Soil Moisture Conditions and Soil Map in the Eta Model Over La Plata Basin**. In: 2010 Meeting of the Americas, 2010, Foz do Iguaçu. 2010 Meeting of the Americas Abstracts, 2010.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V.K., 1992. **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models**. *Water Resour. Res.* 28, 1015–1031.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S., GUPTA, V.K., 1994. **Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models**. *J. Hydrol.* 158, 265–284.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). 1981. **Soil Map of Brazil at 1:5,000,000 Scale**. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos/Embrapa, Rio de Janeiro, RJ, Brazil (in Portuguese).

EWATER TOOLKIT. SERIES ON MODEL CHOICE. **General approaches to modelling and practical issues of model choice**. Disponível em <<http://www.toolkit.net.au/tools/ModelChoice/MC-1.pdf>>. Acesso em 27 jul. 2013.

FALCK, A. S. **Avaliação da incerteza nas estimativas de precipitação por satélite e sua propagação no modelo hidrológico distribuído MHD-INPE**. 2015. 183 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.26.17.15-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J3C842>>. Acesso em: 01 fev. 2016.

GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; LACHAUD, G. **Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model**. Journal of Hydrology, v. 170, p. 79-86, 1995. DOI: 10.1016/0022-1694(95)02697-N

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA (IBGE), 1992. **Manual técnico de vegetação brasileira**, Rio de Janeiro, 92 pp.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Vegetação do Brasil**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1993.

IORGULESCU, I and MUSY, A, 1997, **Generalisation of TOPMODEL for a power law transmissivity profile**, Hydrol. Process., 11, 1353-1355.

JARVIS, N.J. **A simple empirical model of root water uptake**. Journal of Hydrology, v. 107, p. 57-72, 1989. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90050-4.

LEITE, C.C., COSTA, M.H., de LIMA, C.A., RIBEIRO, C.A.A.S., SEDIYAMA, G., 2011. **Historical reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940–1995)**. J. Land Use Sci., <http://dx.doi.org/10.1080/1747423X.2010.501157>.

MOHOR, Guilherme Samproga, et al. **"Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant."** Journal of Hydrology: Regional Studies 4 (2015): 41-59.

REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, v. 6, p. 95-118 , 2001.

RODRIGUEZ, D.A. and TOMASELLA, J. (2015) **On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins.** Hydrological Sciences Journal.

RODRIGUEZ, D.A. **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico em bacia de floresta amazônica.** 208 f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

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

SELLERS, P. J; MINTZ, Y.; SUD, Y. C.; et. al. **A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models.** Journal of the Atmospheric Sciences, v.43, n.6, p.505-531, 1986

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

SHUTTLEWORTH, W.J., 1993. **Evaporation.** In: Maidment, D.R. (Ed.), Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York.

SIQUEIRA-JÚNIOR, J.L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D.A. **Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin.** Clim. Change, 129 (1–2) (2015), pp. 117–129 <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>

SIVAPALAN, M. (2006) **Pattern, Process and Function: Elements of a Unified Theory of Hydrology at the Catchment Scale.** Encyclopedia of Hydrological Sciences.

TAJCHMAN, S. J.: 1981, '**Comments on Measuring Turbulent Exchange within and above Forest Canopy**', Bull. Am. Meteorol. Soc. 62, 1550–1559.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M. G. **Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia**. Soil Sci. 163, 190–202 (1998).

TOMASELLA, J., HODNETT, M.G., 2005. **Pedotransfer Functions for tropical soils**. In: Pachepsky, Y., Rawls, W.J. (org.), Developments in Soil Science: Pedotransfer Functions in Hydrology, vol. 30. Elsevier, Amsterdam, pp. 415–435.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1998. 669p.

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

ZHAO, R.J. and LIU, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.

ZHAO, R.J. **The Xinanjiang model applied in China**. Journal of Hydrology, v. 135, p.371–381, 1992.

ZOBLER, L. 1986. **A World Soil File for Global Climate Modelling**. NASA Technical Memorandum 87802. NASA Goddard Institute for Space Studies, New York, New York, U.S.A.

## ANEXO A - O MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO MHD-INPE

O Modelo Hidrológico Distribuído de grande escala foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, designado de MHD-INPE (Rodriguez, 2011; Siqueira Jr. et al., 2015). Este modelo é uma versão adaptada do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) (Collischonn et al., 2007), onde foram realizadas modificações nas rotinas de estimativa da evaporação e de separação de fluxos.

A estrutura do MHD-INPE é composta por quatro módulos mostrados esquematicamente na Figura A.1, são eles:

- balanço de água no solo
- evapotranspiração;
- escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo;
- escoamento na rede de drenagem

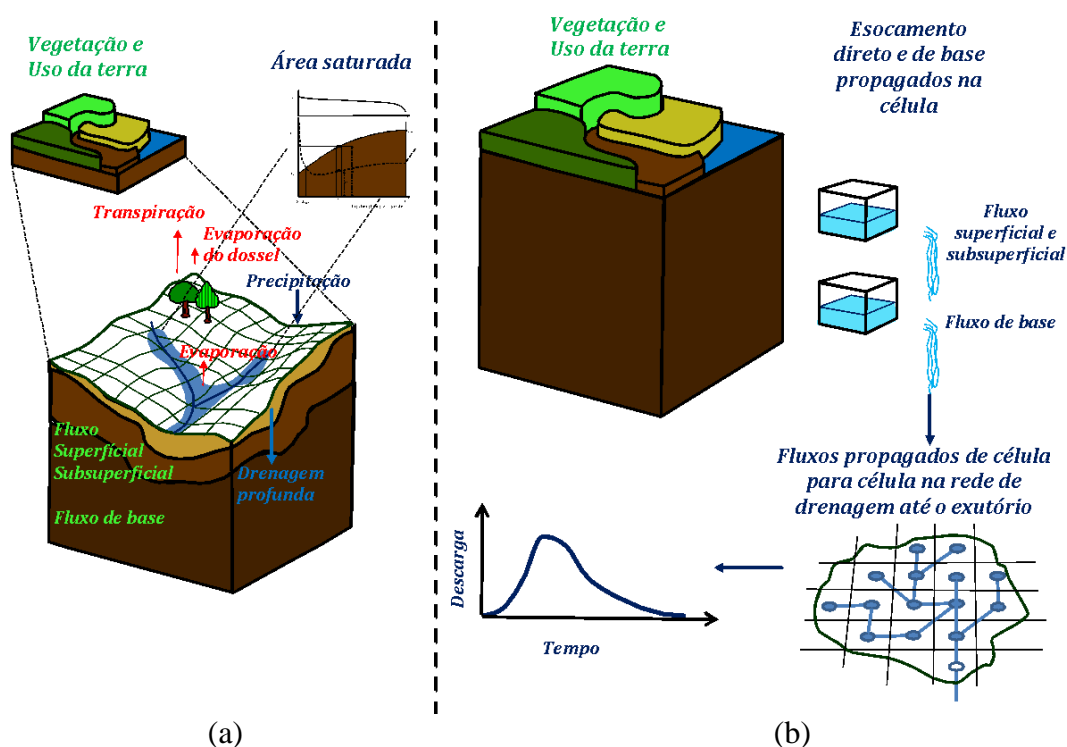


Figura A.1 (Esquema ilustrativo das etapas de separação de escoamento (esquerda) e do fluxo propagado na rede de drenagem (direita) no modelo hidrológico MHD-INPE.

Para simular a resposta hidrológica, a versão atual utiliza três camadas: uma superior, uma intermediária e uma inferior conforme mostrado esquematicamente na (Figura A.1).

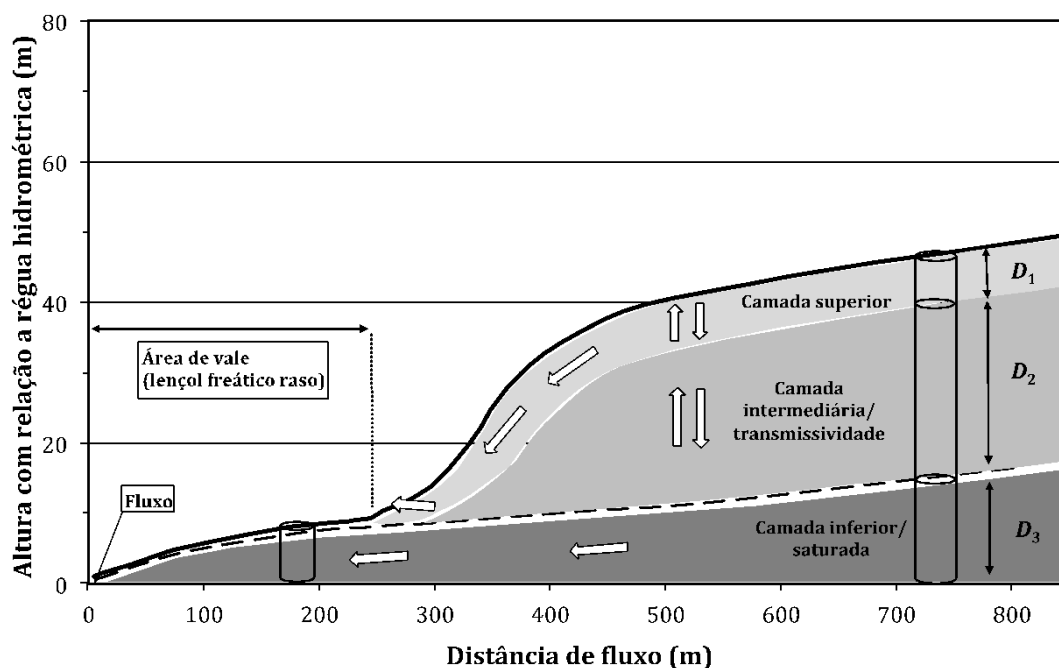


Figura A.2: Esquema conceitual do modelo hidrológico MHD-INPE indicando os fluxos e sua direção e as diferentes camadas: superior, com espessura  $D_1$ ; intermediária, com espessura  $D_2$ ; e inferior, com espessura  $D_3$ .

A camada superior comanda o fluxo subsuperficial e drena para a camada intermediária, que é responsável pelo fluxo vertical para a camada inferior. A camada intermediária funciona como um reservatório de água para vegetação com raízes muito profundas como ocorre em áreas de floresta e cerrado, além disso, não permite fluxos horizontais e pode ser excluída em casos de solos muito rasos. A camada inferior controla o fluxo de base e indiretamente o fluxo superficial por excesso de saturação. A estimativa de separação dos fluxos combina a abordagem do modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO e LIU, 1995) e a formulação utilizada no modelo TopModel (BEVEN e KIRKBY, 1979), a fim de representar os processos de geração de escoamento (Figura A.1.a). De acordo com Rodriguez (2011) estas metodologias estão correlacionadas com os padrões de auto-organização observados na grande escala.

A formulação assume que a superfície do lençol freático é paralela à superfície e considerando uma variação não linear da transmissividade com a profundidade, (Beven e Kirkby, 1979; Iorgulescu e Musy, 1997). Considerando que o fluxo subterrâneo é máximo quando o armazenamento de água no solo é máximo, resulta na seguinte equação para a estimativa de fluxo de base da camada inferior,  $Q_{sub}$ :

$$Q_{sub} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \left[ 1 - \frac{S_{max} - S_t}{S_{max} (1 - \xi)} \right]^{\mu} = \frac{T_{sub} \tan \beta}{\lambda_{\mu}^{\mu}} \left[ \frac{S_t - \xi S_{max}}{S_{max} (1 - \xi)} \right]^{\mu} \quad (A.1)$$

sendo  $T_{sub}$  a transmissividade quando o lençol freático atinge a superfície;  $\tan \beta$  representa a declividade média do lençol freático na célula;  $S_{max}$  e  $S_t$  são, respectivamente, o valor máximo e o valor médio na célula no tempo  $t$  do armazenamento na camada inferior do solo;  $\xi$  a razão entre o armazenamento na capacidade de campo e  $S_{max}$ ;  $\mu$  é um parâmetro que determina a variação de transmissividade com a profundidade;  $\lambda_{\mu}$  é a média na grade da área de contribuição a montante por unidade de contorno. O armazenamento máximo  $S_{max}$  pode ser estimado pelo produto da porosidade do solo  $\phi$  e a espessura média da camada saturada  $D_3$ .

O valor médio da área de contribuição a montante por unidade de contorno, para um perfil de transmissividade de tipo potência (Iorgulescu e Musy, 1997), pode ser estimado por:

$$\lambda_{\mu} = \frac{1}{At} \int_0^{At} \lambda_i^{\mu} da_c \quad (A.2)$$

Onde  $\lambda$  representa a contribuição a montante por unidade de contorno elevada à potência  $\mu$  e  $At$  a área da célula

Usando um histograma da área de contribuição à montante da grade, é possível em cada passo de tempo estimar a fração de área saturada  $A_{sat}$  e portanto o fluxo superficial por saturação  $Q_{sof}$ .

Para levar em conta o retardo entre infiltração e recarga, o modelo MHD-INPE assume que cada unidade de grade é coberta por uma camada superior de solo espacialmente uniforme. Assumindo condições de drenagem livre, (gradiente unitário), o fluxo lateral na camada superior do solo é proporcional à área de montante. Integrando esta equação na área da célula, a seguinte equação é obtida:

$$Q_{ss} = \frac{\alpha D_1 K_{ss} \tan \beta}{\lambda_n^\eta} \left( \frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \quad (A.3)$$

sendo  $K_{ss}$  a condutividade hidráulica da camada superior do solo;  $D_1$  a espessura da camada superior do solo;  $\alpha$  um coeficiente que leva em conta a anisotropia do solo;  $\eta$  é o parâmetro de condutividade de Brooks Corey;  $SS_{max}$  é a capacidade máxima de armazenamento da camada superior do solo igual ao produto de  $D_1$  e a porosidade do solo;  $SS_t$  representa o armazenamento médio na célula no tempo  $t$ ; e  $\lambda_n$  é a área de contribuição média por unidade de contorno elevada à potência  $1/\eta$ . A diferença entre a camada superior do solo e a camada intermediária descontado o fluxo lateral (dado pela equação acima), resulta na seguinte equação de estimativa de fluxo entre as duas camadas  $Q_v$ :

$$Q_v = \frac{K_{ss} \lambda}{\lambda_n^\eta} \left( \frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \left( 1 - \frac{\alpha D_1}{\lambda} \right) \quad (A.4)$$

onde  $\lambda$  representa a contribuição a montante por unidade de contorno; e

∴

$$\lambda_\eta = \frac{1}{A_t} \int_0^{A_t} \lambda_i^\eta da_c \quad (A.5)$$

onde onde  $\lambda$  representa a contribuição à montante por unidade de contorno elevada à potência  $\eta$  e  $A_t$  a área da célula

Para levar em conta retardo adicional devido à recarga do aquífero de grande espessura, e naqueles casos onde o sistema radicular desempenha um papel fundamental na manutenção de evaporação na estação seca, foi incluída a camada intermediária. Esta camada recebe a drenagem profunda  $Q_v$  da camada superior do solo e contribui a recarga do aquífero  $Q_r$  de acordo com a seguinte equação:

$$Q_r = K_{ss} \left( \frac{SR_t}{SR_{max}} \right)^\eta \quad (A.6)$$

Onde  $SR_t$  corresponde ao armazenamento médio na grade da camada intermediária no tempo  $t$ , e  $SR_{max}$  representa a capacidade máxima de armazenamento na camada intermediária, igual ao produto da espessura da camada  $D_2$  e a porosidade do solo.



As equações de fluxo superficial  $Q_{\text{sof}}$  e o subsuperficial  $Q_{\text{ss}}$  geram taxas instantâneas que não consideram o roteamento dentro da célula. Para atenuar esses fluxos, usa-se reservatórios lineares similares aos usados no modelo MGB-IPH (Collischonn et al., 2007), o que resulta em dois parâmetros adicionais:  $C_{\text{sup}}$ , que representa o retardo devido aos fluxos superficial e subsuperficial e  $C_{\text{sub}}$ , que representa o roteamento dentro da célula do fluxo de base  $Q_{\text{sub}}$ .

Cada célula da grade é sub-dividida em unidades de resposta hidrológica (URH) resultantes da combinação de usos da terra, tipos de solo e vegetação. O modelo MHD-INPE resolve o balanço de água para cada URH e calcula o valor de fluxo médio ponderado da área para cada célula de grade. Esta abordagem é comumente usada em modelos hidrológicos de grande escala (por exemplo, Liang et al, 1994).

A perda d'água por interceptação é simulada no modelo utilizando a metodologia proposta por Gash et al. (1995). A extração radicular profunda de captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989), baseado nas estimativas de evaporação, utilizando o método de Penman-Monteith (Monteith, 1965).

Conforme mostra a Figura A.1.b, o modelo considera que as sub-bacias são divididas em células regulares ligadas entre si por canais que representam a rede de drenagem. Os fluxos de água gerados dentro de cada célula são propagados para os canais de drenagem usando reservatório linear simples (RLS), e a troca do fluxo através desses canais entre as células é resolvido usando o algoritmo de Muskingum-Cunge (Cunge, 1969) com a mesma formulação implementada no modelo MGB-IPH (Collischonn et al., 2007). A Tabela A.1 apresenta os parâmetros a serem calibrados e seu significado físico. Maiores detalhes sobre o modelo hidrológico MHD-INPE podem ser encontrados em Rodriguez (2011), e, Siqueira Jr. et al.(2015).

