

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
RAFAEL DO CARMO POMPERMAYER

**MODELAGEM HIDROLÓGICA**  
**TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADAS AO MODELO SCS –**  
**SOILCONSERVATION SERVICE – CURVE NUMBER**

BELO HORIZONTE  
2013

RAFAEL DO CARMO POMPERMAYER

**MODELAGEM HIDROLÓGICA**  
**TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADAS AO MODELO SCS –**  
**SOILCONSERVATION SERVICE – CURVE NUMBER**

Defesa de Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Maria Márcia Magela Machado

BELO HORIZONTE  
2013

P788m  
2013

Pompermayer, Rafael do Carmo.

Modelagem hidrológica [manuscrito] : técnicas de geoprocessamento aplicadas ao modelo SCS – SoilConservation Service – Curve Number / Rafael do Carmo Pompermayer. – 2013.

77 f., enc. : il. color.

Orientadora: Maria Márcia Magela Machado.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2013.

Bibliografia: f. 74-77.

1. Modelagem de dados – Teses. 2. Geoprocessamento – Técnica – Teses. 3. Hidrologia – Modelos – Teses. I. Machado, Maria Márcia Magela. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6



## FOLHA DE APROVAÇÃO

### **MODELAGEM HIDROLÓGICA - TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO APLICADAS AO MODELO SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE - CURVE NUMBER**


### **RAFAEL DO CARMO POMPERMAYER**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 21 de junho de 2013, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof(a). Maria Marcia Magela Machado - Orientador  
UFMG

  
Prof(a). Úrsula Ruchkys de Azevedo  
UFMG

  
Prof(a). Leonardo Mitre Alvim de Castro  
Anglo American - AA Brasil

Belo Horizonte, 21 de junho de 2013.

*Dedico este trabalho à  
minha querida avó Cristina  
Marchesi Pompermayer, que  
antes de ir me deixou a  
lembrança de, do seu jeito, dizer,  
“vai dar tudo certo!”. Obrigado  
por este e tantos outros  
momentos de carinho!*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer à minha orientadora Maria Márcia Magela Machado pelo empenho, paciência e dedicação durante a realização desta pesquisa. Sua postura profissional sempre me estimulou e me fez acreditar em mim, o que foi essencial para a conclusão deste trabalho. Agradeço a todos os meus professores e profissionais, desde a graduação, pois todos fazem parte da construção deste trabalho.

À minha família, além de pedir desculpas pela ausência, stress e momentos de isolamento, agradeço por acreditarem em mim e sempre me apoiarem, este trabalho também é por vocês. Aos meus amigos, peço desculpas pela ausência e também agradeço pelo apoio em todos os momentos.

Agradeço aos meus queridos colegas do IGC, Laís Ferreira Jales, Rachel Rodrigues de Campos, Thiago Carvalho de Lima, Denise Maria Lopes Formoso, Mônica Martins de Godoy Fonseca, Lauro Magalhães Fráguas, e tantos outros que compartilharam de momentos de discussão, reflexão e aflição sobre os trabalhos realizados, gostaria de tê-los aproveitado mais, espero ainda ter esta oportunidade.

Aos amigos da Geonature que possibilitaram a realização deste trabalho, o meu muito obrigado e minhas desculpas pelos momentos de ausência, correria e distrações.

À minha namorada Priscila que sempre me apoiou, tendo grande responsabilidade pelo ingresso neste mestrado, muito obrigado pela dedicação, cobrança e também por nunca duvidar que daria certo.

Aos engenheiros Marcos Augusto Jabôr pela disposição em me auxiliar e fornecer os dados necessários e Benjamin Amaral de Carvalho pela paciência em ensinar e ter plantado a semente deste trabalho.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior), pela bolsa concedida durante 24 meses.

## RESUMO

A hidrologia tem a bacia hidrográfica como sua principal unidade de estudo, que por sua vez tem a dinâmica influenciada por diversos elementos. O esforço da ciência em colocar estes elementos em interação originou os modelos hidrológicos. Estes modelos visam simular partes do ciclo hidrológico, para, dentre outros objetivos, dimensionar estruturas de drenagem. O presente estudo destaca o modelo desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*, conhecido como *Curve Number*, que considera parâmetros físicos da bacia hidrográfica para estimar a vazão máxima durante determinado evento pluviométrico. Neste sentido, foram aplicadas técnicas de geoprocessamento na obtenção destes parâmetros, visando comparar os resultados finais com os obtidos por meio de estudo hidrológico realizado sem a aplicação de tais técnicas. As características físicas que alimentaram o modelo foram obtidas através de modelo digital de elevação hidrológicamente consistente gerado a partir dos dados cartográficos disponíveis. Posteriormente, por meio de algoritmos computacionais específicos, foi gerado o mapa de direção do fluxo d'água no relevo e, a partir deste, a definição da área contribuinte da bacia hidrográfica. A extensão do talvegue foi interpretada com base nos dados das cartas topográficas na escala de 1:50.000 da região, sendo, a partir daí, realizados os cálculos de declividade efetiva. Técnicas de sensoriamento remoto foram realizadas para obter a classificação de imagens do satélite Landsat 7, tendo como referência as tipologias pré-definidas pelo *SCS-CN*. Esta classificação foi cruzada com o mapa de solos da região, obtendo o valor do parâmetro *Curve Number*. A precipitação foi calculada de acordo com a equação de chuvas intensas para o posto pluviográfico representativo da região. A partir daí, a modelagem foi realizada, visando comparar a utilização das técnicas de geoprocessamento com os métodos convencionais aplicados. Os resultados demonstraram que as técnicas aplicadas retornaram valores mais próximos da realidade no que diz respeito aos parâmetros, área da bacia e comprimento do talvegue. A declividade efetiva calculada de forma distribuída demonstrou um valor menor do que o utilizado no método convencional, o que influenciou bastante no cálculo dos tempos de concentração e pico. O valor do parâmetro CN demonstrou-se numericamente próximo, porém, este parâmetro é muito sensível no modelo, contribuindo para a discrepância na comparação

dos resultados finais. Por fim, conclui-se que o aumento na precisão dos parâmetros não ocasionou aumento de precisão do modelo, porém, diante dos ajustes realizados na aplicação do método convencional, isto não representou a inaplicabilidade destas técnicas, sendo diagnosticado que o modelo necessita de adaptações.

Palavras chave: Hidrologia. Modelos Hidrológicos. Técnicas de Geoprocessamento.

## ABSTRACT

For hydrology, the watershed is the primary unit of study, which dynamics is influenced by various elements. The effort of science to place these elements in interaction originated hydrological models. These models aim to simulate parts of the hydrologic cycle, for, between other objectives, dimension drainage structures. This study highlights the model developed by the Soil Conservation Service, known as Curve Number, which considers the physical parameters of the watershed to estimate the maximum runoff for a given rainfall event. In this regard, GIS techniques were applied in obtaining these parameters in order to compare the final results with those obtained by hydrological studies conducted without the application of such techniques. The physical characteristics that compose the model were obtained from a digital elevation model hydrologically consistent generated from cartographic data available. Subsequently, by specific computational algorithms, was generated a map of the direction of water flow and, from this, the definition of the contributing area of watershed. The length of river was interpreted based on the topographical data at a 1:50,000 scale, and, thereafter, effectively slope calculations was performed. Remote sensing techniques were performed to obtain the classification of Landsat 7 satellite images, with reference to the soil uses predefined by SCS-CN. This classification was crossed with the soil map of the region, obtaining the value of the parameter Curve Number. Precipitation was calculated according to the rainfall equation for the representative pluviometric post of the region. Thereafter, the modeling was performed to compare the use of GIS techniques with conventional methods applied. The results showed that the techniques applied returned values closer to the true about the parameters, area and length of river. The effective slope calculated in a distributed manner showed a lower value than that used in the conventional method, which greatly influenced in the calculation of time of concentration and peak. The parameter CN has been shown numerically close, however, this parameter is very sensitive to the model, contributing to the discrepancy in the comparison of the final results. Finally, it is concluded that the increase in accuracy of the parameters did not result in increased accuracy of the model, however, in front of the adjustments applied to the conventional method, it does not represent the

inapplicability of these techniques. Was diagnosed that the model needs to be adapted.