TabelaA.1: Lista de parâmetros do modelo MHD-INPE.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Significado físico</b>
$D_1$	M	0-2	Espessura da camada superior
$D_2$	M	0-30	Espessura da camada intermediária
$D_3$	M	0-100	Espessura da camada inferior
$K_{\text{ss}}$	$\text{m day}^{-1}$	0.001-36	Condutividade hidráulica saturada

$\alpha$	-	1-10000	Coeficiente de anisotropia
$T_{\text{sub}}$	$\text{m}^2 \text{ day}^{-1}$	0.01-100	Transmissividade máxima na camada inferior do solo
$\xi$	-	0-1	Razão o armazenamento na capacidade de campo e $S_{\text{max}}$
$\mu$	-	0.01-4	Parâmetro que representa a diminuição de transmissividade com a espessura da zona saturada
$C_{\text{sup}}$	$\text{day}^{-1}$	0.01-100	Parâmetro de roteamento para fluxo superficial e subsuperficial
$C_{\text{sub}}$	$\text{day}^{-1}$	0.001-100	Parâmetro de roteamento para fluxo base

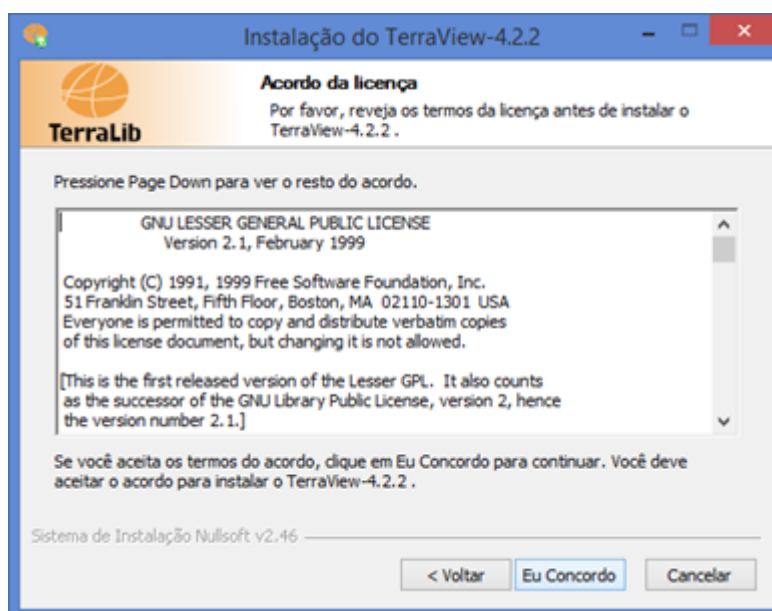
---

## ANEXO B - TerraHidro

### 1) Instalação do software TerraView

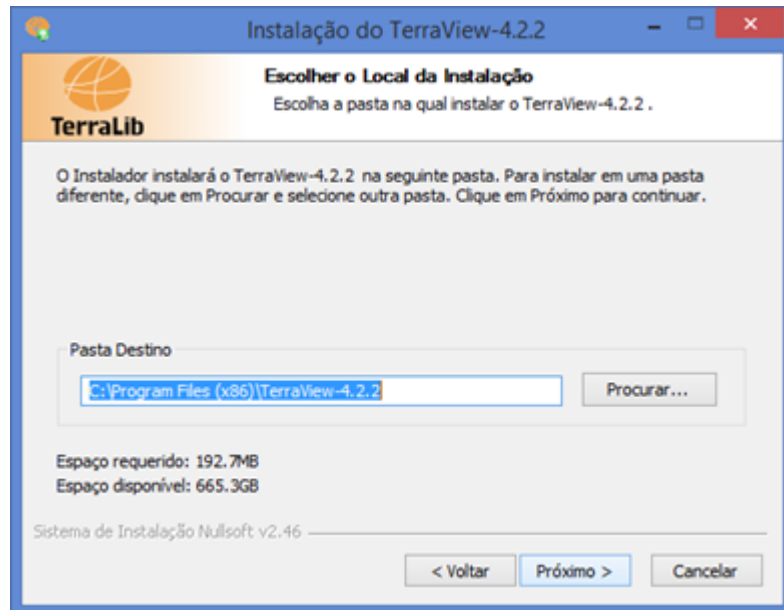
O TerraHidro é uma ferramenta desenvolvida utilizando as bibliotecas TerraView, sendo assim estes componentes são necessários para a instalação do TerraHidro. O software para instalar o TerraView se encontra disponível no endereço <http://www.dpi.inpe.br/terraview/index.php>.

- a. Dê duplo clique no ícone do instalador do TerraView e pressione Next para começar a instalação. Será apresentado o acordo de licença do produto como visto na figura B.1. Clique em “Eu Concordo”.



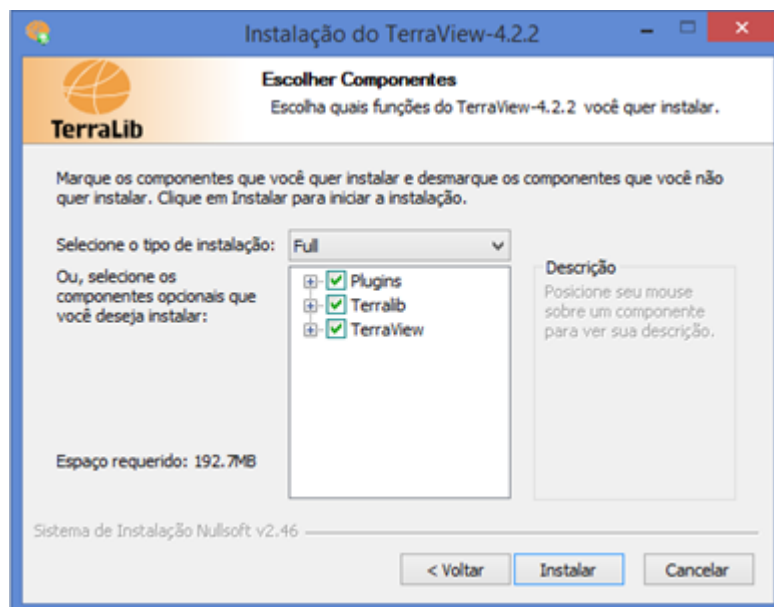
**Figura B.1** – Janela inicial de instalação do software TerraView.

- b. Selecione a pasta em que será instalado como mostra na Figura B.2. Assim como na maioria dos softwares a pasta padrão é o disco C: Pressione “Próximo”.



**Figura B.2** – Local de instalação do TerraView

- c. Uma vez indicado a pasta de instalação será solicitado os componentes a serem instalados junto com o TerraView. Não é necessário realizar alteração nos componentes que são selecionados automaticamente. Após a clique em “Terminar” para fechar o instalador.

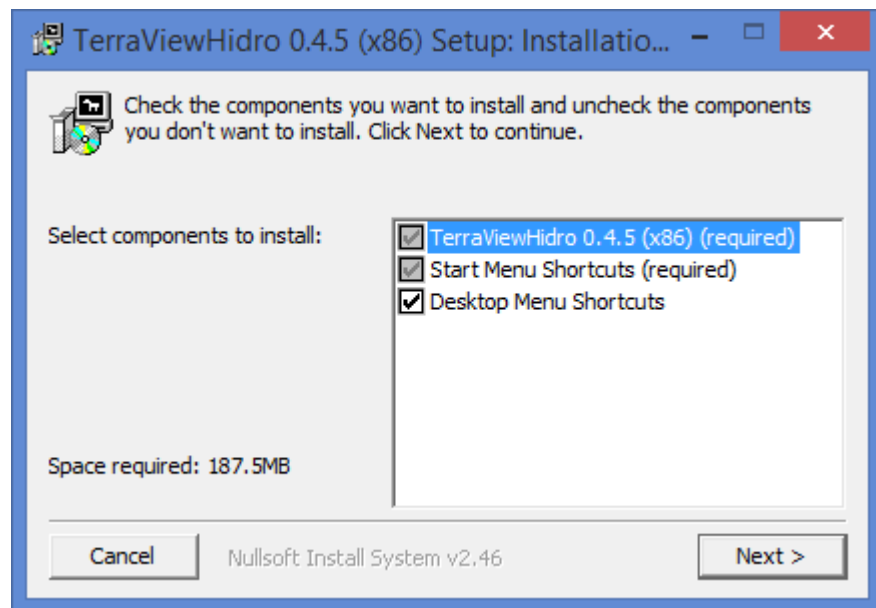


**Figura B.3** – Escolha dos componentes de instalação do TerraView

## 2) Instalação do SIG TerraHidro

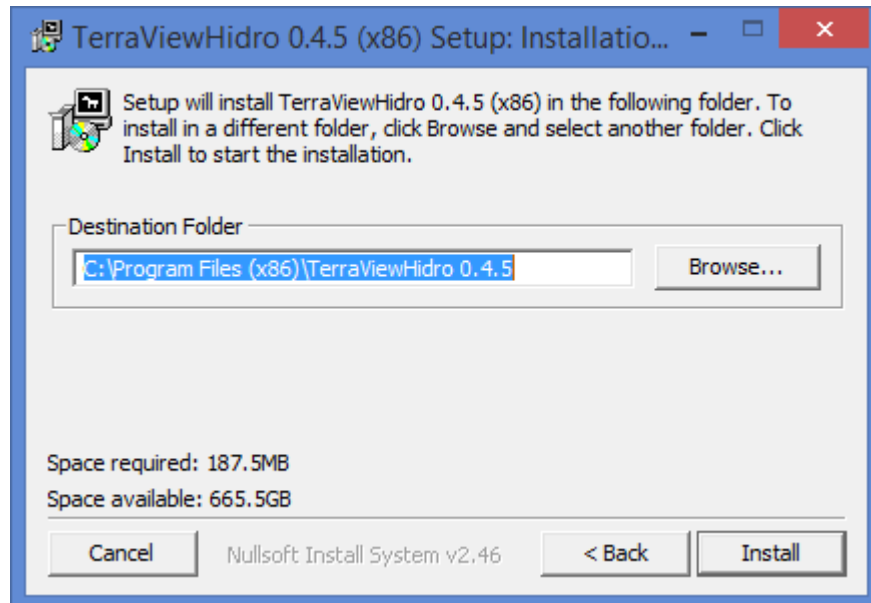
Após instalar o software TerraView, é possível instalar o TerraHidro. Este software pode ser encontrado no endereço <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro>.

- a. Na janela inicial de instalação do TerraHidro (Figura B.5), escolha os componentes que você deseja instalar, sendo recomendado instalar todos os componentes que são automaticamente selecionados.



**Figura B.5** – Janela inicial de instalação do TerraHidro

- b. Selecione a pasta em que será instalado como mostra na Figura B.6. Assim como na maioria dos softwares a pasta padrão é o disco C: Pressione “Próximo”.

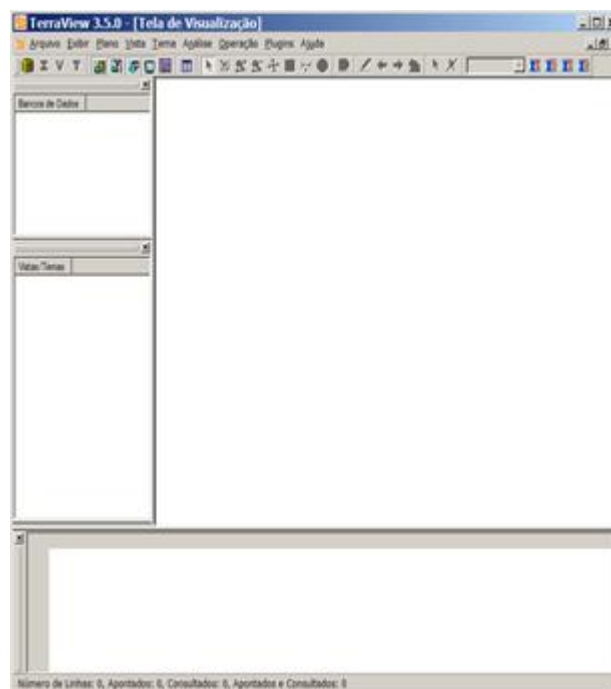


**Figura B.6** - Local de instalação do TerraHidro

### 3) Bases de dados no TerraHidro

O procedimento abaixo descreve como criar ou conectar uma base de dados ao software TerraHidro.

- a. Ao Abrir o software, e será exibida uma janela semelhante à Figura B.7



**Figura B.7** – Janela inicial do TerraHidro

- b. Na barra de menu clique em *arquivo*, em seguida clique em “*Banco de Dados*”. Na janela recém-aberta (Figura B.8) selecione a opção criar, selecione o banco de dados de sua preferência em seguida informe o servidor e a porta utilizada pelo banco de dados. Informe o nome do usuário e a senha utilizada para acessar o banco de dados de seu computador. Por fim informe o nome do banco de dados que deseja ser criado, a opção *encoding* pode ser deixada em branco. O TerraHidro assim como o TerraView utiliza um servidor de banco de dados para armazenar os dados geográficos, cada nova camada gerada pelas operações do programa é armazenada na forma de banco de dados. O TerraHidro traz as informações do banco de dados selecionado, e então converte as informações em imagens. Por fim clique em ‘Executar’



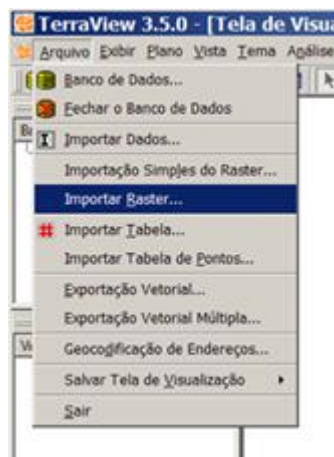
**Figura B.8** – Menu de Criação/Conexão com o banco de dados

#### **4) Importação do Modelo Digital de Elevação**

A próxima etapa aborda a importação de um Modelo Digital de Elevação (DEM-Digital Elevation Model) para uma base de dados acessada pelo TerraHidro. Deve ser utilizado um Modelo de Elevação Digital no formato *geotiff*, onde a cada elemento (x,y) da grade regular está associado um valor de elevação do terreno, em **metros**. Normalmente, emprega-se o DEM disponibilizado pelo CGIAR-CSI, referente ao *NASA Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). O SRTM constitui um projeto conjunto entre duas

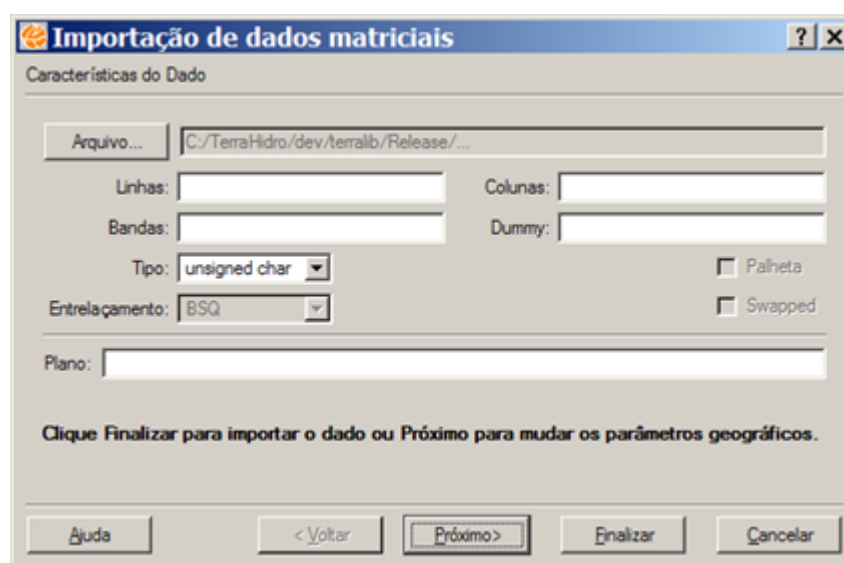
agências dos Estados Unidos, a *National GeoSpatial Intelligence Agency* (NGA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

- a. Abra a base de dados onde se deseja importar o DEM. Após abrir uma nova conexão com o banco de dados, clique na opção *arquivo* na *barra de menu*(figura B.9), em seguida clique em “*Importar Raster*”.



**Figura B.9** – Importação de Modelo Digital de Elevação

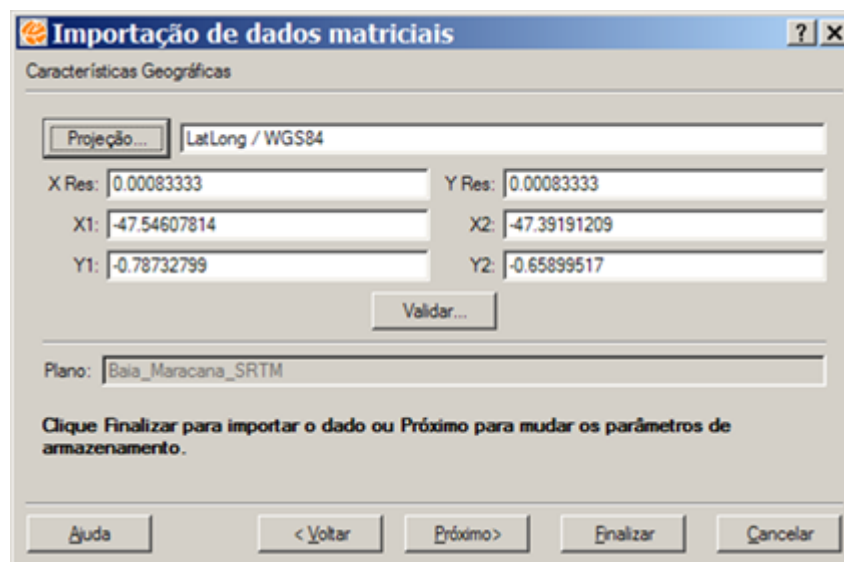
- b. Na janela de importação de dados (Figura B.10), é necessário indicar a localização do arquivo que se deseja trabalhar. Ao carregar o arquivo os valores das linhas e colunas será automaticamente preenchido, sendo necessário informar o valor “*Dummy*” isto é o valor que o arquivo utiliza para identificar áreas sem topografia (por exemplo corpos de água e oceanos).



**Figura B.10** – Importação de dados matriciais



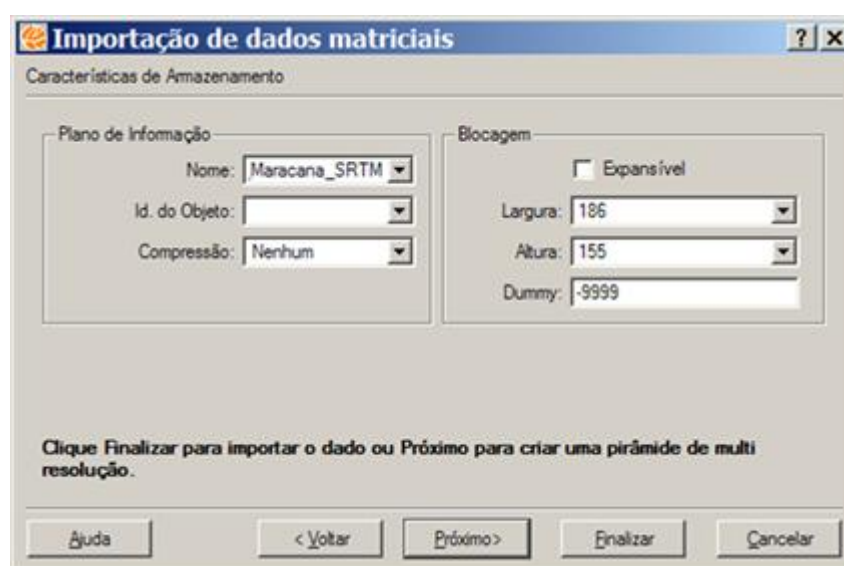
- c. A próxima janela (Figura B.11) contém as informações geográficas (resolução da imagem, coordenadas da região e a projeção do arquivo) do arquivo carregado. Normalmente estas informações são obtidas do próprio arquivo importado pelo TerraHidro.



A janela "Importação de dados matriciais" apresenta a aba "Características Geográficas". No topo, há um botão "Projeção..." e um campo de texto contendo "LatLong / WGS84". Abaixo, há campos para "X Res:" (0.00083333) e "Y Res:" (0.00083333). Seguem-se campos para as coordenadas: "X1:" (-47.54607814), "X2:" (-47.39191209), "Y1:" (-0.78732799) e "Y2:" (-0.65899517). Um botão "Validar..." está centralizado. Abaixo, há um campo "Plano:" com o valor "Baia\_Maracana\_SRTM". Uma mensagem orienta o usuário: "Clique Finalizar para importar o dado ou Próximo para mudar os parâmetros de armazenamento." Na base, há botões "Ajuda", "< Voltar", "Próximo >", "Finalizar" e "Cancelar".

**Figura B.11** – Janela contendo as informações geográficas

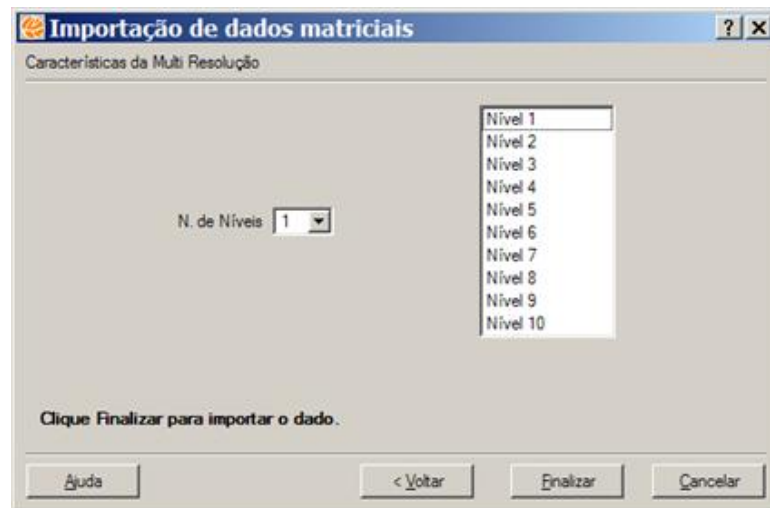
- d. No próximo passo é necessária atenção aos parâmetros de blocagem para dados com número de colunas ou de linhas menores que 512. Caso o arquivo tenha dimensões menores, é necessário definir manualmente os valores de largura e altura iguais aos valores de colunas e linhas.



A janela "Importação de dados matriciais" apresenta a aba "Características de Armazenamento". À esquerda, sob o título "Plano de Informação", há campos para "Nome:" (Maracana\_SRTM), "Id. do Objeto:" e "Compressão:" (Nenhum). À direita, sob o título "Blocagem", há um checkbox "Expansível" desmarcado, e campos para "Largura:" (186), "Altura:" (155) e "Dummy:" (-9999). Uma mensagem orienta o usuário: "Clique Finalizar para importar o dado ou Próximo para criar uma pirâmide de multi resolução." Na base, há botões "Ajuda", "< Voltar", "Próximo >", "Finalizar" e "Cancelar".

**Figura B.12** – Informações de blocagem

- e. Após definir os parâmetros de blocagem clique em “*Próximo*”. Na nova janela (Figura B.13) é necessário definir os níveis multi-resolução. Para dados grandes (maiores que 5000 linhas ou colunas) defina o número máximo de níveis de multi-resolução, facilitando a visualização do arquivo pelo TerraHidro. Após definir os níveis de resolução, clique em “*Finalizar*” para realizar a importação do dado matricial (Figura B.14).



**Figura B.13** – Definição dos níveis multi resolução.



**Figura B.14** – Visualização do Modelo Digital de Elevação após a importação

## 5) Extração das direções de fluxo

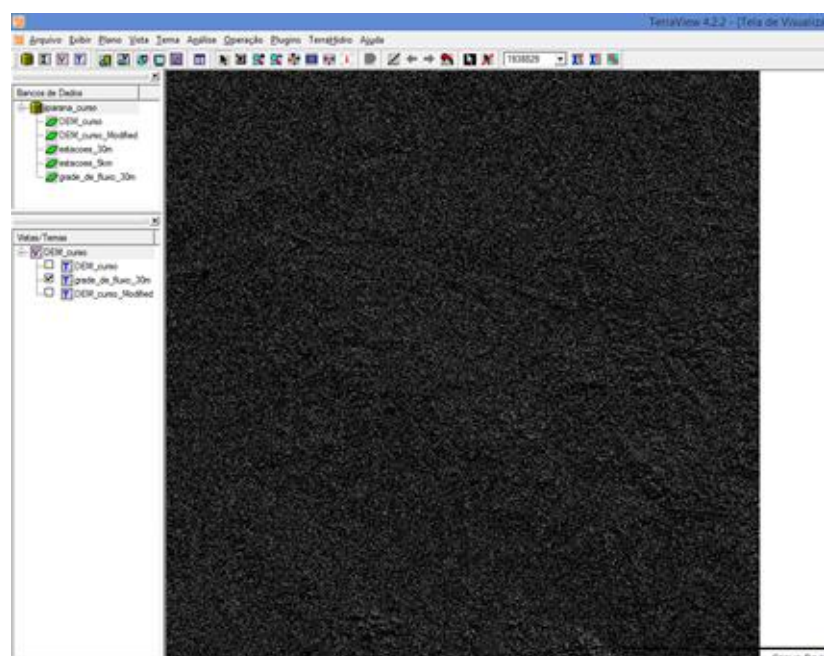
A grade de direção de fluxo nada mais é que a direção tomada pelo fluxo de uma célula da grade considerando suas oito células vizinhas. O fluxo vai pela direção de maior declividade. Esta etapa pode ser realizada após a importação de DEM.

- a. Na barra de ferramentas, clique na abra *Hydrologic Tools* (Figura B.15)



**Figura B.15** – Barra de Ferramentas com destaque ao ícone de ferramentas Hidrológicas.

- b. A janela que será aberta será composta de diversas abas, selecione a “*Flow Extraction*”. O parâmetro de entrada necessário para a execução desta etapa é o Modelo de Elevação Digital que foi alocado no banco de dados. Ao final desta operação a camada da direção de fluxo será adicionada ao menu lateral esquerdo *Vistas/Temas*. Cada célula dessa matriz tem um código correspondente a uma determinada direção do fluxo existente na célula. O código zero é atribuído às células onde não foi possível determinar a direção de fluxo.

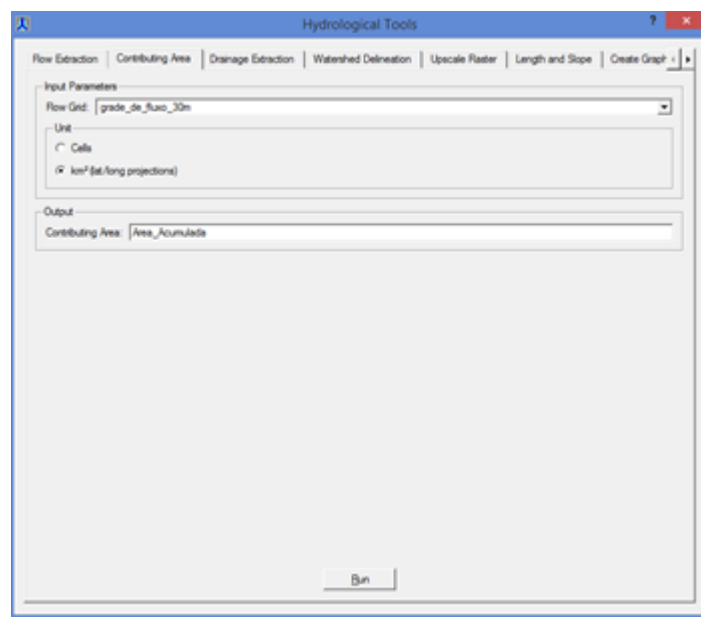


**Figura B.16** – Direção de fluxo

## 6) Extração da matriz de área acumulada

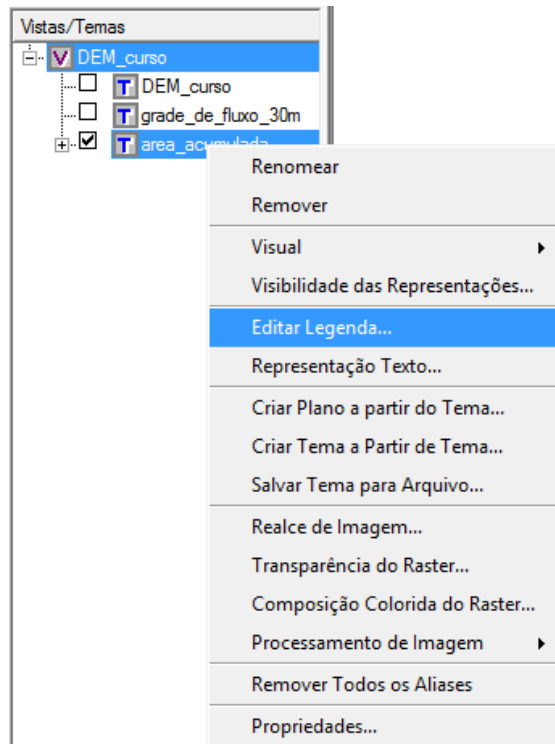
A próxima etapa a ser abordada será extração da matriz de área acumulada, onde cada célula contém o valor de sua área multiplicado por número de células por onde a água passa até chegar nesta célula, usando a grade de fluxo extraída no tópico 5.

- a. No menu de ferramentas hidrológicas, vá na segunda aba “*Contribution Area*” (Figura B.17), os parâmetros de entrada necessários para realizar tal operação é a grade de direção de fluxo e a unidade a ser trabalhada, temos preferência por km<sup>2</sup>. Selecione o nome da saída e clique em “Run”.



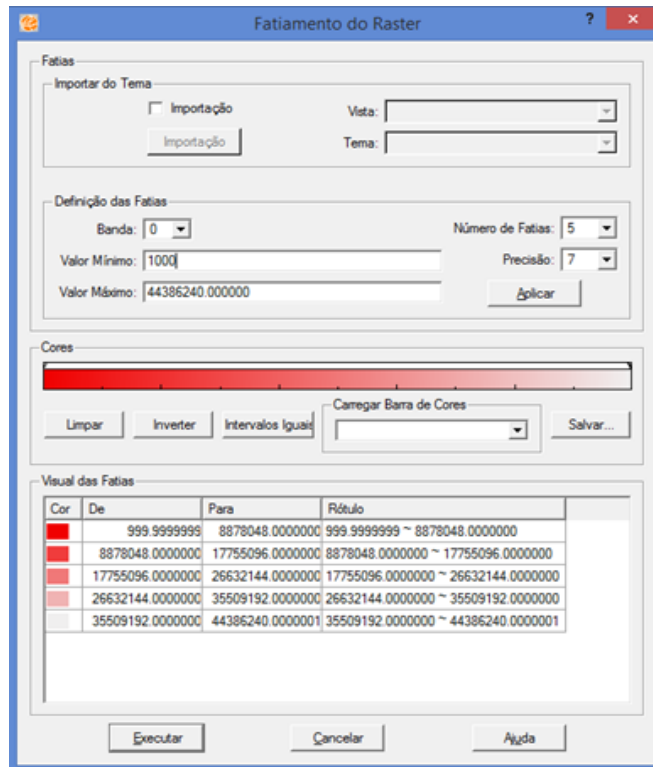
**Figura B.17** – Extração da área acumulada.

- b. Caso necessário, após a extração da área acumulada altere a legenda do arquivo para facilitar a sua visualização. Para isso clique com o botão direito na camada da área acumulada localizada no painel Vistas/Temas no menu lateral esquerdo (Figura B.18) e vá na opção “*Editar Legenda...*”

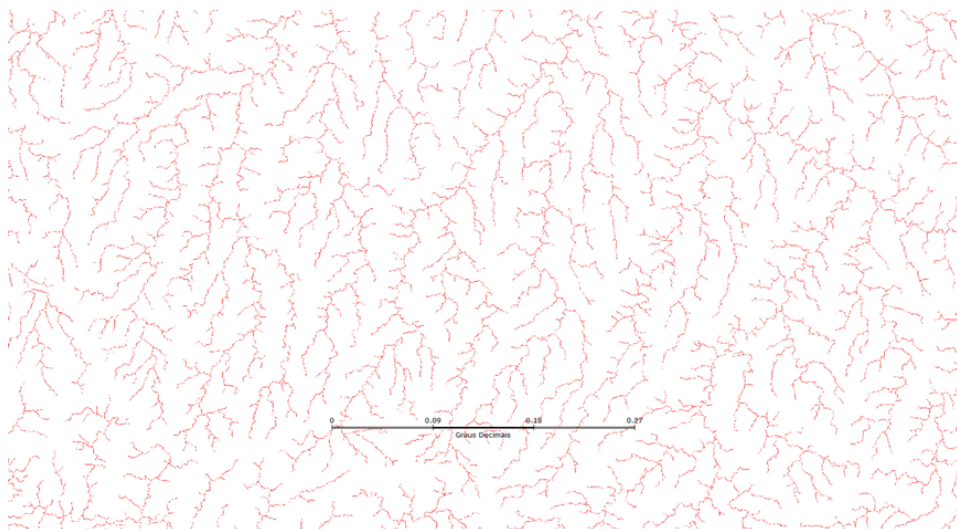


**Figura B.18** – Editando legenda

- c. No menu “Fatiamento do Raster”(Figura B.19), selecione o número de fatias, isto é, a quantidade de classes que sua legenda irá conter. É importante ressaltar que o valor mínimo definido eliminará da visualização todos os valores menores que o estipulado. Após determinar o número de fatias e o valor mínimo de corte, clique em “Aplicar”, e em seguida clique em “Executar”. O resultado desta operação pode ser visto na figura B.20



**Figura B.19** - Ajustando legenda da área acumulada

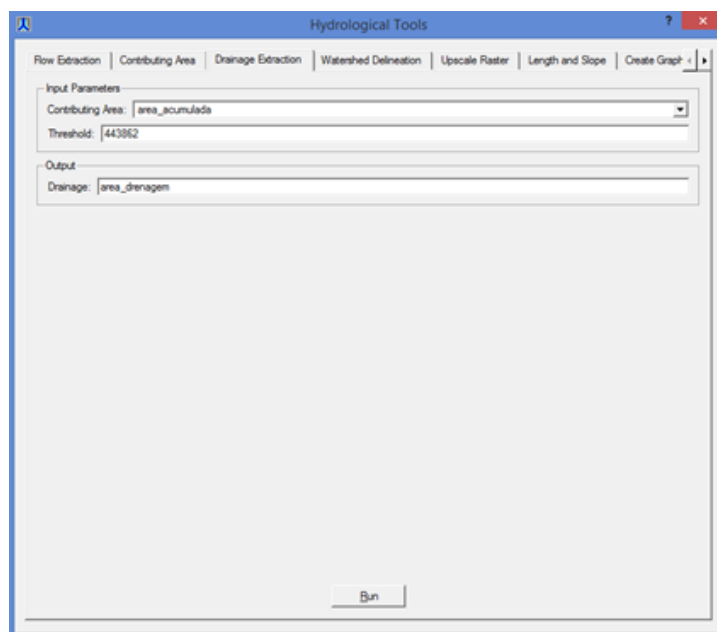


**Figura B.20** - Área acumulada após a edição da legenda

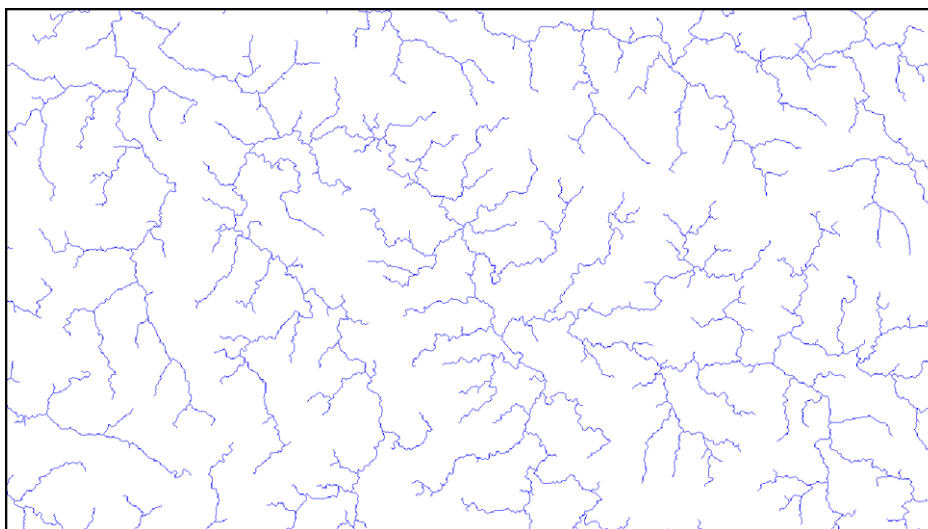
## 7) Extração da rede de drenagem

Uma vez definida a área acumulada de uma determinada região, podemos extrair a drenagem da região. Nesta nova camada, todas as células da área acumulada, com valores iguais ou maiores a um limiar estipulado, serão sinalizadas como células de drenagem.