Keywords: Hydrology, Hydrological Modeling, Geoprocessing Techniques.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Discretização de bacias hidrográficas .....	14
Figura 2 - Perpectiva Hortoniana do escoamento superficial .....	16
Figura 3 – Dados físicos gerados pelo geoprocessamento e sensoriamento remoto .....	28
Figura 4 – Distribuição de pontos de grade regular (a esquerda) e pontos amostrais irregulares (a direita).....	33
Figura 5 - Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay .....	34
Figura 6 – Aplicação do algoritmo para definição da direção de escoamento .	37
Figura 7 – Assinaturas espectrais de vários tipos de objetos na superfície terrestre.....	38
Figura 8 – Porcentagens de transmitância da radiação solar na camada atmosférica nas várias faixas de comprimento da onda de energia eletromagnética.....	39
Figura 9 – Mapa de localização da bacia do rio Jacaré .....	44
Figura 10 – Mapa de Biomas (IBGE, 2012).....	45
Figura 11–Mapa de solos da área de estudo .....	46
Figura 12 – Cartas topográficas utilizadas para a geração do MDE .....	52
Figura 13 – Funcionamento do comando <i>Fill</i> do software ArcGIS 9.3 .....	54
Figura 14 – Correção do erro de preenchimento de atributos na base utilizada para a geração do MDEHC ( a) modelo corrigido; b) modelo gerado com erro de vetorização).....	54
Figura 15 – Modelo Digital de Elevação em formato TIN .....	55
Figura 16 – MDE em formato raster .....	56
Figura 17 – <i>Raster</i> de direção do fluxo e limite da bacia hidrográfica.....	58
Figura 18 – Fluxo acumulado gerado pelo algoritmo em região de planície de inundação.....	59
Figura 19 – Cálculo através do operador <i>Raster Calculator</i> ( <i>talveg_cor</i> = ao <i>raster</i> do talvegue; <i>mdt_sink_def</i> = modelo digital de elevação hidrológicamente consistente).....	60
Figura 20 – Imagem segmentada ( <i>sim</i> =20 e <i>A</i> = 100) .....	62
Figura 21 – Mapeamento de uso e cobertura do solo .....	64

Figura 22 – Mapeamento do complexo solo/vegetação - CN..... 66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de modelos comumente utilizados na hidrologia .....	12
Tabela 2 – Valores de CN para áreas agrícolas.....	22
Tabela 3 - Valores de CN para diferentes tipos de ocupação urbana.....	23
Tabela 4 – Correção dos valores de CN de acordo com as AMC .....	24
Tabela 5 – Valores de referência para o método CN Jabôr (2013) .....	25
Tabela 6 – Tabela de comparação entre os tipos de modelos digitais de elevação .....	36
Tabela 7 – Tabela de cálculo do modelo <i>SCS</i> de acordo com o estudo hidrológico da Ponto sobre o Rio Jacaré.....	49
Tabela 8 – Grupo hidrológico compatibilizado com a tabela do modelo <i>SCS-CN</i> dos solos encontrados na região de estudo.....	61
Tabela 9 – Tipologias mapeadas para a classificação das imagens e suas respectivas correspondências para o parâmetro CN .....	63
Tabela 10 – Resultados obtidos para a Bacia do rio Jacaré .....	68

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Relação entre as perdas iniciais e escoamento superficial .....	18
Equação 2 – Escoamento superficial segundo SCS (1972).....	18
Equação 3 – Capacidade de retenção do solo considerando a medida em polegadas.....	20
Equação 4 - Capacidade de retenção do solo considerando a medida em milímetros.....	20
Equação 5 – Cálculo do CN pelo método Jabôr (2013) .....	25
Equação 6 – Cálculo de intensidade de chuvas.....	25
Equação 7 – Tempo de pico (Jabôr, 2013) .....	26
Equação 8 – Tempo de concentração de Kirpich.....	26
Equação 9 – Cálculo da declividade efetiva.....	27
Equação 10 – Cálculo da vazão máxima .....	27
Equação 11 – Cálculo do método D8.....	36
Equação 12 – Equação da continuidade para movimento uniforme em canais	47
Equação 13 – Média ponderada do parâmetro CN.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGWA	<i>Automated Geospatial Watershed Assessment</i>
AMC	<i>Antecedent Moisture Condition</i>
CN	<i>Curve Number</i>
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
D8	<i>Determinisc 8</i>
DER	Departamento de Estradas de Rodagens
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDEHC	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente
MDT	Modelo Digital de Terreno
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuffle Radar Topographic Mission</i>
TIN	<i>Triangulated Irregular Network</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa

## LISTA DE SÍMBOLOS

“a”, “b” e “c”	Parâmetros empíricos da estação pluviográfica
$\Delta D$	Descida mais íngreme
$\Delta h$	Diferença altimétrica
A	Área da bacia
$A_n$	Área de cada fragmento mapeado
$CN_n$	Valor CN correspondente a cada fragmento mapeado
D	Distância
Fa	Perdas contínuas de precipitação(mm);
I	Declividade efetiva do talvegue
la	Perdas iniciais(mm),
If	Declividade do fundo ( m/m ).
In	Intensidade da chuva
K	Constante empírica relacionado ao local analisado
L	Extensão do talvegue principal
N	Coeficiente de rugosidade de Manning;
P	Precipitação (mm);
Pe	Precipitação efetiva (mm);
Pm	Perímetro molhado
Q	Escoamento superficial
Qp	Vazão máxima
R	Raio hidráulico ( m )
S	Capacidade máxima de retenção (mm);
Tc	Tempo de concentração
Tr	Tempo de recorrência
V	Velocidade de escoamento ( m/s );

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	Objetivos .....	5
2.1	Objetivo Geral .....	5
2.2	Objetivos específicos.....	5
3	Referencial teórico .....	6
3.1	Modelos hidrológicos.....	6
3.2	Classificação dos modelos hidrológicos .....	9
3.3	Modelos tipo precipitação-vazão .....	13
3.4	Modelo Soil Conservation Service – SCS-Curve Number .....	16
3.4.1	Componentes do modelo .....	17
3.4.2	Propagação superficial.....	26
3.5	Técnicas de geoprocessamento aplicadas aos modelos hidrológicos.....	27
3.6	Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente .....	30
3.6.1	Representação digital do relevo .....	31
3.6.2	Parâmetros hidrológicos originados por Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes - MDEHC.....	36
3.7	Uso e ocupação do solo por Sensoriamento Remoto .....	37
3.7.1	Classificação de imagens de satélite .....	40
4	Caracterização da área de estudo .....	42
4.1	Estudo hidrológico da Ponte sobre o Rio Jacaré.....	47
5	Metodologia .....	50
5.1	Materiais.....	50
5.2	Aquisição dos parâmetros que compõem o modelo SCS através das técnicas de geoprocessamento .....	50
5.2.1	Geração do modelo digital de elevação – MDE .....	51

5.2.2	Delimitação do limite da bacia hidrográfica .....	57
5.2.3	Cálculo da declividade efetiva .....	59
5.2.4	Mapeamento do complexo solo/vegetação - CN.....	60
5.2.5	Modelagem.....	67
6	Resultados e Discussão.....	68
7	Conclusões .....	72
8	Referências.....	74

## 1 INTRODUÇÃO

A hidrologia, conforme definição do *Committee for Scientific Hidrology of United States Federal Council of Science and Technology (1962)*, é a ciência que trata da água do planeta Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e suas reações com o meio ambiente, incluindo suas relações com a vida.

Os aspectos elencados pela definição da ciência traduzem o ciclo hidrológico. Uma descrição simplificada deste ciclo tem início com a evaporação das águas dos oceanos, dos continentes e da transpiração de plantas, e este vapor é transportado pelos movimentos de massas de ar. A condensação deste vapor forma nuvens que, em seguida, precipitam de maneira dispersada ao longo do globo terrestre. Grande parte da água fica retida no solo, escoando sobre a superfície terrestre e penetrando profundamente, abastecendo os aquíferos. O ciclo se completa com parte desta água retornando à atmosfera pelo processo de evaporação e transpiração das plantas. Conforme Villela e Mattos (1975), o ciclo hidrológico visto assim, de forma simplificada, idealiza um mecanismo contínuo, cujo funcionamento se dá por taxas constantes. Porém, na realidade, o movimento da água em cada fase do ciclo ocorre de forma diferente, é bastante aleatório, variando tanto no espaço como no tempo. Exemplos clássicos desta descontinuidade são as chuvas torrenciais e os fenômenos de seca, onde os extremos desta aleatoriedade se apresentam no ciclo hidrológico.