- a. No menu de ferramentas hidrológicas, clique na aba “*Drainage Extraction*” (Figura B.21). Os parâmetros de entrada necessários são a área acumulada e o Threshold (limiar de corte, quanto menor o valor informado, mais detalhado será a drenagem extraída). Defina o nome do plano da drenagem que será criada. Um exemplo de drenagem pode ser observado na Figura B.22



**Figura B.21** - Extraíndo a drenagem da região.

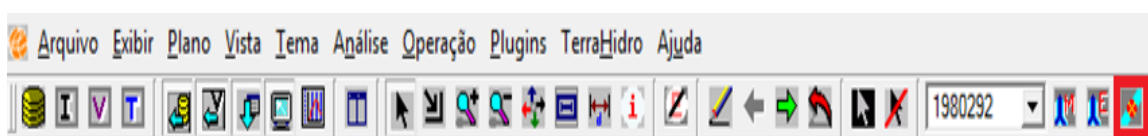


**FiguraB.22** - Exemplo de drenagem criada pelo TerraHidro

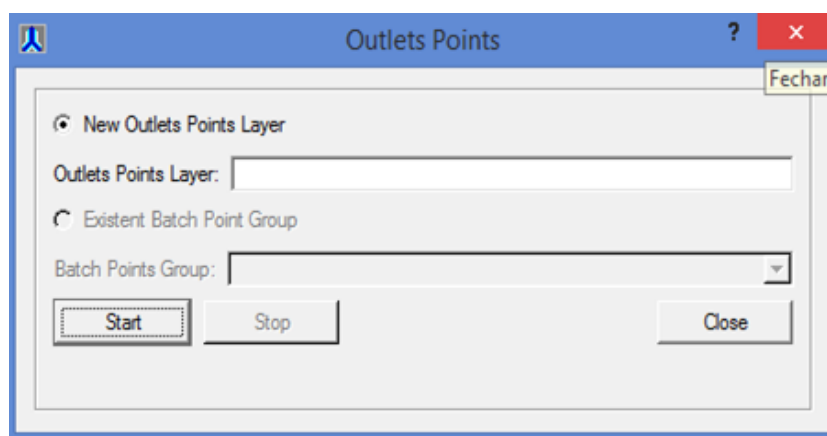
## 8) Delimitação das sub-bacias

A delimitação das sub-bacias da área de estudo faz parte do processo de criação das entradas do modelo MHD-INPE. Tal etapa é uma das mais trabalhosas, pois ela requer atenção e paciência para a sua conclusão. O primeiro passo é definir os pontos onde se deseja limitar as sub-bacias. Esses pontos geralmente estão relacionados a localização de estações fluviométrica. Em nosso exemplo de estudo, iremos utilizar as estações fornecidas pela ANA (Agência Nacional de Águas)

- a. Na barra de tarefas clique no ícone “*Create batch point*” (Figura B.23), com isso o menu “*Outlet points*” será aberto. Informe o nome da camada dos pontos então clique em “*Start*”(Figura B.24).



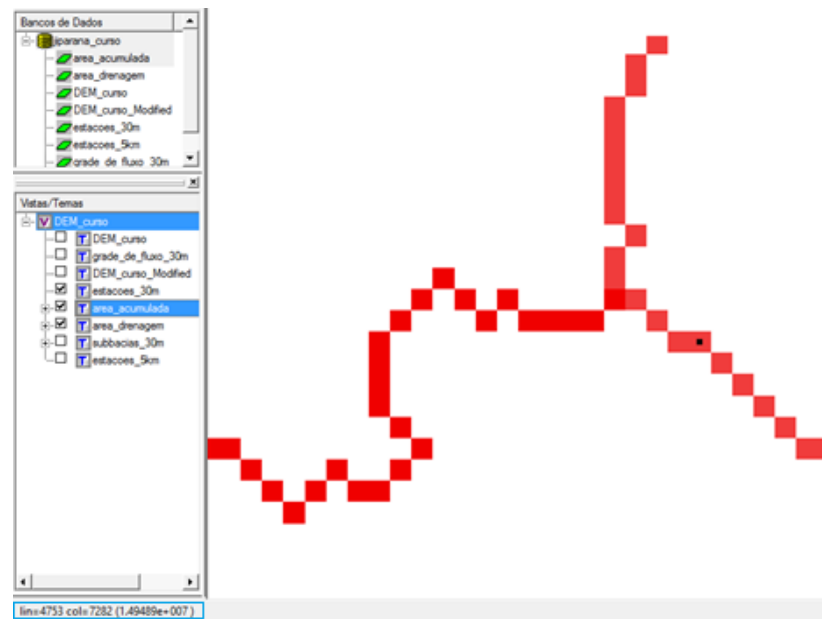
**Figura B.23** - Ícone “Create batch point” destacado com contorno vermelho.



**Figura B.24** - Menu “Outlets Points”

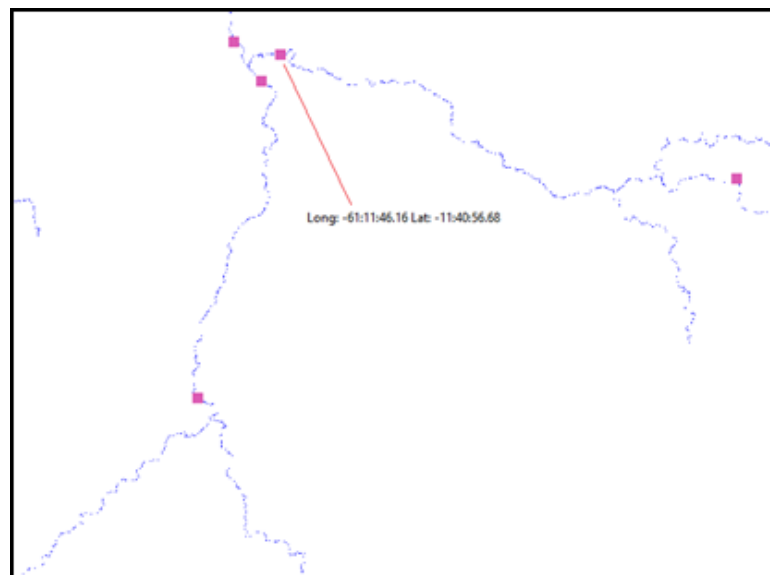
- b. É necessário escolher um ponto cuja área da bacia seja próxima da área fornecida pela ANA(ou por outro critério selecionado pelo usuário), em geral é aceita uma tolerância de 10% de erro para mais ou para menos. Para verificar a área da bacia, clique em “*Cursor de Informação*” no menu de ferramentas, então passe o mouse pela área acumulada, o valor da área será mostrado no canto inferior esquerdo, abaixo do menu “*Vistas/Temas*” como pode ser visto na figura B.25.





**Figura B.25** - Verificando valor da área acumulada.

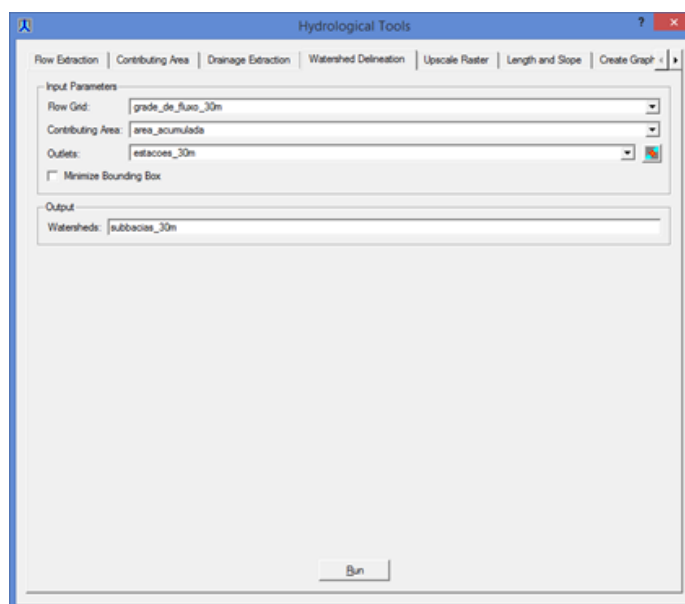
- c. Também é necessário escolher um ponto que coincida com a estrutura da drenagem observada, como por exemplo a localização de afluentes e confluências (Figura B.26), por este motivo muitas vezes será necessário selecionar um ponto na drenagem mais próximo do ponto desejado.



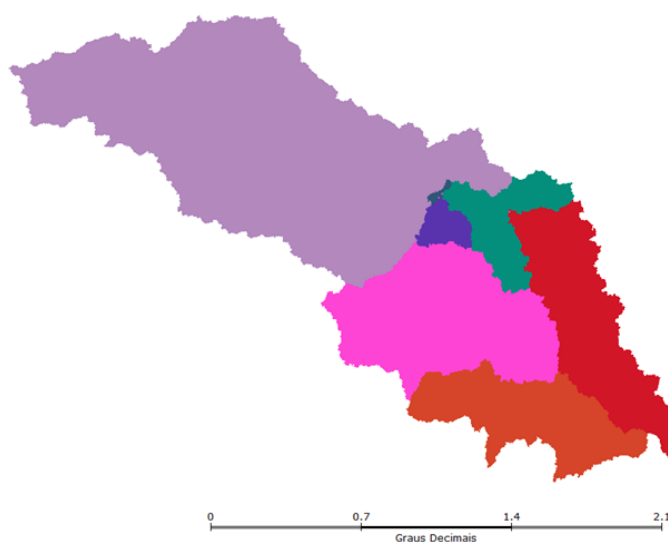
**Figura B.26** - ponto selecionados para delimitar sub bacias previamente determinadas.

- d. Após determinar os pontos, clique em “Stop” e feche a janela “Outlet Points”, em seguida, no menu das ferramentas hidrológicas clique na aba “Watershed Delimitation” (Figura B.27),. Os parâmetros necessários para

realizar a delimitação das bacias são; a grade direção de fluxo, a área acumulada e a camada de pontos selecionado anteriormente, determine o nome da camada de saída e clique em “Run”. Como exemplo, desta operação podemos ver na figura B.28 a delimitação das sub-bacias da bacia do Ji-Paraná.



**Figura B.27** - Determinando as bacias da área de estudo.

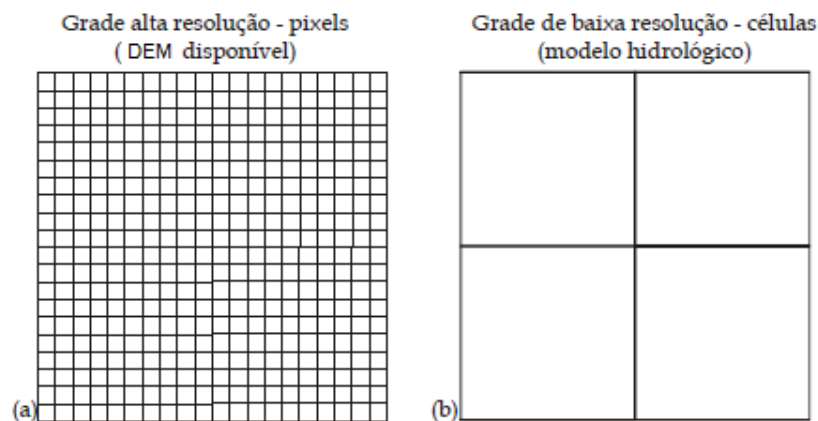


**Figura B.28** - Camada gerada após a operação “*Watershed delimitation*”

Até o momento trabalhamos com os arquivos em alta resolução (geralmente os arquivos disponíveis pelo CGIAR-CSI, estão na resolução de 90 ou 30 metros), porém o modelo MHD-INPE, assim como outros modelos hidrológicos distribuídos, representa a bacia por

células em resoluções mais grosseiras, usualmente da ordem de cerca de 10 km de dimensão, que denominamos “baixa resolução”. A Figura B.29 ilustra os conceitos de pixels e células.

Uma das exigências quanto à definição das resoluções alta e baixa é que as dimensões dos pixels e as dimensões das células do modelo sejam múltiplas entre si, de tal forma que em cada célula esteja contido o mesmo número inteiro de pixels.



**Figura B.29** - Diferença entre as resoluções: (a) alta resolução (pixels) e (b) baixa resolução (células) empregada pelo modelo hidrológico.

### 9) Obtenção da rede de drenagem e da área acumulada em baixa resolução

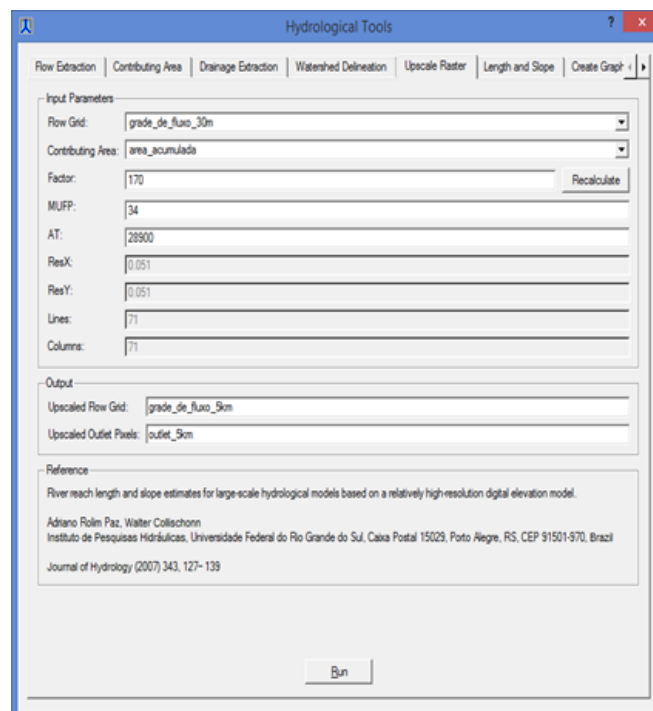
A determinação das direções de fluxo e das áreas de drenagem acumuladas de alta resolução tem como objetivo principal servir como informação para a derivação das direções de fluxo de baixa resolução, isto é, a direção de fluxo de cada célula do modelo hidrológico. Esse processo é conhecido como *Upscaling* da direção de fluxo.

- a. Para realizar a tarefa de *Upscaling*, clique na aba “*Upscale Raster*” no menu de ferramentas hidrológicas. Os parâmetros solicitados para realizar a alteração de resolução são: a grade de direção de fluxo da alta resolução e a área acumulada que foi gerada pela grade de fluxo selecionada. O “Factor” (fator) que é solicitado, é um valor referente à proporção de diminuição da escala. Por exemplo, para passar uma escala de 30 metros para 1 km é necessário multiplicar o tamanho do pixel por 33,3333. Ao selecionar o

valor de “Factor” adequado clique em “Recalculate” e os valores seguintes serão recalculados:

- MUFP: para uma determinada célula, escolhe-se inicialmente como pixel exutório aquele que apresenta a maior área de drenagem acumulada dentre todos os pixels contidos na célula. Então verifica-se o comprimento do curso d’água principal a montante desse pixel dentro da célula, caso esse comprimento seja superior a um valor mínimo pré-definido, o pixel testado é aceito como pixel exutório. Tal valor mínimo é denominado de Caminho Mínimo de Montante (CMM), normalmente é considerado 1/5 da resolução da célula;
- AT: Este parâmetro é calculado através da direção de fluxo, percorrendo o caminho do escoamento desde seu pixel exutório; a cada pixel exutório de uma célula vizinha encontrado, verifica-se o incremento na área de drenagem; caso seja superior a um valor mínimo pré-definido, a célula analisada drena para essa célula vizinha; tal valor mínimo constitui um parâmetro denominado Área Incremental Mínima e normalmente considera-se ser igual à área da célula;

- b. Para buscar o ajuste correto é preciso analisar os valores das Resoluções (ResX e ResY), conforme for alterando o valor de “Factor” a resolução também irá mudar se aproximando ou afastando da resolução desejada.



**Figura B.30**– Realizando Upscaling da direção de fluxo

## 10) Verificação e correção da rede de drenagem de baixa resolução

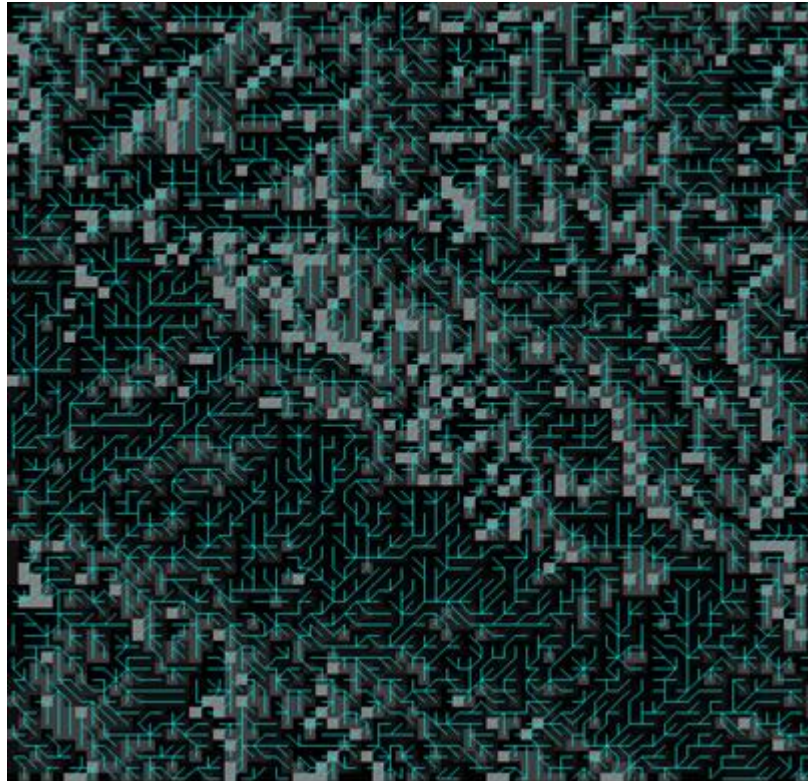
Após realizar a tarefa de *Upscale*, será criado a grade de direção de fluxo na resolução de implementação do modelo hidrológico, sendo necessário extrair novamente a área acumulada; a drenagem; delimitar novamente os pontos das bacias e gerar as sub bacias da área de estudo na resolução do modelo. A transformação de resolução pode acarretar em certos erros na drenagem que devem ser corrigidos.

Para identificar essas falhas é necessário antes realizar um diagnóstico que se divide em duas partes (a) Verificar se as áreas das bacias delimitadas estão parecidas (isto é dentro dos 10% de tolerância para mais ou para menos) (b) Verificar a forma das bacias na alta resolução e na baixa resolução são coerentes. Na figura B.31 podemos ver um exemplo de bacias delimitadas que divergem entre si. Caso isto aconteça é necessário realizar uma correção na rede de drenagem de baixa resolução, para tal operação é necessário criar o grafo do arquivo.



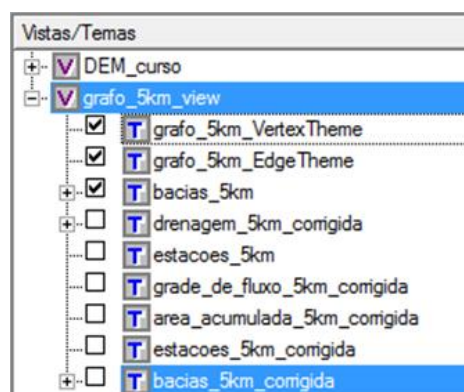
**Figura B.31** - Alterar a resolução pode acarretar em um drenagem incoerente, gerando bacias divergentes.

- a. No menu de ferramentas hidrológicas clique na aba “*Create Graph*”, nos parâmetros de entrada informe a grade de direção de fluxo na resolução do modelo e o nome da camada de saída. Vale lembrar que caso a direção de fluxo informada for a da alta resolução, esta não será gerada devido a imensa quantidade de células. Após gerada uma nova camada irá surgir no menu lateral “*Vistas/Temas*”. Ao visualizar o arquivo, será desenhado na tela o grafo da área de estudo (Figura B.32).



**Figura B.32** - grafo criado a partir da ferramenta “Create Graph”

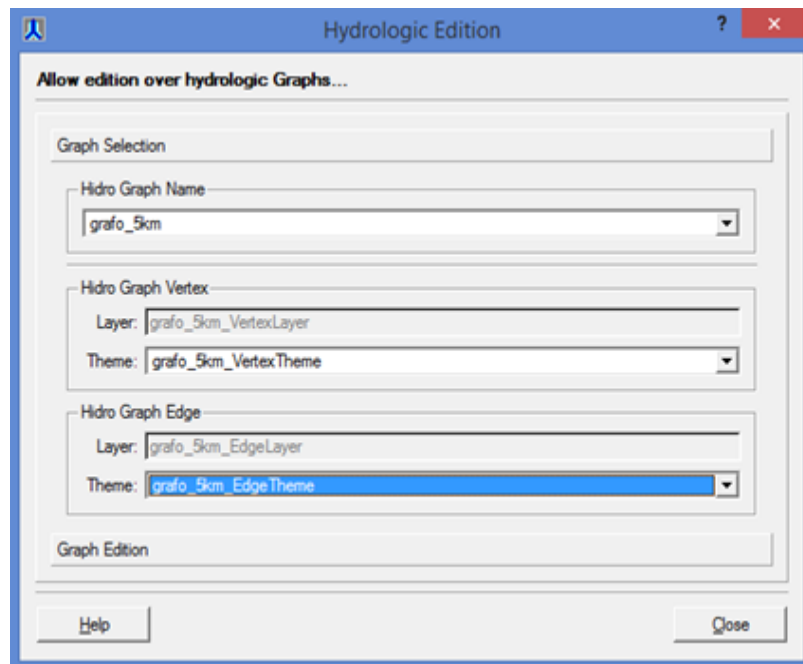
A visualização do TerraHidro é feita por hierarquia de camadas. Assim para iniciar o processo de correção é necessário visualizar o grafo junto com a bacia gerada, facilitando a localização dos vértices a serem alterados. Para isto, na barra “Vistas/Temas” é necessário colocar primeiro as camadas do grafo e depois a camada das bacias, como apresentado na figura B.33.



**Figura B.33** - Hierarquia de camadas do TerraHidro.

Após criar o grafo do arquivo e ordena-los na aba “Vistas/Temas” podemos iniciar a correção da direção de fluxo:

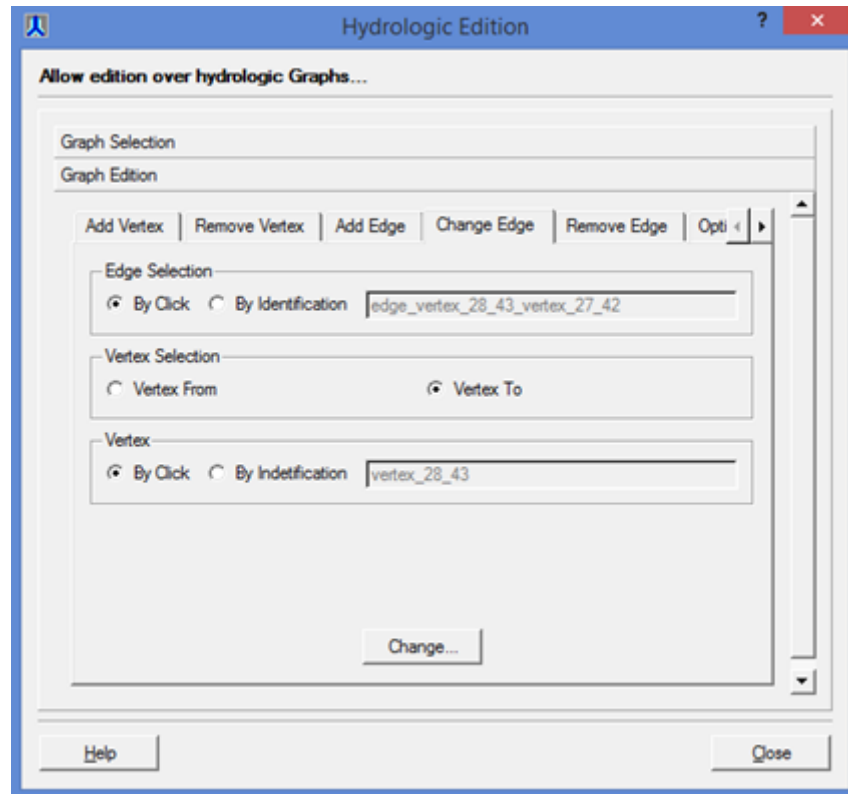
- a. No menu de ferramentas clique em “Graph Editions”, na nova janela como a da figura B.34, informe o grafo criado, o plano de vértices e o plano de arestas em seguida clique em “Graph Edition”.



**Figura B.34** - Menu de edição de grafos.

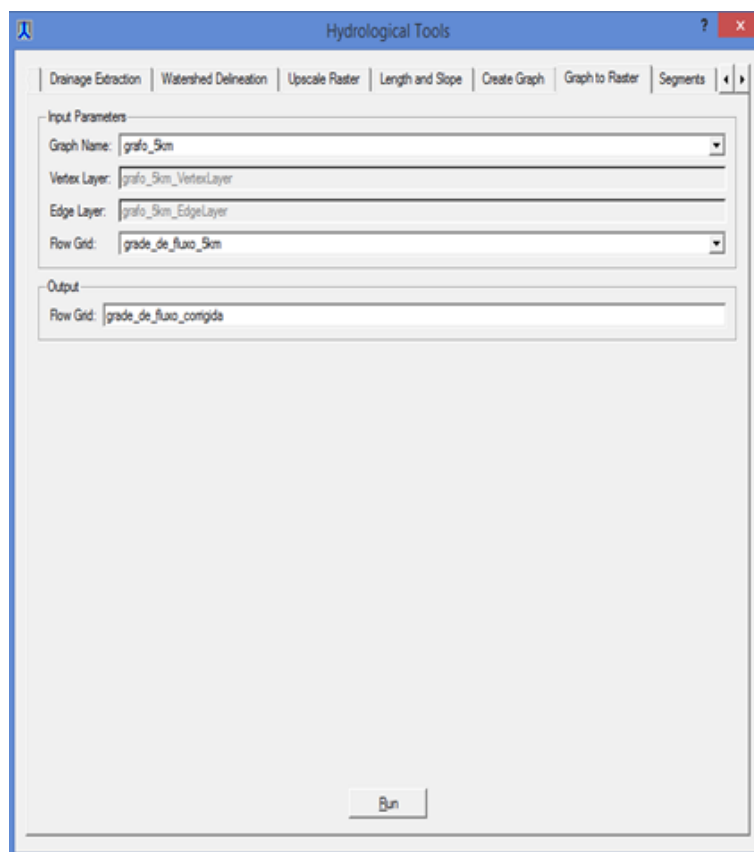
- b. Na aba de edição de grafos(figura B.35), clique em “*Change Edge*”, em“*Edge Selection*”selecione “*By Click*”, então no plano de visualização selecione a aresta que deseja alterar, volte ao menu de alteração de grafo selecione “Vertex to” para direcionar a aresta para o vértice desejado, então selecione a opção “*By Click*” na área “Vertex”,volte aode visualização e selecione o vértice que deseja enviar a aresta. Por fim clique em “Change”





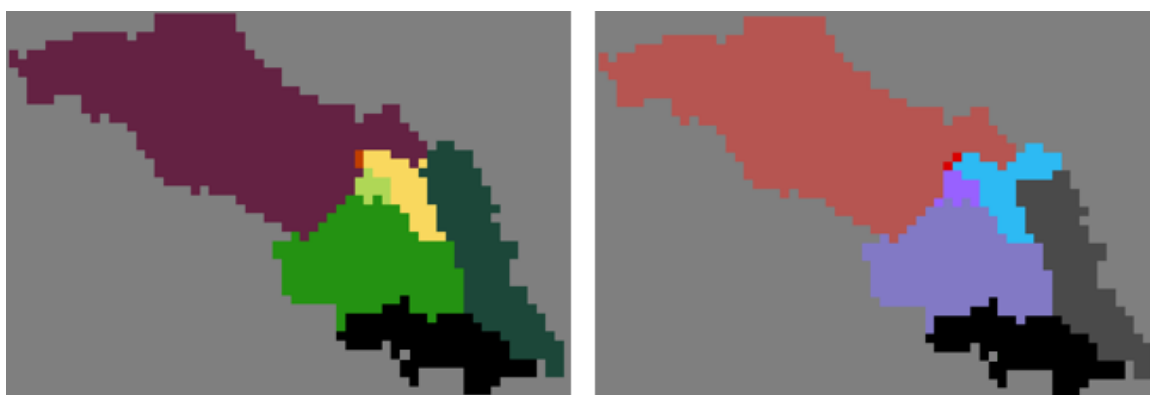
**Figura B.35** - Janela de alteração de grafo.

- c. Após identificar e alterar as arestas corrigindo a drenagem, é necessário gerar um novo arquivo de direção de fluxo com base no grafo corrigido. No menu de ferramentas hidrológicas, clique na aba “*Graph to Raster*”(figura B.36), e selecione os componentes do grafo alterado e a grade de fluxo que originou o grafo. Após indicar o nome do arquivo de saída clique em “Run”



**Figura B.36** - Criar direção de fluxo a partir do grafo alterado.

- d. Uma vez criada a nova direção de fluxo, é necessário refazer novamente as camadas área acumulada, drenagem e sub-bacias. Após gerar as novas sub-bacias, verifique se as áreas de drenagem estão no limiar de erro aceitável(10% para mais ou para menos) e se a forma da bacia corrigida esta coerente com a forma real bacia. Na figura B.37 podemos observar o resultado da correção realizada na bacia do Ji-Paraná.

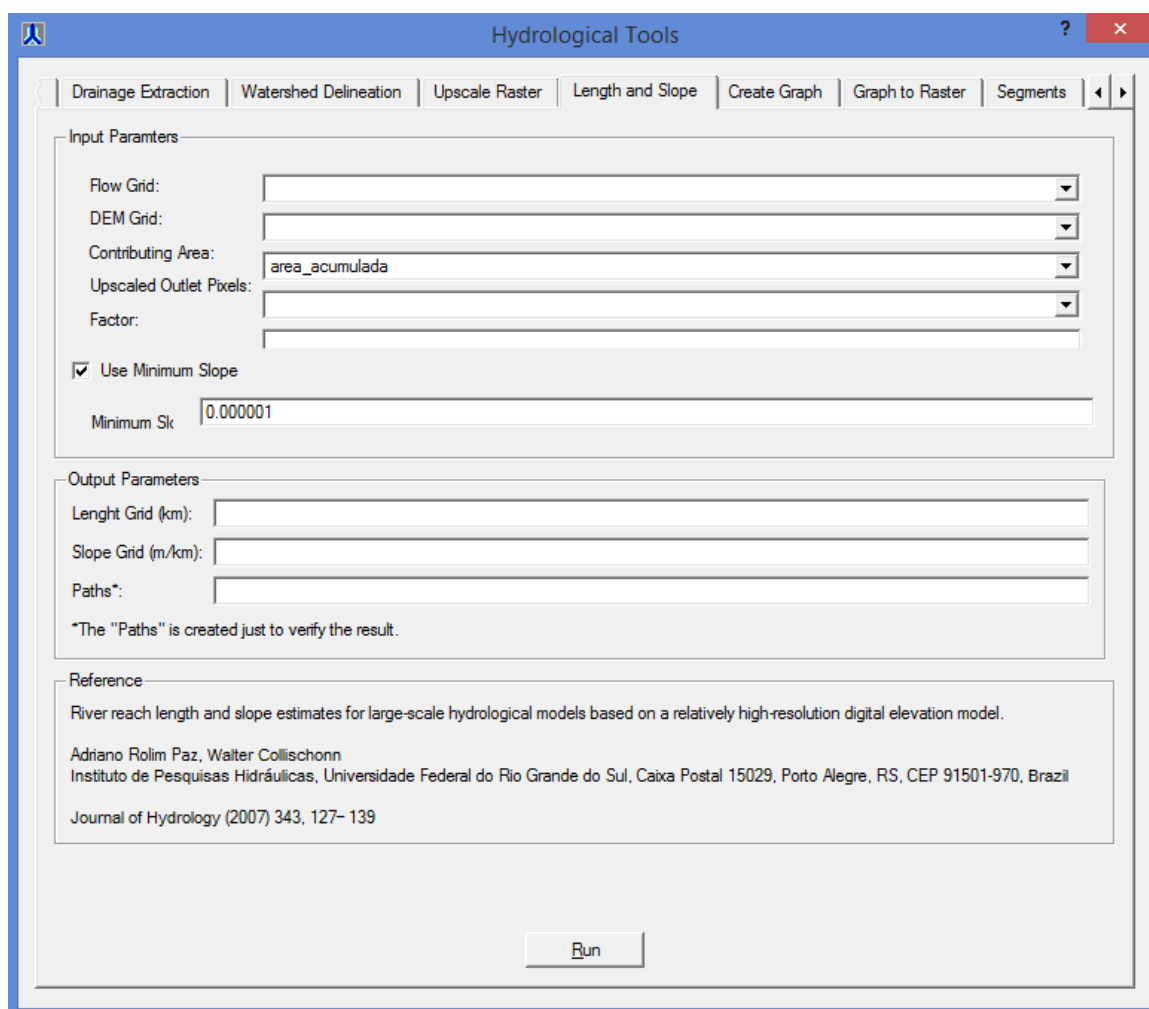


**Figura B.37** - Comparação entre um plano com bacias corrigidas a direita.

## 11) Extração dos dados de declividade e comprimento de canais em cada célula

Uma vez corrigido, será necessário criar os arquivos de declividade, trechos e caminhos. O arquivo de declividade(slope) contém informações referente a inclinação existente entre o menor e o maior ponto da célula. O comprimento(lenght) é o comprimento da drenagem existente em determinada célula.

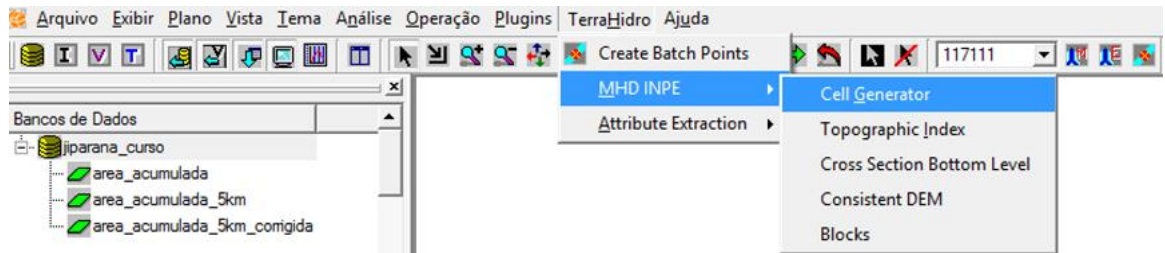
- a. No menu de ferramentas hidrológicas, clique em “*Lenght Slope*”(figura B.38), selecione os parâmetros de entrada necessários; a grade de direção de fluxo da alta resolução; o modelo digital de elevação; a área acumulada em alta resolução; o arquivo de células gerado no processo de *Upscaling*. Por último informe o fator de multiplicação de escala, este valor deve ser o mesmo utilizado na etapa de *Upscaling*.