A compreensão científica sobre este ciclo foi desenvolvida ao longo da evolução da hidrologia. As propriedades físicas e químicas da água e a relação do homem com os recursos hídricos nem sempre foram foco dos estudos hidrológicos. Desde milhares de anos antes de Cristo até fins do século XVII, a preocupação era voltada para a compreensão da origem das águas e de seu aproveitamento ou controle. São muitas as evidências neste sentido na antiguidade materializadas nas ruínas de sistemas de irrigação, escoamento de água pluvial e de controle de inundação e abastecimento, ainda que a falta de compreensão sobre a complexidade da relação destes mecanismos com os fenômenos hidrológicos tenham ocasionado eventos desastrosos, principalmente em estruturas de controle de inundação em função de estimativas de vazões de enchentes subdimensionadas. Assim, a base empírica marcou o desenvolvimento inicial da ciência. As primeiras

observações voltadas para a compreensão do ciclo hidrológico visavam fenômenos como infiltração, escoamento superficial, evaporação e condensação, de onde foram surgindo às hipóteses sobre suas ocorrências.

Para a racionalização dos conhecimentos empíricos surgiram formulações e laboratórios de pesquisa com consideráveis evoluções na segunda metade do século XIX e século XX. Este processo também passou por um período de melhoria tecnológica, a partir de 1950, por meio da modernização de aparelhos de medições, como a implementação de estações meteorológicas, o que possibilitou a obtenção e registro de dados de forma sistemática e precisa, essenciais para as experiências e previsões.

A utilização das técnicas da hidrologia no planejamento da utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e ocupação de bacia hidrográfica deu origem à hidrologia aplicada. Neste campo, a ciência passa a atuar no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas, abastecimento de água, drenagem, aproveitamento hidroelétrico, uso do solo, controle de erosão, poluição e qualidade da água, irrigação, navegação, dentre outros.

Pela diversidade de cenários em que a hidrologia está inserida, a multidisciplinaridade na aplicação da ciência tornou-se necessária e evidente, exemplos deste fato podem ser verificados por algumas áreas do conhecimento, como a hidrometeorologia, voltada para o estudo da dinâmica da água na atmosfera; geomorfologia, tratando das análises do relevo e sua associação com o escoamento; pedologia, analisando a dinâmica das águas nos diversos tipos de solos; biologia, que trata da relação da água com a vegetação; e engenharia, que quantifica e traduz em modelos matemáticos o comportamento hidráulico e hidrológico.

Concomitantemente, outro passo importante na evolução da hidrologia foi dado a partir do advento dos computadores e da capacidade de cálculo que eles proporcionam, permitindo o avanço de modelos hidrológicos, essenciais para a simulação hidrológica. Estes modelos integram conceitos até hoje em desenvolvimento para os processos que compõem o ciclo hidrológico, como infiltração, evapotranspiração, armazenamento, escoamento, dentre outros, podendo ser traduzidos pela aproximação dos fenômenos naturais para o meio racional.

Os modelos são representados simplificada e por entradas e saídas de dados. As entradas são os elementos que irão compor o modelo, logo irão interagir entre si, criando as saídas, que são os resultados do modelo implementado. A complexidade e a quantidade das entradas e saídas variam de acordo com o modelo a ser utilizado, o objetivo pretendido e, principalmente, o fenômeno ou situação em que se deseja estudar.

Dentre as fases básicas do ciclo hidrológico talvez a de maior importância seja a do escoamento superficial, onde é tratada a ocorrência e transporte da água na superfície, objeto da maioria dos estudos hidrológicos. O conhecimento desta fase é essencial no dimensionamento de diversas estruturas, como as denominadas obras-de-arte correntes e especiais, constituídas por bueiros e pontes.

Alguns modelos visam simular esta fase, dentre eles os denominados “precipitação-vazão”, que buscam simular os diversos processos do ciclo hidrológico compreendidos entre a precipitação e a vazão em determinado ponto da área em estudo. Foram desenvolvidos diante da necessidade de considerar séries históricas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos, além da modificação das bacias por obras hidráulicas e alterações no uso do solo, uma vez que partindo da precipitação, é possível completar as vazões desconhecidas ou estimá-las para os novos cenários existentes ou previstos para a área de estudo (Tucci, 2005).

A simulação dos fenômenos hidrológicos teve como aliada o desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas (SIGs), capazes de representar, por meio do geoprocessamento, quantitativamente e com fidelidade considerável, os aspectos físicos e morfológicos da bacia hidrográfica, principal unidade de estudo da hidrologia.

Os modelos matemáticos e sua implementação em meio computacional, com a inclusão da variável espacial, permite que os conhecimentos e resultados gerados pelas diversas áreas do conhecimento que contribuem para a hidrologia sejam visualizados em interação, aumentando a capacidade de interpretação dos fenômenos hidrológicos.

Várias informações utilizadas em estudos hidrológicos podem ser obtidas por meio de recursos computacionais operados por profissionais de diferentes formações. O conhecimento sobre o tratamento de bases cartográficas atribuí na

utilização destes recursos um ganho de precisão, como consequência, ocorre o aumento da confiabilidade dos dados. O georreferenciamento de bases cartográficas e a definição de limites de bacias hidrográficas são alguns dos dados amplamente gerados por recursos computacionais, sendo o geoprocessamento a ferramenta mais utilizada para a obtenção destes dados.

Neste contexto o trabalho tem como principal objetivo, a utilização de técnicas de tratamento de informações geográficas podem agilizar a aplicação de modelos hidrológicos, este trabalho deseja dar subsídios à obtenção de informações espaciais requeridas na aplicação do modelo desenvolvido pelo *Soil Conservation Service – SCS*, mais conhecido como *Curve Number*. O geoprocessamento será utilizado no sentido de realizar o tratamento dos dados de entrada por meio de algoritmos computacionais de fácil acesso, culminando na obtenção de informações que dizem respeito, especificamente, aos parâmetros físicos da bacia hidrográfica que o modelo exige.

Os resultados obtidos a partir das técnicas de automatização implementadas serão comparados com aqueles obtidos em um estudo hidrológico já realizado pelos métodos convencionais, seguindo as orientações do Manual de Drenagem de Rodovias (Jabôr, 2013), base técnica referencial para a elaboração de estudos hidrológicos para o Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais – DER/MG.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Utilizar das técnicas de geoprocessamento para extração dos dados físicos da bacia hidrográfica do Rio Jacaré, utilizados como parâmetros de entrada no modelo desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS - CN, e verificar a eficiência da metodologia proposta.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Realizar o tratamento dos dados de entrada do modelo tipo “precipitação-vazão”, visando aumentar a potencialidade de resposta;
- Mensurar como os dados de relevo, a partir do tratamento da base topográfica, integram a composição do modelo;
- Elaborar uma rotina de geoprocessamento eficaz para a aplicação do modelo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Modelos hidrológicos

A modelagem de sistemas é um procedimento de implementação de modelos matemáticos de simulação, ou protótipos, que representam um sistema real, possibilitando a reconstituição de processos. Esta metodologia permite a geração de cenários a partir dos quais pode-se proceder análises, avaliações e orientar processos de tomadas de decisão.

Um sistema é uma estrutura composta por elementos inter-relacionados que se interagem desempenhando uma função. Haigh (1985), citado por (Christofoletti, 1999), define sistema como *“uma totalidade que é criada pela integração de um conjunto estrutura de partes componentes, cujas inter-relações estruturais e funcionais criam uma inteireza que não se encontra implicada por aquelas partes componentes quando desagregadas”*.

O sistema é considerado complexo quando não pode ser reduzido às suas partes em separado sem a perda do significado original. A partir destas definições é possível fazer uma analogia aos fenômenos ambientais, como a dinâmica de uso e cobertura da Terra, processo de natureza espaço-temporal, que ocorre através da interação de diversas variáveis.

Deve-se considerar ainda que um sistema pode ser parte integrante de outro maior ou ser integrado por outros menores, o que demonstra a sinergia entre diversos sistemas e suas variáveis. É em função do objetivo do estudo e da escala das variáveis consideradas que os sistemas podem ser tratados de forma conjunta ou ramificada. Um exemplo prático é o estudo de bacias hidrográficas, que podem ser analisadas tendo como escala o rio principal, suas sub-bacias ou seus afluentes, ainda que a área analisada possa ser a mesma, as variáveis e os sistemas são individuais.

A etapa de definição entre os fenômenos e/ou processos ambientais passíveis de serem entendidos como sistema, segundo Christofoletti (1999), é um ato mental, que procura abstrair o sistema da realidade que o envolve. Esta ação passa pelo conhecimento empírico do pesquisador, que lhe dará a capacidade de estabelecer quais são as variáveis e as relações entre estas variáveis na descrição do sistema.