**Figura B.38** - criação de trecho, declividade e caminhos.

## 12) Extração do arquivo Cell.Hig

A última etapa na criação dos dados necessários para a execução do MHD-INPE, é a extração do arquivo Cell.Hig. Na barra de ferramentas superior clique em “TerraHidro”(figura B.39), com isso irá aparecer um menu em cascata, nas opções fornecidas clique em “MHD INPE”, em seguida em “Cell Generator”.



**Figura B.39**—extraindo arquivo de células Cell.Hig

- b. Na janela do Cell Generator os parâmetros solicitados são; Modelo digital de elevação corrigido; grade de fluxo corrigida; área acumulada corrigida; bacias corrigidas; arquivo de comprimentos (Lenght); arquivo de declividades (slope) e o arquivo de trechos (path). Por fim, informe o caminho de saída e clique em “Run”

## ANEXO C - ParTop

Para gerar os arquivos de parâmetro topográfico (ParTop), os arquivos de Modelo Digital de Elevação e o Sub-bacias devem ser salvos em formato GeoTIFF. O script PARTOP.f90 trabalha em formato raster, sendo assim, será necessária a conversão dos arquivos GeoTIFF. Para isso, será necessário o software GRASS GIS (instalador nos arquivos extras ou download na página: <https://grass.osgeo.org/download/>). Para concluir a instalação, siga os passos abaixo clicando nos lugares marcados em vermelho:

- a. Dê duplo clique no ícone do instalador do GRASS GIS e pressione Next para começar a instalação (Figura C.1).



Figura C.1 - Janela inicial de instalação do software GRASS.

- b. A Figura C.2 representa a Licença do Software. Ao clicar em Next você concorda com os termos de uso. Clique em Next.

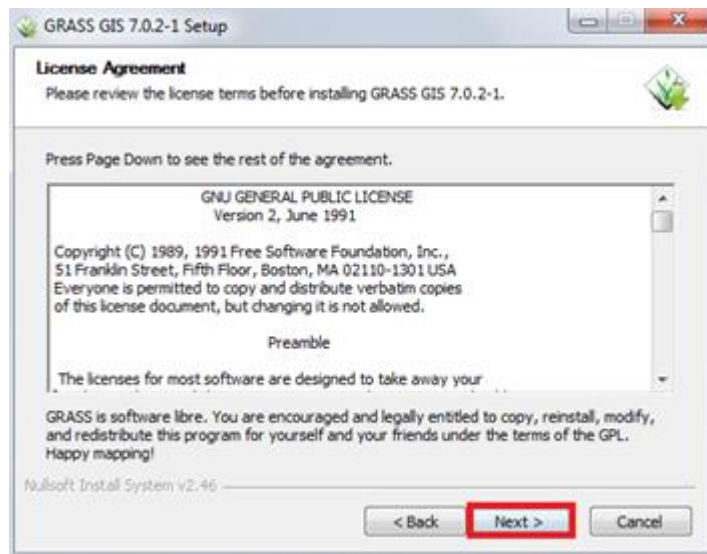


Figura 2 – Termo de acordo da Licença

- c. Selecione a pasta em que será instalado como mostrado na Figura C.3. A pasta padrão é no disco C:, como a maioria dos softwares. Pressione Next.

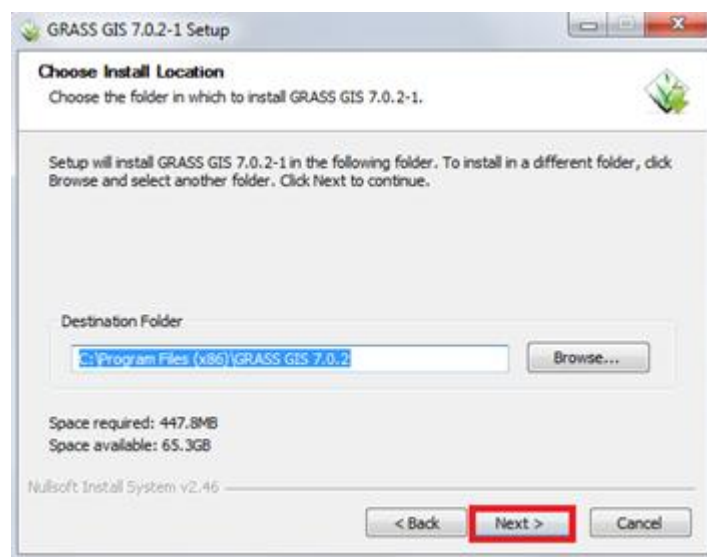


Figura C.3 - Escolha do local de instalação do GRASS GIS.

- d. A Figura C.4 exibe os componentes a ser instalados junto com o GRASS. Mantenha somente a opção Important Microsoft Runtime selecionada e pressione Next. Esse componente oferece bibliotecas de C++ para executar o GRASS com sucesso.

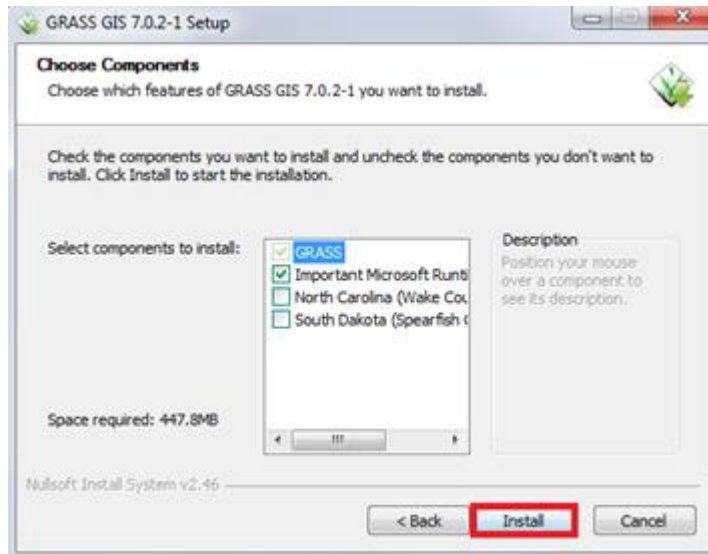


Figura C.4 - Escolha dos componentes de instalação do GRASS GIS.

- e. Uma janela de console irá aparecer (Figura C.5). Não feche, apenas espere que ela sumirá automaticamente.

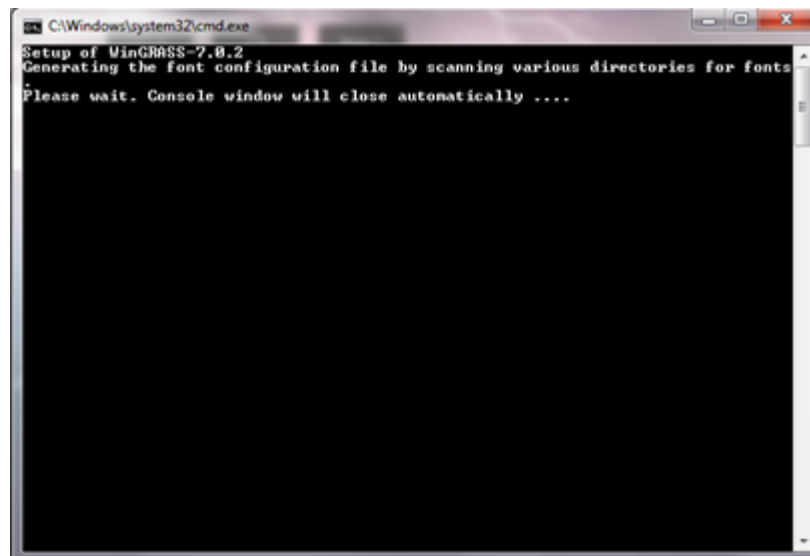


Figura C.5 - Janela de console de instalação.

- f. A janela da Figura C.6 surgirá no meio da instalação, se o computador possui conexão com a internet pressione OK para realizar o download e instalação do Microsoft Visual C++, se não possui, clique em cancelar para continuar a instalação do GRASS sem instalar o Microsoft Visual C++.

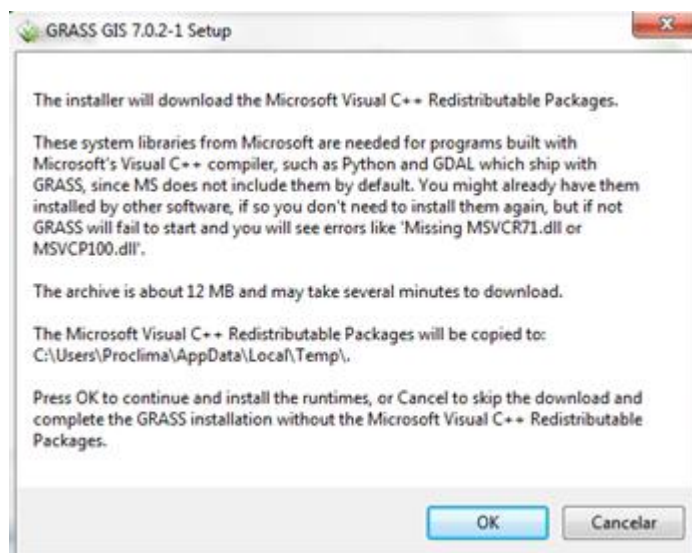


Figura C.6 - Aviso sobre instalação do Microsoft Visual C++.

- g. Assim que ver a mensagem de “*Completed*”, assim como na Figura C.7, clique em Next para concluir a instalação. Na próxima janela clique em “*Finish*” para fechar o instalador (Figura C.8).

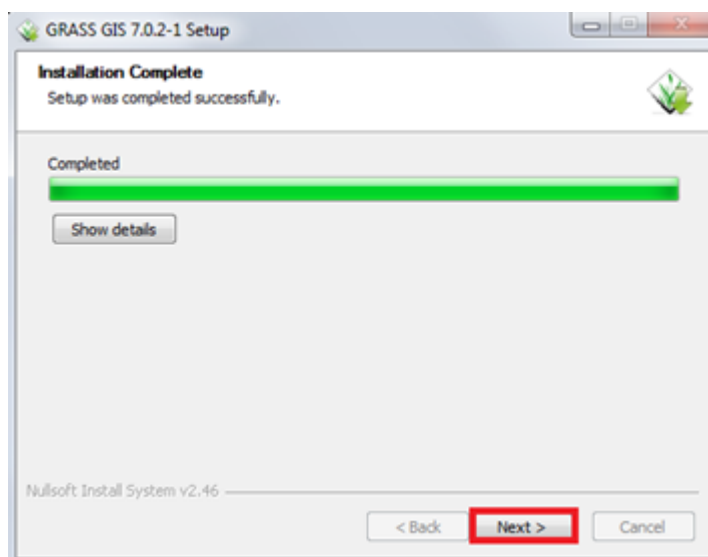


Figura C.7 - Instalação do software GRASS GIS completa.





Figura C.8 - Clique em Finish para concluir e fechar o instalador.

O procedimento abaixo deverá ser feito para o arquivo DEM e sub-bacias ambos em alta resolução. As instruções de onde clicar seguem marcadas em vermelho.

- a. A Figura C.9 representa a janela inicial do GRASS GIS. Se preferir, altere o caminho do diretório de trabalho do GRASS e mantenha os outros itens com os valores padrões. Clique em “*Start GRASS session*” marcado em vermelho na Figura C.9.



Figura C.9 - Janela inicial do software GRASS GIS.

- b. A área de trabalho do GRASS é representada por duas janelas, que abrirão automaticamente depois que iniciada a sessão. Para começar a conversão do arquivo GeoTIFF para Raster clique em Arquivo, no canto superior esquerdo. Selecione Importar dados raster e depois “*Common formats import [r.in.gdal]*” como mostra a Figura C.10.

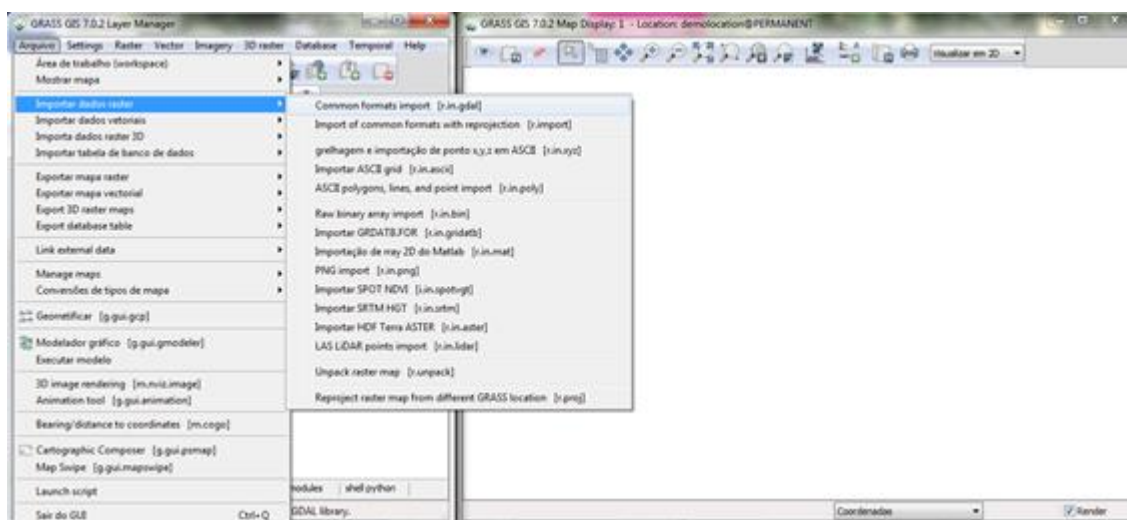


Figura C.10 – Importar dados GeoTIFF para área de trabalho do GRASS GIS.

- c. Uma janela com o título Importar dados raster abrirá, como mostrada na Figura C.11. Clique em Explorar e selecione o arquivo GeoTIFF desejado. Ele será mostrado na “*List of raster layers*”. Logo após clique em Importar. Uma imagem como a Figura C.12 deverá aparecer alguns minutos após o procedimento.

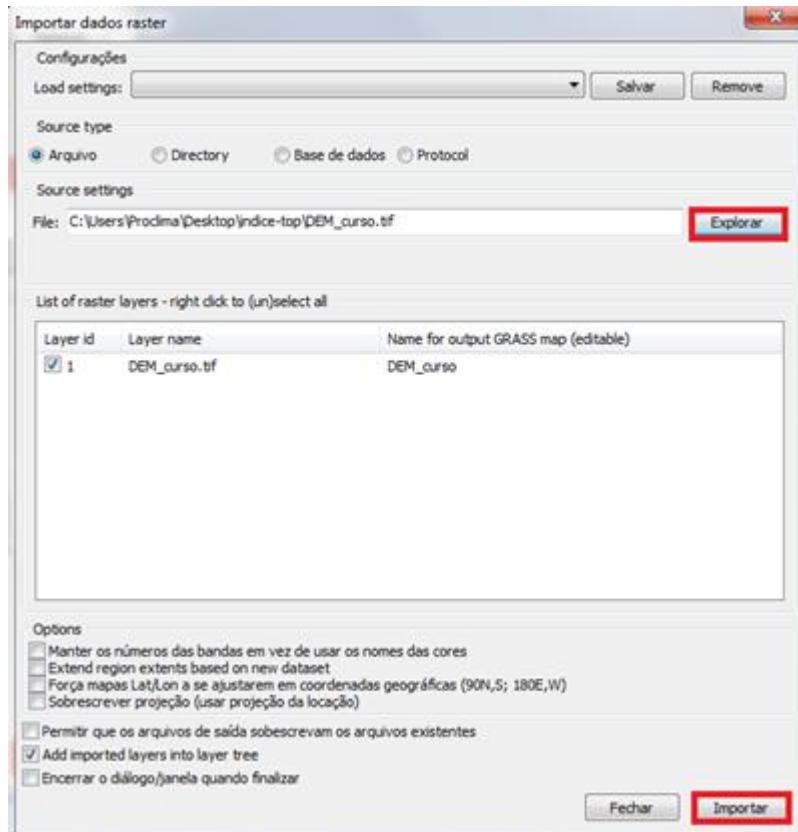


Figura C.11 - Dialogo para importar dados raster/GeoTIFF.

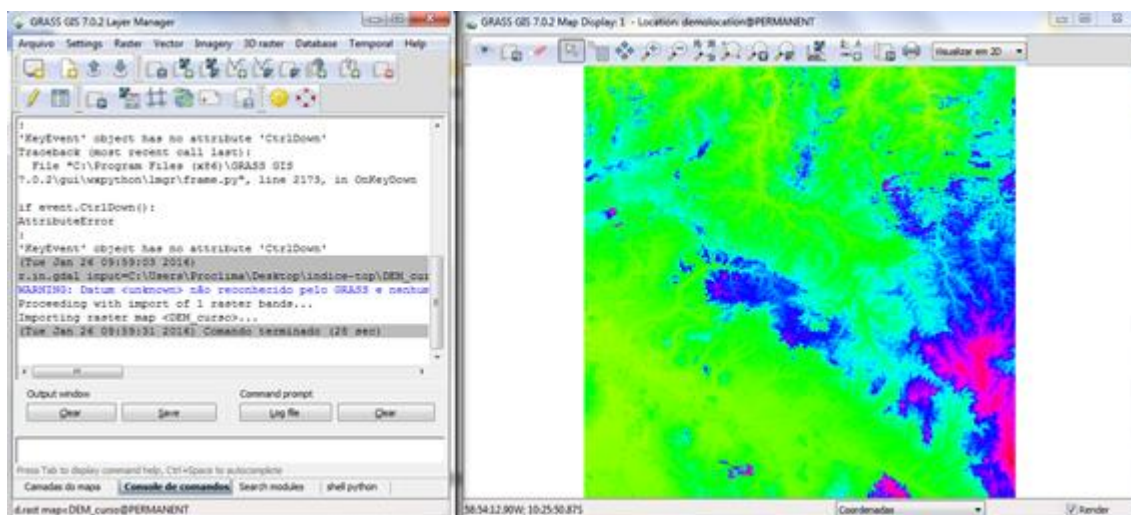


Figura C.12 - Área de trabalho do GRASS logo após importar o GeoTIFF, na janela a esquerda mostra as mensagens referentes a importação do dados, a direita é o dado em si sendo exibido.

- d. Com o GeoTIFF já na área de trabalho, o próximo passo é exportar um dado Raster. Clique em Arquivo novamente, Exportar mapa raster e

selecione Exportar array de binário raw [r.out.bin] como mostrado na Figura C.13. A próxima janela que se abrir, clique em Opcional e preencha os seguinte campos conforme a Figura C.14:

- Selecione Gera saída inteira;
- Selecione Saída do módulo verbosa;

Preencha com o nome do arquivo em Nome do mapa do binário de saída. O arquivo DEM deverá se chamar dem\_alta.rst e o arquivo de sub-bacias subbacias\_alta.rst. Os valores abaixo deverão ser para os dois:

- Valor para marcar dados nulos: ex.: -9999.;
- Número de bytes por célula: 4;
- Ordem de bytes de saída: native.

Clique em Executar para que o GRASS realize a conversão. Anote os dados de latitude e longitude, quantidade de linhas e colunas como na Figura C.15. Logo após clique em fechar.

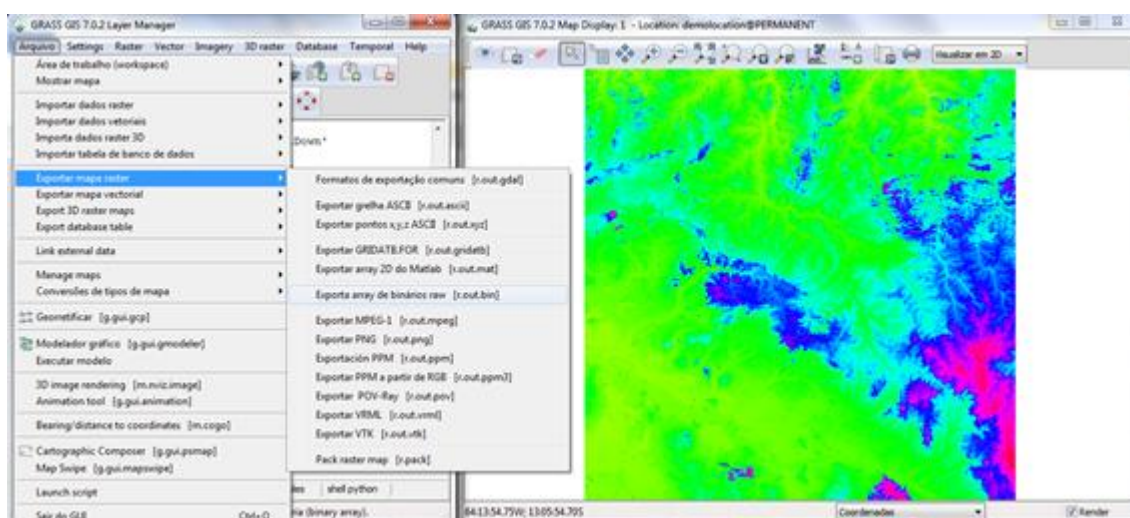


Figura C.13 - Exportar dados GeoTIFF para área de trabalho do GRASS GIS.

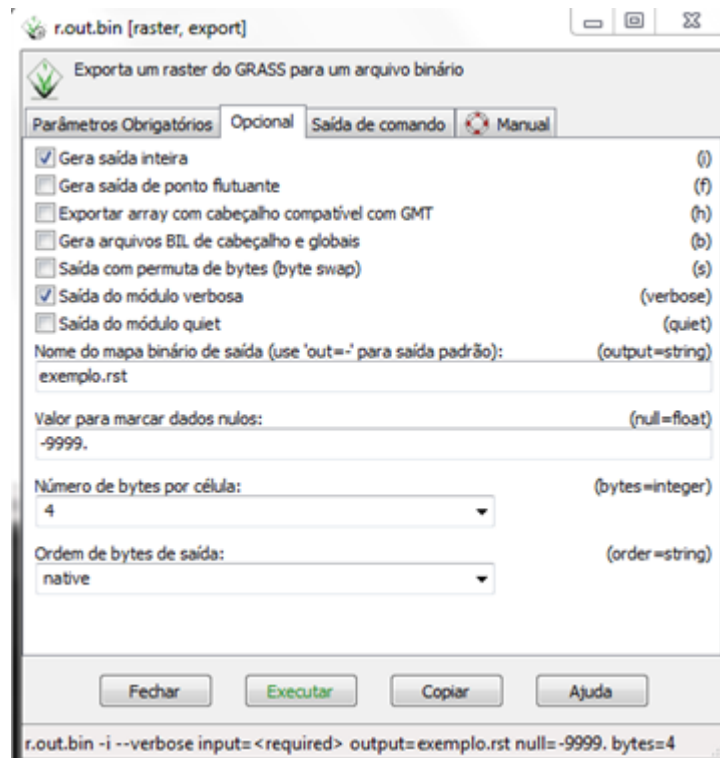


Figura C.14 - Janela de exportação de um arquivo Raster.

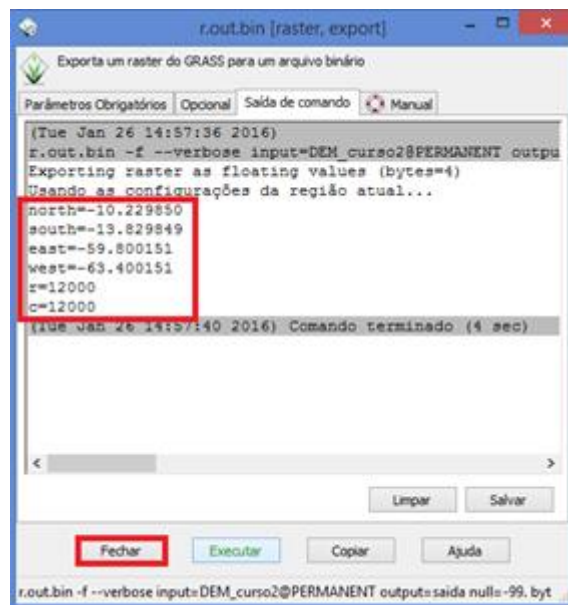


Figura C.15 - Mensagem de conclusão do comando de arquivo GeoTIFF gerado.

- e. O arquivo Raster gerado é salvo na raiz do Usuário. Se o usuário do computador é João, vá em C:\Usuários\João que o arquivo estará lá com o nome definido na Figura C.14.

f. Copie os arquivos com a extensão .rdc (dem\_alta.rdc e subbacias\_alta.rdc) da pasta de arquivos complementares. Abra-o com o bloco de notas e substitua os valores de columns, rows, min. X, max. X, min. Y e max Y pelos valores referentes a estes, dos quais você anotou:

- columns: **valor de c que anotou na saída da conversão**
- rows: **valor de r que anotou na saída da conversão**
- min. X: **valor de west que anotou na saída da conversão**
- max. X: **valor de east que anotou na saída da conversão**
- min. Y: **valor de south que anotou na saída da conversão**
- max. Y: **valor de north que anotou na saída da conversão**

Copie o CELL.HIG, os arquivos raster e o RDC (descritores) do DEM e sub bacias para a pasta DADOS dentro da pasta PARTOP. Sua pasta deverá estar exatamente como na Figura C.16, inclusive os arquivos com os mesmos nomes:

- cell.hig
- dem\_alta.rdc
- dem\_alta.rst
- subbacias\_alta.rdc
- subbacias\_alta.rst

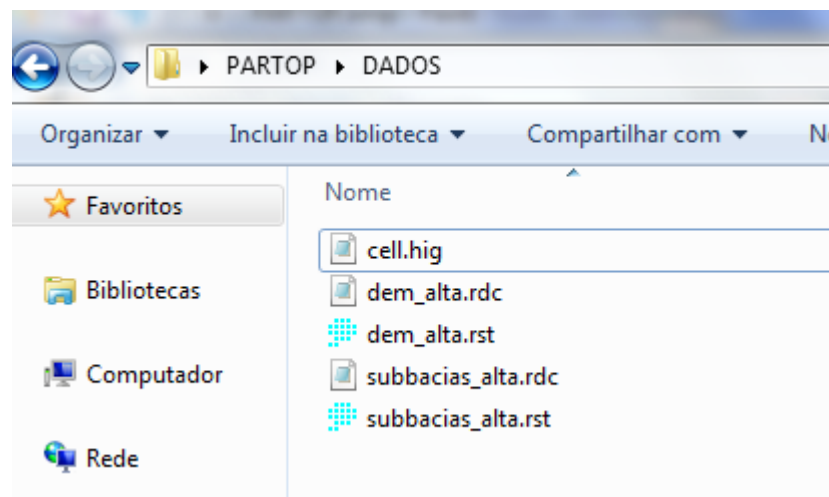


Figura C.16 - Estrutura da pasta DADOS, dentro da pasta PARTOP.

b. O projeto do ParTop foi elaborado para ser executado na IDE de desenvolvimento Plato, porém, é possível executá-lo em qualquer compilador GForTran ou Intel. O software Plato e o GForTran aqui utilizados, estão disponíveis gratuitamente



para download ([http://download.cnet.com/Silverfrost-FTN95/3000-2069\\_4-10491439.html](http://download.cnet.com/Silverfrost-FTN95/3000-2069_4-10491439.html), <https://gcc.gnu.org/wiki/GFortran>).

Vá para a pasta SCRIPT. Nesta pasta contém o projeto do PARTOP. Abra-o no Plato, a IDE de programação Fortran. O script, chamado MTDF\_AC.f90, possui um cabeçalho que deve ser alterado de acordo com as definições de sua bacia, como mostra a Figura C.17:

- DIR\_DADOS: diretório em que estão os dados da Figura C.16;
- NMAXCELL: número máximo de células do arquivo CELL.hig;
- RES2: resolução do modelo hidrológico;
- Undef: valores não definidos;
- CIT: Limiar mínimo de área acumulada para considerar rio (m<sup>2</sup>). Veja no arquivo CELL.hig a estação com a menor área de drenagem, com isso, exclui microbacias.

```
PROGRAM MTDF
!ALTERAR OS PARÂMETROS ABAIXO
CHARACTER(*), PARAMETER::DIR_DADOS='C:\Users\Proclima\' !DIRETÓRIO EM QUE SE ENCONTRA SEUS DADOS DE ENTRADA
INTEGER*4, PARAMETER::NMAXCELL=1085 !NUMERO MAXIMO DE CELULAS DO MODELO HIDROLOGICO, VEJA A QUANTIDADE DE CÉLULAS QUE POSSUE O CELL.HIG
REAL, PARAMETER::RES2=0.05 ! RESOLUCAO MODELO HIDROLOGICO, FAÇA A DIVISAO DA SUA RESOLUÇÃO POR 100. EX.: 5KM/100 = 0.05
REAL, PARAMETER::UNDEF=-9999. ! VALORES NÃO DEFINIDOS
! CIT = LIMIAR MÍNIMO DE ÁREA ACUMULADA CONSIDERA RIO (m²). Escolha a estação com a menor área de drenagem do CELL.HIG
REAL, PARAMETER::CIT=1.
```

Figura C.17 - Variáveis a ser alteradas no script que gera os parâmetros topográficos.

- a. Para executar o script, aperte o seguinte comando: Ctrl + F5. Irá aparecer uma mensagem como na Figura C.18, aperte Sim. Se não houver erros, um terminal irá aparecer. Espere pela mensagem de Construído com Sucesso, como na Figura C.19, e aperte Enter.

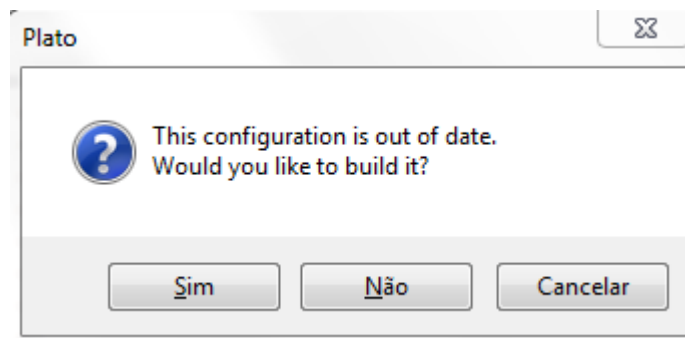


Figura C.18 - Mensagem de confirmação do Plato para construir o projeto. Aperte SIM.



```
C:\Program Files (x86)\Silverfrost\FTN95\Plato.exe
RES2: 5.00000007E-02
NSTEP: 166
XCORNER: -63.4000015
YCORNER: -10.2299986
NCOLS: 12000
NROWS: 12000
NSTEP: 166
NAC: 50
CIT: 1.00000000

LEU CELL.HIG
NCELL= 1041
LEU MNTFILL.RST
LEU SUBBACTAS.RST
CALCULANDO INDICE TOPOGRAFICO...
pause
CONSTRUIDO COM SUCESSO!
Press RETURN to close window...
```

Figura C.19 - Terminal de execução do parâmetro topográfico. Após ver a última mensagem, aperte Enter no terminal.

- d. O script irá gerar um arquivo chamado PARTOP.HIG. Copie esse arquivo para a pasta dados\_entrada do modelo MHD.



## ANEXO D - Cria Entradas

Os scripts em ForTran que preparam os dados meteorológicos observados de entrada para o MHD-INPE são o `cria_entradas_interp_prec_gfortran.f90`, para a precipitação, e o `cria_entradas_interp_met_gfortran.f90`, para os demais dados meteorológicos. Eles estão localizadas no diretório `cria_entradas` do material complementar.

Esses scripts utilizam as seguintes entradas:

- Arquivos binários com valores reais de precipitação e meteorológicos diários em pontos de grade (temperatura a 2 metros, ponto de orvalho, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação).
- Arquivo texto `CELL.HIG` que especifica a quantidade e a localização das células da bacia hidrográfica a ser modelada.

e geram as seguintes saídas:

- Arquivo binário com valores reais de precipitação (`prec.bin`) e meteorológicos (`met.bin`) com os respectivos valores somente nas latitudes e longitudes das células que estão no arquivo `CELL.HIG` dentro do intervalo de tempo especificado no script.
- Arquivo texto chamado `FALTANTES.txt` mostra os arquivos diários que o programa não conseguiu achar naquele diretório. Ideal que esteja vazio, neste caso mostrando que encontrou todos os arquivos diários, do contrário, veja as datas que constam no arquivo `FALTANTES` e revise seus dados de entrada. Alguns parâmetros dentro dos scripts devem ser alterados de acordo com as dimensões da bacia hidrográfica analisada. Em ambos os scripts, tanto o de precipitação quanto o dos demais dados meteorológicos, esses parâmetros são os mesmos e estão comentados no começo do script, como mostra a Figura D.1:
  - diretório de entrada (`dirin`);
  - diretório de saída (`dirout`);
  - diretório onde está o arquivo `CELL.HIG` (`dircell`);
  - número de células do arquivo `CELL.HIG` (`ncell`);
  - intervalo de anos (`ianoi` e `ianof`).

Os dados a seguir são encontrados no arquivo `template.ctl` dentro da pasta de dados de

entrada (dirin) (Figura D.2):

- número de linhas e colunas (xdef e ydef, respectivamente);
- latitude e longitude (ydef e xdef, respectivamente) ;
- resolução.

Um terminal abrirá e deverá aparecer a seguinte mensagem: “construído com sucesso”. Vá no diretório de saída (dirout) e verifique o arquivo faltantes.txt e veja se não faltou nenhum arquivo diário. Se não, copie o arquivo binário que foi gerado para o diretório MHD-INPE/dados\_entrada.

```

!-----
! este programa prepara o arquivo de entrada com dados de precipitacao
! para o MHD considerando ano bissexto
!-----
program cria_entradas_prec
implicit none
!ALTERAR O CAMINHO PARA A PASTA ONDE ESTÁ OS DADOS DIÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO - DIRIN
character,parameter :: dirin*100= '/data/FTP/daniel.andres/PRIVATE/anne/Ji-Parana/dados_interpolados/mat/1970-2015/'
!ALTERAR O CAMINHO PARA A PASTA ONDE SERÁ GERADO O DADO DE SAÍDA PREC.BIN - DIROUT
character,parameter :: dirout*100= '/data/FTP/daniel.andres/PRIVATE/anne/Ji-Parana/cria_entradas/saida/'
!ALTERAR O CAMINHO PARA A PASTA ONDE SE ENCONTRA O ARQUIVO CELL.HIG, GERADO PELO TERRAMIDRO - DIRCELL
character,parameter :: dircell*100= '/data/FTP/daniel.andres/PRIVATE/anne/Ji-Parana/MHD-free/dados_entrada/'
integer,parameter:: ncell = 1085 ! NÚMERO DE CÉLULAS DO CELL.HIG
integer,parameter:: ianoi = 1970, ianof = 1974 ! DEFINIR INTERVALO DE ANOS QUE DESEJA CRIAR O ARQUIVO DE ENTRADA
! OS DADOS A PARTIR DAQUI VOCÊ OS ENCONTRA NO DIRIN NO ARQUIVO TEMPLATE.CTL
integer,parameter:: ncol = 90, nlin = 90 ! DEFINIR NÚMERO DE LINHAS E COLUNAS DOS ARQUIVOS INTERPOLADOS
real,parameter:: xccorner = -64., ycorner = -14. ! DEFINIR A LONGITUDE MAIS A OESTE E A LATITUDE MAIS A SUL
real,parameter :: res = 0.05 ! DEFINIR RESOLUÇÃO DOS DADOS INTERPOLADOS

```

Figura D.1 - Parâmetros a ser alterados estão comentados.