Quando o sistema é estabelecido e as relações são identificadas, pode-se dizer que está definido um modelo. O modelo pode ser entendido, segundo Haggett e Chorley (1967; 1975), citados por Christofolletti (1999), como:

uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade.

Cada modelo é estabelecido considerando seu objetivo, fenômeno ou processo que está sendo simulado. Ainda que os modelos representem fenômenos distintos, e nem sempre haja uma relação direta entre um modelo e outro, os tipos de variáveis e suas relações são semelhantes e, por sua vez, determinantes na forma de operacionalização do modelo.

A tipologia de variáveis caracteriza alguns tipos de modelos, como por exemplo, os modelos matemáticos, que são aqueles representados por equações na descrição dos processos; os modelos de sistemas que descrevem a organização do modelo a partir da identificação das relações entre os elementos que o compõem; e os preditivos, que trabalham com a alteração dos valores dos elementos que compõem determinado modelo, prevendo a evolução deste a partir destas mudanças.

Outras categorias são definidas dependendo do objetivo do estudo e da área do conhecimento envolvida, como a hidrologia, geomorfologia, pedologia, engenharia, dentre outras.

Os modelos hidrológicos utilizam como unidade de estudo principal a bacia hidrográfica. O ciclo hidrológico pode ser estudado em boa parte através da observação do comportamento da bacia hidrográfica. Segundo Guerra & Cunha (2007), a bacia hidrográfica, também conhecida como bacia de drenagem, pode ser definida como “uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial”. A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, sobre todos os processos físicos que ocorrem durante uma chuva, ou seja, a própria precipitação, a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial (Santos, 2009).

O comportamento heterogêneo dos elementos que compõem a bacia hidrográfica fez com que a hidrologia desenvolvesse diversos modelos,

diferenciados pelos processos hidrológicos que visam simular, ou até mesmo a ênfase dada a um determinado comportamento. Tucci (2005) chama a atenção para o fato do modelo, por si só, não ser um objetivo “mas uma ferramenta para atingir determinado objetivo. A mística sobre o uso de modelos hidrológicos, criou uma falsa idéia de sua real potencialidade ou necessidade”.

A modelagem na hidrologia é empregada majoritariamente para prever comportamentos distintos em determinadas situações, como em grandes eventos pluviométricos e quando há alteração da morfologia de cursos d'água. Os resultados obtidos por qualquer modelo não substituem os dados primários. Os dados obtidos por medições em meio natural são essenciais para calibrar os modelos hidrológicos, ratificando-os ou retificando-os.

Este aspecto reforça a necessidade dos modelos hidrológicos serem criados com base em dados em quantidade e qualidade adequadas, as formulações matemáticas utilizadas para representar diferentes processos hidrológicos são parte conceituais e parte empíricas.

Estes modelos também consideram a variável espacial, uma vez que a distribuição das precipitações, entre outros aspectos, é fundamental no estudo e compreensão do ciclo hidrológico.

Tucci (2005) elenca alguns princípios utilizados na descrição e estudo dos modelos hidrológicos, a saber:

- Risco e incerteza: o risco de ocorrência de uma determinada variável aleatória é a chance aceita pelo projetista que a variável seja maior que um determinado valor (menor no caso de mínimos). A incerteza refere-se à diferença entre as estatísticas da amostra e da população, que pode ser devido à representatividade da amostra ou devido a erros de coleta e processamento dos dados da variável aleatória. Quando um vertedor é dimensionado com risco de 1000 anos, significa que o projetista aceita um risco de 0,1% da vazão ser superior a de projeto em um ano qualquer. A incerteza ocorre quando: (i) a amostra for suficientemente pequena, para que a distribuição estatística ajustada aos dados, apresente uma estimativa tendenciosa do risco ou; (ii) que existam dados errados, que produzam uma probabilidade maior ou menor que a verdadeira.

- Série estacionária ou não-estacionária: uma série é estacionária quando as estatísticas da mesma não se alteram com o tempo. Uma série é não-estacionária no caso contrário. Os níveis de um rio se alteram após a construção de uma barragem a montante da seção de leitura, a série que engloba os dois períodos não é homogênea. A série de vazões, resultante de uma bacia que sofre urbanização, se altera em função da impermeabilização e da canalização, tornando-a não homogênea.
- Parcimônia: a representação adequada do comportamento de um processo ou um sistema por um modelo com o menor número possível de parâmetros é entendido como o princípio da parcimônia.

Estes princípios são utilizados na maioria dos estudos em hidrologia e engenharia uma vez que as estruturas projetadas para o aproveitamento dos recursos hídricos sempre consideram o risco relacionado à sua vida útil. A ciência também utiliza de dados históricos e estatísticos para compreender e melhorar a capacidade de prever os fenômenos hidrológicos.

O princípio da parcimônia é uma premissa na construção de todos os tipos de modelos, sejam hidrológicos ou não, uma vez que um modelo se torna mais eficiente quando os parâmetros e operações envolvidas são simplificadas sem provocar danos aos resultados, isto o torna mais inteligível, traz eficiência na implementação e menor custo operacional.

A gama de componentes do sistema hidrológico representa um desafio para o estudo da hidrologia, neste sentido, diferentes tipos de modelos hidrológicos, cada um com sua particularidade, são definidos de acordo com os fenômenos que se propõem a modelar.

### **3.2 Classificação dos modelos hidrológicos**

A classificação dos modelos hidrológicos considera basicamente as características de composição dos modelos no que tange ao tipo de variável, escala de representação e funções utilizadas para descrever os fenômenos. Cada característica é atribuída a determinada classe, portanto, ao classificar um modelo, o pesquisador atribui diversas classes, de acordo com a interpretação sobre as características que o compõem e a forma com que elas serão interagidas.

Com relação à base científica dos modelos, existem os modelos ditos conceituais e os fisicamente fundamentados, o primeiro pode ser classificado

quando as funções que o compõem e se baseiam nos processos físicos. Tucci (2005) ressalta que, a definição de modelo conceitual é artificial, uma vez que as funções empíricas também são utilizadas, porém, nestes modelos as funções são relacionadas com a física dos processos, podendo ser denominados como semi-conceituais. Os modelos fisicamente fundamentados incorporam as técnicas matemáticas de acordo com os dados observados sem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos, porém, quando estes modelos conseguem se aproximar da física dos sistemas, também são classificados como modelos físicos. Santos (2008) ressalta que estes modelos podem ser aplicados em bacias hidrográficas que não possuem dados observados.

Quanto à escala temporal dos parâmetros, os modelos ditos contínuos consideram a ocorrência dos fenômenos de forma contínua no tempo, enquanto os modelos por evento trabalham com os fenômenos em intervalos discretos. Esta classificação se dá majoritariamente por questões de economia na aplicação do modelo e na precisão dos resultados, uma vez que a aquisição dos dados representa uma etapa onerosa. Por este motivo, apesar dos processos hidrológicos serem, por natureza, contínuos, são comumente representados por modelos por evento.

Pela ótica da forma de obtenção e tratamento matemático dos parâmetros, existem os modelos estocásticos, que consideram os parâmetros de ordem estatística na descrição dos fenômenos, com algumas variáveis com comportamento aleatório, descrito por meio de probabilidades. O modelo passa a ser considerado determinístico quando possui relações matemáticas definidas para esta descrição, onde determinado dado de entrada sempre irá gerar a mesma saída, considerando o mesmo estado inicial do sistema (Thimotti, 2003).

No que diz respeito à escala espacial dos parâmetros, os modelos concentrados, também conhecidos como genéricos, utilizam parâmetros homogêneos do ponto de vista espacial, onde não há variação dos dados na área de ocorrência do fenômeno. Os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial dos parâmetros, portanto, os valores se alteram de acordo com a sua localização.

Nas últimas décadas os modelos hidrológicos passaram a ser desenvolvidos levando-se em consideração sua aplicação em função da dimensão da bacia. Os

modelos concentrados visam distribuir de forma empírica os parâmetros em áreas de grandes bacias e os distribuídos buscam representar de forma mais precisa os processos hidrológicos em bacias de menores extensões. Estes modelos agregam o estudo do comportamento de diversos parâmetros de forma individual, em porções diferentes da mesma bacia hidrográfica, portanto, os erros estão em sua maioria relacionados à heterogeneidade espacial e temporal dos processos representados. Magalhães (2005) ressalta que no interior de cada um dos pequenos compartimentos dos modelos distribuídos existem as variáveis que também são consideradas homogêneas. O mesmo autor chama atenção que estes modelos impõem o detalhamento de grandezas em escalas reduzidas, para as quais nem sempre se dispõem de informações para todos os parâmetros de um determinado modelo.

Conforme Tucci (2005), os modelos distribuídos, agregados a modelos digitais de terreno e o geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, sujeitas a ações antrópicas. Verifica-se que uma análise pontual, dificilmente pode ser extrapolada para outras escalas da bacia.

Estas classificações facilitam a compreensão da aplicação dos modelos hidrológicos, porém, explicitam também a estreita relação entre essas representações, uma que vez que algumas tipologias englobam outras. O que torna a definição sobre a classificação de determinado modelo utilizado, muitas vezes, uma questão do ponto de vista do pesquisador diante do objetivo do modelo e fenômeno representado. O presente estudo irá tratar de um modelo conceitual, determinístico, concentrado e por evento, do tipo precipitação-vazão, detalhado no item seguinte.

A Tabela 1 apresenta a classificação de alguns modelos comumente utilizados na hidrologia.

Tabela 1 – Tipos de modelos comumente utilizados na hidrologia

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Precipitação-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual; avaliação do uso da terra
Vazão-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual		Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão de cheia
Geração Estocástica de Vazão	Estocástico		Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo Saturado	Determinístico		Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas à partir de dados de realimentação, bombeamento, etc	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático, iteração rio-aquífero, etc
Hidrodinâmico	Determinístico		Sintetiza vazões em rios e rede de canais	Simulação de alterações do sistema, efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de Água de Rios e Reservatórios	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade de água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Rede de Canais e Conduitos	Determinístico	Comportamento e Otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede abastecimento de água; rede de irrigação
Operação de Reservatórios	Estocástico; Determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
Planejamento e Gestão de Sistemas Múltiplos	Estocástico; Determinístico	Comportamento, Otimização e Planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial, etc

Fonte: adaptado de Tucci, 2005

### 3.3 Modelos tipo precipitação-vazão

Os modelos do tipo precipitação-vazão visam quantificar o volume de água em determinado ponto da bacia hidrográfica proveniente da fase do ciclo hidrológico compreendida entre a precipitação e o escoamento. Desta forma, estes modelos descrevem a distribuição da precipitação, considerando as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, percolação, abastecimento de aquíferos, escoamento superficial, sub-superficial e no rio (Tucci, 2005).

Modelos deste tipo conseguem gerar resultados que atendem grande parte dos problemas relacionados às suas aplicações: sua implementação foi motivada pela necessidade de calcular as vazões a serem transpostas por diferentes estruturas de aproveitamento de recursos hídricos, bem como a realização de estimativas de vazões para diferentes cenários envolvendo as bacias hidrográficas. Ironicamente, a determinação de uma relação robusta entre a precipitação e escoamento superficial para um divisor de águas tem sido um dos problemas mais importantes para hidrólogos, engenheiros e agricultores desde a sua primeira documentação por P. Perrault cerca de 325 anos atrás (Geetha et al., 2008).

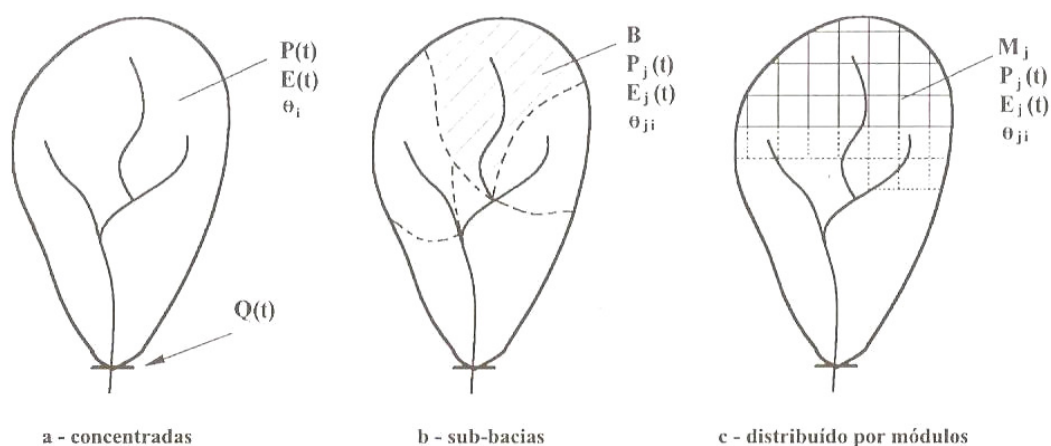
É uma das tipologias mais utilizadas na atualidade por também serem modelos parcimoniosos, ainda que demandem um bom entendimento pelo usuário. Grande parte dos erros atribuídos a estes modelos ocorrem na etapa de prognóstico.

Conforme Tucci (2005), estes modelos são construídos basicamente a partir de cinco elementos, que variam de acordo com o tipo de modelo, são eles: a discretização da bacia hidrográfica, as variações temporais de entrada, a estrutura básica da integração dos processos, a aquisição dos dados físicos das bacias e a determinação dos parâmetros.

A discretização da bacia hidrográfica diz respeito à escala espacial de representação dos parâmetros, conforme apresentado anteriormente quanto a essa característica os modelos podem ser divididos em concentrados e distribuídos. A

distribuição pode ser realizada por sub-bacias, dividindo a bacia de interesse de acordo com as sub-bacias de seus afluentes, e tratando os parâmetros como homogêneos para cada uma. A distribuição também pode ser realizada por módulos, onde cada módulo é representado por uma área geométrica idêntica, geralmente um quadrado, dividindo a bacia hidrográfica em uma matriz (Figura 1).

Figura 1 – Discretização de bacias hidrográficas



Fonte: adaptado de Tucci, 2005

As variações temporais de entrada são aplicadas às principais componentes envolvidas no ciclo hidrológico, como a precipitação, evaporação, transpiração dos seres, infiltração, e escoamentos superficiais, sub-superficiais e subterrâneos (Magalhães, 2005). Os primeiros são a principal fonte de erro dos modelos precipitação-vazão devido às incertezas das medições, densidade de postos e intervalo dos registros e os demais dados são escassos. Vale ressaltar que os dados de vazão (escoamento superficial) são utilizados para validação dos modelos.

A estrutura básica da integração dos processos é dividida em dois módulos: o da bacia responsável por simular o balanço dos fluxos e escoamento, e o do canal, responsável por simular o escoamento nos rios e canais definidos, propagando a vazão de montante e recebendo a saída do modelo proveniente do módulo da bacia.

A aquisição dos dados físicos das bacias torna-se essencial no tocante à qualidade dos dados de entrada do modelo. Estas informações são responsáveis por dar ao modelo a dimensão da influência da forma da bacia sobre os parâmetros analisados e, conseqüentemente, por fornecer dados essenciais para a simulação

hidrológica, como direção de escoamento, declividade, comprimento dos canais (talvegues), gradiente altimétrico, dentre outros.

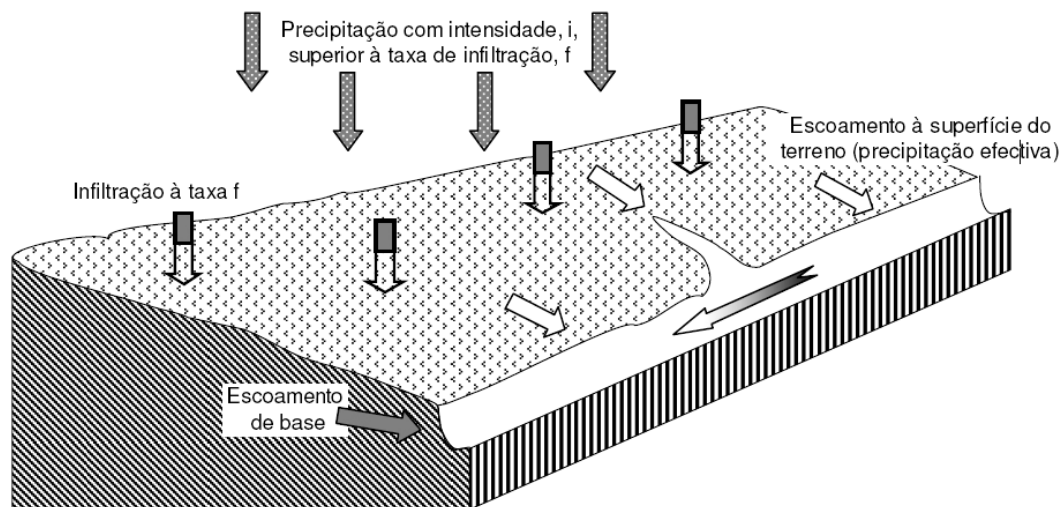
A determinação dos parâmetros diz respeito à seleção dos dados de entrada do modelo de acordo com a sua representatividade. Isto se faz necessário quando o número de parâmetros é alto. Nesses casos, portanto, escolhe-se aqueles mais representativos, ou seja, que são sensíveis na análise do modelo. Desta forma, aplica-se o princípio da parcimônia, simplificando o modelo sem perder a capacidade de resposta.