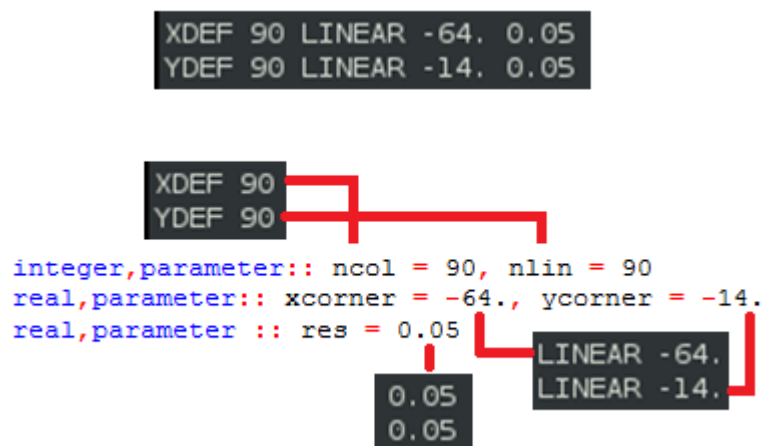


Figura D.2 – Parâmetros que devem ser colocados no script para criar entradas



## **ANEXO E - Cria entradas previsão**

Os scripts em fortran que preparam as entradas de previsão para o MHD-INPE são o `cria_entradas_interp_preprev_gfortran.f90`, para a precipitação, e o `cria_entradas_interp_metprev_gfortran.f90`, para os demais dados meteorológicos. Eles estão localizados no diretório `cria_entradas` do material complementar.

Esses scripts utilizam as seguintes entradas:

- Arquivos binários com valores reais de previsão de precipitação e meteorológicos (temperatura a 2 metros, ponto de orvalho, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação) diários em pontos de grade;
- Arquivo texto `CELL.HIG` que especifica a quantidade e a localização das células da bacia hidrográfica a ser modelada;
- Arquivo texto `datas_previsao.txt` que informa o intervalo de datas de previsão.

e geram as seguintes saídas:

- Arquivos binários para cada dia de previsão com valores reais de precipitação prevista (`preprev_<data>.bin`) e meteorológicos previstos (`metprev_<data>.bin`) com os respectivos valores somente nas latitudes e longitudes das células que estão no arquivo `CELL.HIG`.
- Arquivo texto chamado `FALTANTES.txt` com os arquivos diários que o programa não conseguiu achar naquele diretório. Ideal que esteja vazio, neste caso mostrando que encontrou todos os arquivos diários.

O procedimento de alteração dos parâmetros dentro do código segue os mesmos passos descritos em `cria_entradas` (ANEXO D). A única diferença é que não é mais necessário definir um intervalo de anos. Em seu lugar é definido um intervalo de datas da previsão através do arquivo de entrada `datas_previsao.txt`.

Após rodado o código, será gerado no diretório `saida` (`dirout`) um arquivo `preprev_<data>.bin` e um arquivo `metprev_<data>.bin` para cada dia de previsão. Verifique em `faltantes.txt` se algum dado não foi encontrado. Se não tiver nenhum registro em `faltantes.txt`, os binários podem ser copiados para o diretório `MHD-INPE/dados_previsao` em um outro diretório nomeado com a data do primeiro dia de previsão.

## ANEXO F - Unidades de Resposta Hidrológicas

As unidades de respostas hidrológicas aqui apresentadas, tratam de uma combinação de três informações: vegetação, tipo de solo, e porcentagem de pastagem (Esta última é utilizada como uma variável de uso do solo). Para cada combinação de solo com vegetação é calculada a fração do uso do solo para determinada célula.

Na pasta SCRIPT é encontrado o projeto do UniRespHidro. Abra-o no Plato, a IDE de programação Fortran. O script, chamado Recorta.f90, possui um cabeçalho que deve ser alterado de acordo com os arquivos de solo, vegetação e porventura outro arquivo utilizado dependendo da metodologia utilizada no trabalho, como mostra a Figura F.1:

```
programa para recortar mapa de solos de 1 km
PARAMETER (NCOLSS=5665,NROWSS=8337,NPTS=NCOLSS*NROWSS,RESS=0.008333) ! MAPA DE SOLOS
PARAMETER (XCORNERS=-81.9980316,YCORNERS=13.4968910) ! ARQUIVO IDRISI
PARAMETER (NCOLSV=7200,NROWSV=9000,NPTV=NCOLSV*NROWSV,RESV=0.008333) ! MAPA DE VEGETACAO PROVEG
PARAMETER (XCORNERV=-89.15898363,YCORNERV=-59.99583453) ! ARQUIVO GRADS
PARAMETER (NCOLSU=289,NROWSU=251,NPTU=NCOLSU*NROWSU,RESU=0.09988) !MAPA DE USO DA TERRA
PARAMETER (XCORNERU=-74.34956,YCORNERU=-19.56289,NYEAR=21) !ARQUIVO GRADS
```

**Figura F.1** - Parametros a serem alterados

Após alterar os dados de dimensões(isto é número de linhas, colunas e resolução de cada arquivo), é necessário alterar os caminhos de entrada, isto é, onde estão os arquivos de solo e vegetação que será recortado, e o caminho de saída onde os recorte serão armazenados. A última alteração que é necessário realizar é informar as coordenadas da região que se deseja trabalhar (figura F 2)

```
DIRIN='C:\Users\Gustavo\Ji-Parana\scripts\blocos\porc_pastagem_gfortran\1-Recorta\dados_entrada\'
DIROUT='C:\Users\Gustavo\Ji-Parana\scripts\blocos\porc_pastagem_gfortran\1-Recorta\dados_saida\'

DEFINE AREA DE TRABALHO (BOX DA BACIA)
BACIA='Paraiba'
X1=-64
X2=-59.5
Y1=-9.5
Y2=-14

ARQUIVO DE COLUNAS E LINHAS DO RECORTE
OPEN(3,FILE=TRIM(DIROUT)//'MATRICES.DAT',STATUS='UNKNOWN')
WRITE(3, '(A30)') 'LINHAS COLUNAS'
```

**Figura F.2** - Alterações necessárias para processar as entradas do script.

Após realizar os recortes abra o script “Cria\_Blocos”, este script é responsável pelo cruzamento das informações contidas nos recortes realizado na etapa anterior. É necessário realizar as seguintes alterações no cabeçalho do script:

- BACIA: O nome da bacia em que está trabalhando.
- XCORNER: latitude inicial da região.
- YCORNER: longitude inicial da região.
- NCOLSS, NROWSS: número de linhas e colunas respectivamente do arquivo de solo recortado.
- RESS: Resolução do arquivo de solo recortado
- NCOLSV, NROWSV: número de linhas e colunas respectivamente do arquivo de vegetação recortado.
- RESV: Resolução do arquivo de vegetação recortado
- NCOLSU, NROWSU: número de linhas e colunas respectivamente de um terceiro arquivo utilizado dependendo da metodologia utilizada.
- RESV: Resolução do terceiro arquivo recortado
- NCOLSM, NROWSM: número de linhas e colunas respectivamente do modelo hidrológico.
- RESV: Resolução do modelo MHD-INPE.

```

IMPLICIT NONE
CHARACTER*(*) BACIA
INTEGER NCOLSS,NROWSS,NCOLSV,NROWSV,NCOLSU,NROWSU,NCOLSM,NROWSM
INTEGER NVALS,NVALV,NVALU,NVALM
REAL RESS,RESV,RESU,RESM,XCORNER,YCORNER
PARAMETER (BACIA='Paraiba')
PARAMETER (XCORNER=-64.0,YCORNER=-14.0)
DIMENSÕES DOS MAPAS:
MAPA DE SOLO
PARAMETER (NCOLSS=540,NROWSS=540,NVALS=NCOLSS*NROWSS,RESS=0.008334)
MAPA DE VEGETAÇÃO
PARAMETER (NCOLSV=540,NROWSV=540,NVALV=NCOLSV*NROWSV,RESV=0.008334)
MAPA DE USOS DA TERRA
PARAMETER (NCOLSU=46,NROWSU=46,NVALU=NCOLSU*NROWSU,RESU=0.0999996)
MAPA MODELO HIDROLOGICO
PARAMETER (NCOLSM=90,NROWSM=90,NVALM=NCOLSM*NROWSM,RESM=0.05)

```

**Figura F.3 - Cabeçalho do script “Cria\_Blocos”**

Após a combinação dos arquivos, abra o script PreparaURHig.f90, este script tem como entrada os arquivos binários gerado pela rotina Cria\_Blocos e o arquivo de células CELL.HIG criado pelo TerraHidro, e cria os arquivos, URH.HIG e Blocos.Hig. As alterações necessárias devem ser feitas no cabeçalho e são as seguintes:

- XCORNER: latitude inicial da região.
- YCORNER: longitude inicial da região.
- NCOLSM, NROWSM: número de linhas e colunas respectivamente do modelo hidrologico.
- RESV: Resolução do modelo MHD-INPE.
- DIRIN: diretório de entrada dos arquivos.
- DIROUT: diretório de saída dos arquivos.

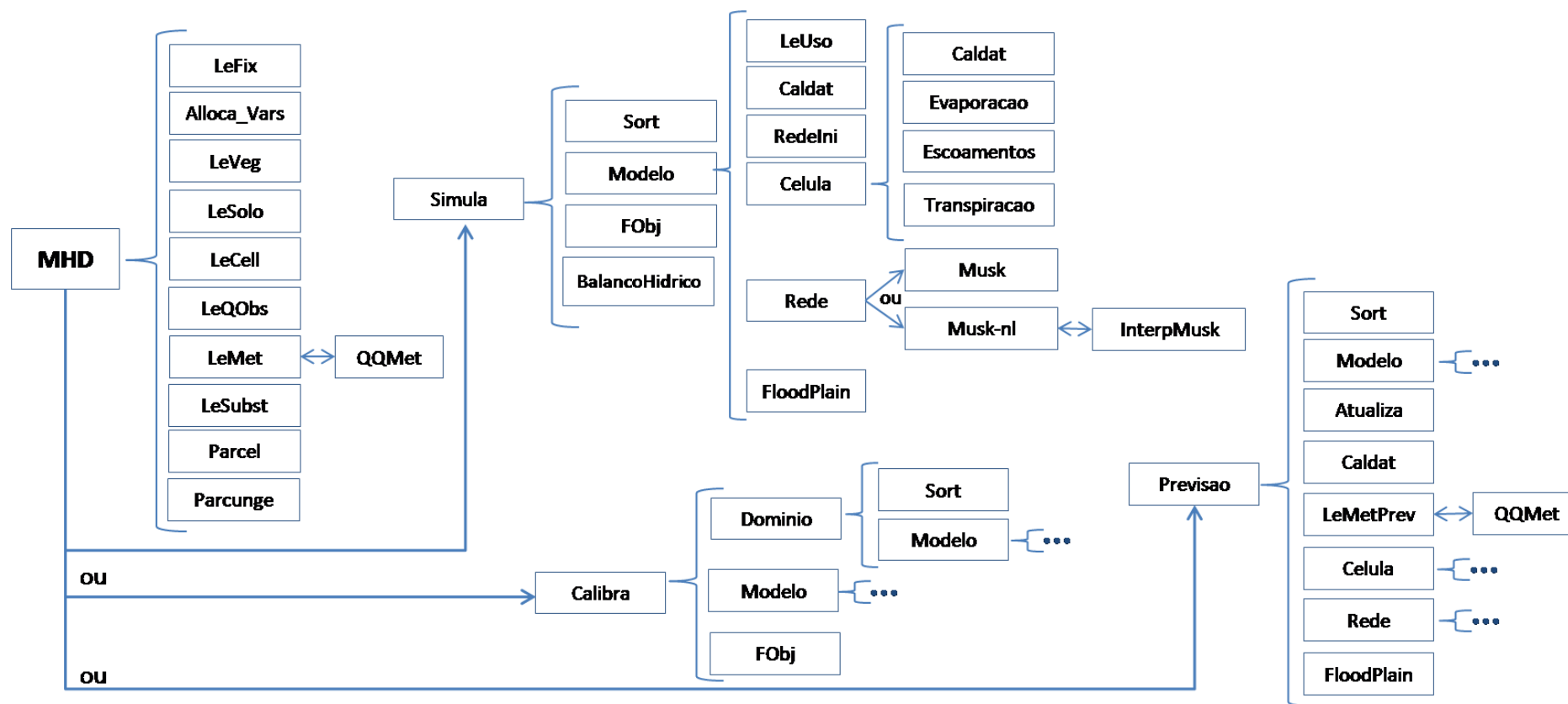
```
REAL, PARAMETER:: XCORNER=-64, YCORNER=-14 ! JiParana
PARAMETER (NCOLS=90,NROWS=90,NVAL=NCOLS*NROWS,RES=0.05)
PARAMETER (NCLASSES=157,NYEAR=21)
REAL XMOD(10000),YMOD(10000),USOM(NCLASSES)
REAL USO(NVAL,NCLASSES,NYEAR)
INTEGER ICELL(10000),POS(10000),IBAC(10000),SOLO(NCLASSES),VEG(NCLASSES),YEAR,GRUPO(NCLASSES)
CHARACTER ANO*4, DIRIN*100, DIROUT*100,form30*100
YEAR=1970

DIRIN='C:\Users\Gustavo\Ji-Parana\scripts\blocos\porc_pastagem_gfortran\2-CriaBlocos\dados_saida\'
DIROUT='C:\Users\Gustavo\Ji-Parana\scripts\blocos\porc_pastagem_gfortran\3-PreparaUsoHig\dados_saida\'
```

Figura F.4 - Alterações necessárias para a execução do script PreparaURHig.f90

Por fim copie e cole os arquivos gerados para o diretório de entrada do modelo.

## ANEXO G - FLUXOGRAMA





- MHD.f90: programa principal
- Vars\_main.f90: módulo de declaração de variáveis do programa principal;
- Vars\_calibra.f90: módulo de declaração de variáveis utilizadas na calibração;
- LeFix.f90: leitura dos parametros gerais fixos (ParFix.hig), como o número de células, o número de usos do solo, o número de intervalos de tempo e de postos pluviométricos, etc.;
- Alloca\_Vars.f90: alocação de memória das variáveis principais;
- LeVeg.f90: leitura dos dados de vegetação (ParVeg.hig);
- LeSolo.f90: leitura dos parâmetros de tipo de solo (ParSolo.hig);
- LeCell.f90: leitura dos dados relacionados as células e parâmetros topográficos, também analisa as planícies de alagamento caso existam (cell.hig, ParTop.hig e FloodPlain.hig);
- LeQObs.f90: leitura dos dados observados de vazão (QObs.prn)
- LeMet.f90: leitura dos dados meteorológicos (prec.bin e met.bin);
- QQMet.f90: verificação da qualidade dos dados meteorológicos e transformação da unidade de pressão;
- LeSubst.f90: leitura dos dados de vazão que substituem a vazão calculada;
- Parcel.f90: cálculo de alguns parâmetros da célula e do rio;
- Parcunge.f90: cálculo do valor ideal do intervalo de tempo de propagação e do número de subtrechos em que será dividida a propagação;
- Simula.f90: controle da simulação;
- Sort.f90: ordena as células segundo a área de drenagem;
- Modelo.f90: comando do loop do tempo do modelo hidrológico;
- FObj.f90: análise da qualidade do ajuste entre os hidrogramas diários calculados e observados com base em algumas funções objetivo;
- LeUso.f90: leitura dos dados de uso do solo (Uso\_<ano>.hig);
- Caldat.f90: conversão de dia juliano para dia/mes/ano;
- Julday: função que determina o dia do calendario juliano correspondente ao dia, mes e ano dados;
- RedeIni.f90: inicialização da rede de drenagem no primeiro passo de tempo quando nao existem condicoes iniciais;
- Celula.f90: comando do loop das células;
- Rede.f90: propagação na rede de drenagem;
- FloodPlain.f90: propagação na planície;

- Evaporacao.f90: cálculo da evaporação do dossel de acordo com Van Dijk, 2001 (Modelo de Gash);
- Escoamentos.f90: cálculo dos escoamentos superficial e subsuperficial;
- Transpiracao.f90: cálculo da transpiracao segundo o modelo de Jarvis (A SimpleEmpiricalModelof Root WaterUptake, 1989);
- Musk.f90: cálculo MuskingumCunge;
- Musk-nl.f90: cálculo MuskingumCunge não-linear;
- InterpMusk.f90: interpolação rápida da largura da secao e a celeridade para MuskingunCungenao linear;
- Calibra.f90: aplicação da metodologia ShuffledComplexEvolutionMethod for Global Optimization (SCE-UA version 2.1) desenvolvida por Duan et al. (1992) para a calibração dos parâmetros;
- Dominio.f90: seleção do domínio da sub-bacia a ser calibrada para diminuir o tempo de calibracao;
- Previsao.f90: controle da previsão;
- Atualiza.f90: atualização de algumas variáveis no instante em que inicia o ciclo de previsão;
- LeMetPrev.f90: leitura dos dados meteorológicos previstos (preprev\_<data>.bin e metprev\_<data>.bin).
- BalancoHidrico.f90: calcula o balanço hídrico entre:  $P - ETT - QSIM$ ; onde  $P$  é a precipitação anual[mm],  $ETT$  é a evapotranspiração total anual [mm]; e  $QSIM$  é a vazão anual[mm].