Por exemplo, a importância de se considerar num dado modelo hidrológico as diversas perdas de precipitação depende da aplicação a que ele se destina. De modo geral, os modelos de análise de cheia em cursos de água consideram a perspectiva Hortoniana<sup>1</sup> do escoamento (Figura 2). O que significa que a infiltração é considerada o processo de perda da precipitação realmente significativo, determinando o volume da cheia e a forma do hidrograma de cheia, sendo o efeito dos demais processos que causam perda de precipitação desprezados ou simplesmente considerados sob a forma de perdas iniciais. Já num modelo destinado à simulação dos escoamentos diários, com ou sem a presença de precipitação, terão particular importância não só as parcelas relativas à infiltração como também à evapotranspiração, não só no que diz respeito a perdas de precipitação, mas também nos demais processos a simular (Portela, 2005).

---

<sup>1</sup> Horton é considerado pioneiro no que tange à teoria de infiltração-escoamento. No artigo intitulado "*The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle*", publicado em 1933, Horton descreve quantitativamente o mecanismo de geração de escoamento superficial a partir da precipitação e a capacidade de infiltração do solo. Assim na perspectiva Hortoniana o escoamento superficial, é o excedente da infiltração.

Figura 2 - Perspectiva Hortoniana do escoamento superficial



Fonte: Portela, 2005

Pelas características de seus componentes, os modelos precipitação-vazão por si só viabilizam diversos usos na engenharia, bem como são partes integrantes de modelos mais completos, como os de produção e transporte de sedimentos, operação de reservatórios e simulação da qualidade da água (Singh & Woolshier, 2002).

Dentre os modelos deste tipo, destaca-se nesta pesquisa a aplicação de um modelo desenvolvido pelo Departamento de Conservação de Solos dos Estados Unidos (*Soil Conservation Service-SCS*), conhecido como SCS-CN, largamente aplicado no mundo, detalhado no item seguinte.

### 3.4 Modelo Soil Conservation Service – SCS-Curve Number

O modelo SCS-CN foi apresentado pelo Departamento de Conservação de Solos americano em 1972. Este modelo é de ampla utilização em simulações de hidrogramas de cheia em projeto de obras hidráulicas e estabelecimento de risco de enchentes. Sua popularidade em todo o mundo é devida à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros e relação destes parâmetros com as características físicas da bacia (Geetha et. al., 2008 e Tucci, 2005).

Trata-se de um modelo do tipo precipitação-vazão, conceitual, determinístico, originalmente concentrado, mas que pode ser aplicado de forma distribuída por sub-bacias. As equações existentes na sua estrutura determinam a precipitação de projeto, definida como o evento que se deseja simular; o volume superficial, sendo o

volume de água escoado; e a propagação do escoamento na bacia, considerando o tempo de concentração.

O modelo baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e das perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (Pereira, 2008).

Segundo Jiazhu & Xianzhao (2008), a utilização do sensoriamento remoto é compatível com este modelo, uma vez que seus parâmetros principais são de ordem física (uso do solo, tipo de solo, declividade do terreno, etc.) e podem ser conhecidos por esta ferramenta.

A seguir serão descritas as equações que compõem o modelo, bem como as adaptações conforme o Manual de Drenagem de Rodovias (Jabôr, 2013). As adaptações deste manual foram aplicadas nos cálculos do estudo hidrológico realizado de forma convencional, utilizado nesta pesquisa para comparação das diferentes metodologias de aquisição dos parâmetros.

#### *3.4.1 Componentes do modelo*

##### **3.4.1.1 Escoamento superficial,**

O SCS é um modelo para determinação das perdas de precipitação e, conseqüentemente, da precipitação efetiva, ou seja, do escoamento superficial. Modelos desse tipo consideram normalmente dois tipos de perdas: uma perda inicial e uma perda contínua. A perda inicial é consequência da maior capacidade da bacia hidrográfica nos primeiros instantes de ocorrência da chuva para interceptar, para armazenar em depressões e para infiltrar a água. Uma vez satisfeita essa capacidade inicial, os modelos passam a considerar a perda contínua que, a rigor, deveria decrescer ao longo da duração da precipitação, por decréscimo da taxa de infiltração.

O método do SCS admite que, na sequência de um acontecimento pluviométrico intenso, a razão entre a precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial, que são as perdas contínuas de precipitação, e a capacidade máxima de retenção de água é igual à razão entre a precipitação efetiva e o escoamento superficial potencial (PONCE, 1989, apud Portela 2005).

A capacidade máxima de retenção de água no solo, nas depressões do terreno e nos obstáculos que interceptam a chuva caracteriza um estado de saturação extrema para o qual se pode admitir que a taxa de infiltração tende para zero, igualando o volume de escoamento superficial com o da precipitação. Já o escoamento superficial potencial é definido como sendo a precipitação deduzidas as perdas iniciais que compreendem todas as perdas por interceptação, armazenamento em depressões, evapotranspiração e infiltração que antecedem o encharcamento da superfície e a conseqüentemente formação do escoamento superficial.

Matematicamente esta relação pode ser expressa pela equação 1 abaixo.

Equação 1 – Relação entre as perdas iniciais e escoamento superficial

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Onde então:

P → Precipitação (mm);

P<sub>e</sub> → Precipitação efetiva (mm);

F<sub>a</sub> → Perdas contínuas de precipitação (mm);

S → Capacidade máxima de retenção (mm);

I<sub>a</sub> → Perdas iniciais (mm),

P - I<sub>a</sub> → Escoamento superficial potencial (mm).

Pelo princípio da continuidade tem-se que: P = P<sub>e</sub> + I<sub>a</sub> + F<sub>a</sub>

Como,  $F_a = \frac{P_e}{P - I_a} \times S$  pela equação anterior, chega-se à equação do SCS para o escoamento superficial, Q (em mm), que é igual a precipitação efetiva (mm).

Equação 2 – Escoamento superficial segundo SCS (1972)

$$Q = P_e = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S}$$

Com base em estudos experimentais em pequenas bacias hidrográficas com ocupação agrícola, o SCS propôs que as perdas iniciais, I<sub>a</sub>, fossem

aproximadamente 20% da capacidade máxima de retenção de água na bacia hidrográfica ( Portela, 2005).

Considerando então  $I_a = 0,20S$ , o escoamento superficial , segundo o SCS, é dado por:

$$Q = P_e = \frac{(P - 0,25)^2}{P + 0,85}$$

Para utilização deste modelo em outros países, este coeficiente, aplicado à capacidade máxima de retenção da bacia para estimativa das perdas iniciais, tem sido objeto de análise. Segundo Ponce (1989, apud Portela, 2005), estudos indicaram que, em pequenas bacias hidrográficas em zonas moderadamente húmidas ou semi-áridas, este coeficiente pode variar de 0,0 a 0,26. Numa análise crítica para Portugal concluiu-se que o valor médio de 0,20 proposto pelo SCS não foi verificado “de forma inteiramente concludente” (Correia, 1984, apud Portela, 2005) e ainda que este coeficiente leva a um escoamento superficial muito baixo como consequência das perdas iniciais elevadas. Aplicando o modelo de perdas do SCS à bacia hidrográfica do Rio Maior - Portugal, Portela et al. (2000) concluíram que deveria ser adotado um coeficiente igual a zero, eliminando o valor devido às perdas iniciais, como forma de reduzir as perdas totais de precipitação obtidas para a bacia, as quais os pesquisadores reconheceram como serem nitidamente excessivas.

No Brasil ainda não há estudos que apresentem análises conclusivas sobre a adequação desta taxa de 20%. Jabôr (2013) no Manual de Drenagem de Rodovias não faz nenhuma alteração neste coeficiente.<sup>2</sup>

A capacidade máxima de retenção “S” foi relacionada ao tipo solo e seu uso e cobertura por meio do número de escoamento, CN (*curve number*). Tal relação é fornecida pelas equações abaixo:

---

<sup>2</sup> A fórmula constante no referido Manual para cálculo do escoamento, e transcrita abaixo, não expressa uma majoração do coeficiente de 20%, trata-se de uma adaptação para conversão do S em polegadas para milímetros.

$$Q = P_e = \frac{(P - 5,08S)^2}{P + 20,36S}$$

Equação 3 – Capacidade de retenção do solo considerando a medida em polegadas

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \text{ (para } S \text{ em polegadas)}$$

Equação 4 - Capacidade de retenção do solo considerando a medida em milímetros

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (para } S \text{ em milímetros)}$$

Os fatores determinantes para a definição do CN são, os tipos de solo, cobertura vegetal, culturas, condição hidrológica e condições de escoamento preexistentes. Portanto, pode-se considerar que este parâmetro refere-se às condições da cobertura do solo, variando de uma cobertura muito permeável até uma completamente impermeável, e de um solo com grande capacidade de infiltração para um de baixa infiltração (Chenget *al.* 2005).

O método do CN foi desenvolvido com dados de pesquisas em pequenas bacias agrícolas no meio-oeste americano, de forma que sua aplicação em bacias com características distintas das pesquisadas se torna incerta. O SCS disponibiliza tabelas com as diversas condições hidrológicas e coberturas de solo com os valores de CN.

Conforme Machado (2002), a relação entre as condições hidrológicas e a cobertura do solo descreve a combinação entre o grupo hidrológico do solo (tipo de solo), uso e manejo da terra (cobertura vegetal) e as condições de superfície (condições de escoamento). Estes fatores tem influência direta na estimativa da vazão de qualquer bacia hidrográfica. Outro fator considerado pelo SCS é a condição antecedente de umidade, que é uma mensuração do valor da umidade armazenada pela retenção, que tem relação com o histórico das chuvas.

Do ponto de vista hidrológico, são quatro os tipos de solos segundo o SCS:

**Solo A** – solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos com pouco silte e argila (mais permeável);

**Solo B** – solos menos permeáveis, arenosos e profundos do que o solo A e com permeabilidade superior à média;

**Solo C** – solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;

**Solo D** – solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (menos permeável).

O Departamento de Conservação de Solos Americano possui tabelas e mapas que mostram a distribuição espacial dos tipos de solos em seu país, onde também foram realizadas descrições detalhadas para cada município. Estes dados são essenciais para a correta definição do CN. No Brasil, a disponibilidade de informações sobre os tipos de solo é limitada, ainda que já existam compatibilizações entre os tipos de solo elencados pelo método do SCS e os encontrados no país (Sartori, 2005). Porém, estas compatibilizações não foram realizadas para todos os estados. Normalmente os dados referentes a pedologia são encontrados em mapas com escalas pequenas, apresentando classificações generalizadas que não satisfazem o detalhamento necessário para aplicação do modelo em pequenas bacias.

A tabela a seguir apresenta a estimativa do CN apresentada pelo SCS para áreas agrícolas e com diferentes tipos de uso urbano.

Tabela 2 – Valores de CN para áreas agrícolas

Uso do solo	Superfície	Tipo de solo			
Solo lavrado	com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	em curvas de níveis	67	77	83	87
	terraceamento em nível	64	76	84	88
	em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	em curvas de níveis	62	74	82	85
	terraceamento em nível	60	71	79	82
	em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	em curvas de níveis	60	72	81	84
	terraceamento em nível	57	70	78	89
	pobres	68	79	86	89
	normais	49	69	79	94
	boas	39	61	74	80
Pastagens em curvas de nível	pobres	47	67	81	88
	normais	25	59	75	83
	boas	6	35	70	79
Campos permanentes	normais	30	58	71	78
	esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	normais	36	60	73	79
	densas de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras	normais	56	75	86	91
Estradas de terra	ruim	72	82	87	89
	de superfície dura	74	84	90	92
Floresta	muito esparsa, baixa transpiração	56	75	86	91
	esparsas	46	68	78	84
	densas de alta transpiração	26	52	62	69
	normais	36	60	70	76

Fonte: adaptado de Tucci, 2005

Tabela 3 - Valores de CN para diferentes tipos de ocupação urbana

Uso do solo	Tipo de solo			
	A	B	C	D
Espaços abertos:				
Matos ou gramas cobrem 75% ou mais da área	39	61	74	80
Matos cobrem 50 a 75% da área	49	69	79	77
Áreas comerciais (85% impermeáveis)	89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeáveis)	81	88	91	93
Áreas residenciais				
tamanho do lote (m <sup>2</sup> )	área impermeável (%)			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques, estacionamentos, telhados e viadutos	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:				
Asfaltadas e com drenagem pluvial	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: adaptado de Tucci, 2005

Estes valores de CN apresentados nas tabelas acima pressupõem condições antecedentes de umidade (AMC - *Antecedent Moisture Conditions*), precipitação média acumulada dos cinco dias anteriores e devem ser corrigidos para condições de umidade diferentes, designadamente, mais secas (AMC I) ou mais úmidas (AMC III), conforme descrições abaixo:

**AMC I** – situação em que os solos estão secos, porém com umidade o suficiente para serem arados e cultivados. Na estação úmida, a precipitação acumulada dos cinco dias anteriores é menor que 36mm, e na seca menor que 13mm;

**AMC II** – situação média em que os solos correspondem à umidade da capacidade de campo, sendo os casos em que as condições da bacia precederam a ocorrência de cheias. Na estação úmida, as precipitações acumuladas nos cinco dias anteriores variam entre 36 e 53mm e na seca entre 13 e 28 mm;

**AMC III** – situação em que ocorreram precipitações consideráveis nos cinco dias anteriores e o solo encontra-se saturado. Na estação úmida, as precipitações

acumulados no período considerado superam 53mm e na estação seca este valor é maior que 28mm.

A Tabela 4 apresenta os valores de CN corrigidos de acordo com as condições de umidade antecedentes.

Tabela 4 – Correção dos valores de CN de acordo com as AMC

<b>Valores médios</b>	<b>Correção para AMC I</b>	<b>Correção para AMC III</b>
100	100	100
95	87	98
90	78	96
85	70	94
80	63	91
75	57	88
70	51	85
65	45	82
60	40	78
55	35	74
50	31	70
45	26	65
40	22	60
35	18	55
30	15	50
25	12	43
20	9	37
15	6	30
10	4	2
5	2	13

Fonte: adaptado de Tucci, 2005

Tradicionalmente, a definição do CN para uma bacia hidrográfica é calculada a partir da média ponderada da composição solo/vegetação da bacia inteira, ou para as sub-bacias relativamente homogêneas.

O uso de banco de dados geográficos e de sistema de informações geográficas tem melhorado a praticidade e a precisão da estimativa do CN, uma vez que possibilita a identificação da cobertura do solo com maior fidelidade à realidade da bacia.

Adaptações nos valores tabelados e nas metodologias de obtenção das variáveis do modelo SCS tem sido feitas devido à sua importância e facilidade de aplicação. Uma destas revisões é proposta por Jabôr (2013), que indica a obtenção do CN a partir de uma composição da declividade, geomorfologia da bacia e a

precipitação calculada em função do tempo de concentração segundo o seguinte princípio:

Equação 5 – Cálculo do CN pelo método Jabôr (2013)

$$CN = CN_1 \times CN_2 \times CN_3$$

Os valores de referência propostos para CN<sub>1</sub> (obtido a partir da área da bacia e da declividade efetiva do talvegue), CN<sub>2</sub>(obtido em função da geomorfologia da bacia) e CN<sub>3</sub> (relacionado à pluviometria obtida em função do tempo de concentração) são apresentados na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 – Valores de referência para o método CN Jabôr (2013)

A ≤ 30 Km <sup>2</sup>		30 Km <sup>2</sup> < A < 60 Km <sup>2</sup>		A ≥ 60 Km <sup>2</sup>		<b>Geomorfologia</b>		<b>CN2</b>
i (%)	CN1	i (%)	CN1	i (%)	CN1			
≤ 0,5	68	0,25	62	≤ 0,25	56	Região Montanhosa com rocha		1,1
1,0	70	0,5	64	0,3	68	Região Montanhosa		1,0
1,5	72	0,8	66	0,5	60	Região Ondulada		0,9
2,0	74	1,0	68	1,0	65	Região Plana		0,8
3,0	76	1,5	71	1,5	70			
4,0	78	2,0	77	2,0	80	<b>Precipitação (mm)</b>		<b>CN3</b>
5,0	80	3,0	81	3,0	85	≥ 177,8		0,6
6,0	82	4,0	84	≥ 4	90	177,8		0,7
7,0	84	5,0	88			152,4		0,8
8,0	86	≥ 6	90			127		0,9
9,0	88					101,6		1,0
≥ 10,0	90					76,2		1,1
						50,8		1,2
						25,4		1,3
						≤ 25,4		1,4

Onde:

i = declividade efetiva do talvegue em %

A = área da bacia em km<sup>2</sup>

A precipitação é calculada de acordo com a equação de chuva intensa, definida pela publicação “Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais” da Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais – COPASA e Universidade de Viçosa – UFV. Esta publicação definiu equações de intensidade de chuvas para 198 postos pluviográficos, sendo 177 no Estado de Minas Gerais, 11 no Espírito Santo e 5 na Bahia.

A equação 6 fornece a intensidade da chuva para cada posto.

Equação 6 – Cálculo de intensidade de chuvas

$$in = \frac{k \times Tr^a}{(Tc + b_3)^{c_3}}$$

Onde:

$i_n$  = intensidade da chuva

$k$  = constante empírica relacionado ao local analisado

$T_r$  = tempo de recorrência

$T_c$  = tempo de concentração

$a$ ,  $b$  e  $c$  = parâmetros empíricos que dependem da estação pluviográfica e da frequência

### 3.4.2 Propagação superficial

Outro parâmetro necessário para o cálculo da vazão a partir do modelo do SCS, é o tempo de concentração ( $T_c$ ) e o tempo de pico ( $T_p$ ) do hidrograma unitário sintético triangular.

O tempo de concentração é o tempo necessário para a água precipitada no ponto localizado mais a montante da bacia hidrográfica atinja a seção principal, ou exutório no qual se deseja obter a vazão.

O tempo de pico é o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo em que a vazão máxima é atingida. Existem diversas formulações para estabelecer estes parâmetros, considerando o objetivo do trabalho. A relação indicada por Jabôr (2013) para o cálculo do tempo de pico é:

Equação 7 – Tempo de pico (Jabôr, 2013)

$$T_p = \sqrt{T_c} + 0,6 \times T_c$$

O cálculo do tempo de concentração é uma alternativa para a estimativa do tempo de pico. Existem opções de equações para obtenção de  $T_c$  em função das características da bacias. O método de referência, utiliza o tempo de concentração de Kirpich, obtido com base na seguinte equação:

Equação 8 – Tempo de concentração de Kirpich

$$T_c = \left( 3,98 \times \left( \frac{L}{\sqrt{i}} \right)^{0,77} \right) \times 60$$

Onde  $T_c$  é o tempo de concentração em horas,  $L$  é a extensão do talvegue principal em quilômetros e  $i$  é a declividade efetiva do talvegue em metro/metro. O

coeficiente de 3,98 é utilizado para a homogeneização das unidades. A declividade efetiva é dada pela seguinte equação:

Equação 9 – Cálculo da declividade efetiva

$$i = \left[ \frac{L}{\frac{L1}{\sqrt{i1}} + \frac{L2}{\sqrt{i2}} + \frac{L3}{\sqrt{i3}} + \dots + \frac{Ln}{\sqrt{in}}} \right]^2$$

Onde L1, L2, L3 e Ln são os comprimentos parciais do talvegue em quilômetros e i1, i2, i3 e in são as declividades parciais de cada trecho do talvegue em m/m.

Por fim, para o cálculo da vazão máxima aplica-se a seguinte equação:

Equação 10 – Cálculo da vazão máxima

$$Q_p = \frac{K \times A \times Q}{T_p}$$

Onde:

A = área de drenagem em km<sup>2</sup>

K = constante empírica de 0,20836

Q = escoamento superficial

T<sub>p</sub> = tempo de pico do hidrograma

### 3.5 Técnicas de geoprocessamento aplicadas aos modelos hidrológicos

O geoprocessamento e o sensoriamento remoto vêm sendo ferramentas eficientes na composição dos modelos hidrológicos. Os dados físicos das bacias quando adquiridos de forma manual podem conter imprecisões, causadas tanto por falha do pesquisador quanto por procedimentos próprios do processo manual, alterando o resultado do modelo, uma vez que esses dados constituem parâmetros de entrada.

Além deste aspecto, estas técnicas são capazes de atribuir mais rapidez e redução de custos na obtenção e análise dos dados de interesse para a composição dos modelos hidrológicos.

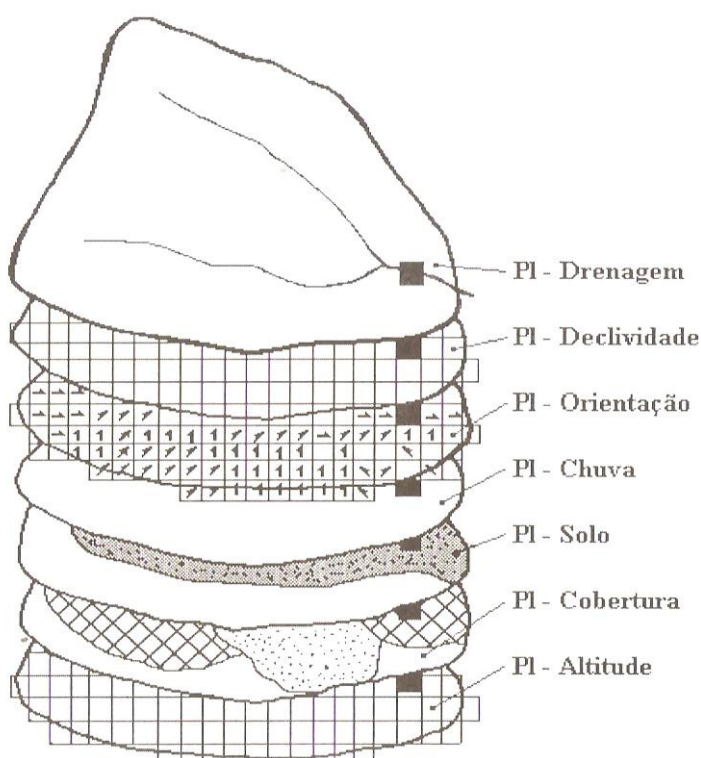
O relevo desempenha papel determinante na movimentação da água numa superfície, assim ele é fator condicionante dos mecanismos geradores de escoamento. A partir do modelo digital de elevação (MDE), é possível obter dados topográficos, como altitude, declividade e comprimento de talvegue. Outra

possibilidade é a aplicação de algoritmos de interpretação de fluxos (direções de escoamento), que são capazes de determinar os canais de acumulação, bem como definir a área de contribuição da bacia. Conforme Santos *et al.* (2006), a aplicação dos modelos hidrológicos ao nível das sub-bacias com o auxílio dos sistemas de informação geográfica podem constituir-se em um avanço quantitativo na caracterização dos parâmetros hidrológicos e no apoio à decisão.

O sensoriamento remoto possibilita a obtenção de dados como tipo de uso e cobertura do solo. A escala de obtenção destes dados muitas vezes não é compatível com a escala de outros parâmetros do modelo, quando isso ocorre, esse aspecto é responsável pelos chamados modelos semi-distribuídos, uma vez que parte dos dados do modelo (dados físicos) tem condições de serem introduzidos de forma distribuída e os demais parâmetros de forma concentrada.

Tucci (2005) apresenta de forma esquemática os vários níveis de informação gerados e integrados em SIG para modelagem hidrológica (Figura 3).

Figura 3 – Dados físicos gerados pelo geoprocessamento e sensoriamento remoto



Fonte: adaptado de Tucci, 2005

Ferraz *et.al*(1999) destacam que os sistemas de informação geográfica foram desenvolvidos para manipular dados espacialmente distribuídos, e tem sido a maior tendência mundial em aplicações de modelagem hidrológica. Seu objetivo principal está voltado à determinação de parâmetros hidrológicos pela análise topográfica do terreno, a partir dos modelos digitais e das características de cobertura do solo.

Beskowet *al.* (2009), concluiu que a aplicação dos modelos hidrológicos em ambiente SIG produziu melhores resultados. Este autor utilizou o SIG na aplicação dos modelos hidrológicos Curva-Número (Soil Conservation Service, 1971) e Curva-Número Modificado (CN-MMS – Mishraet *al.*, 2003) a uma bacia hidrográfica de Latossolos, utilizando uma ferramenta baseada nos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), em linguagem de programação PCRaster, simulando o escoamento superficial direto e levando em consideração a distribuição espacial e temporal das variáveis de entrada que influenciam o comportamento do fenômeno. Neste ambiente, os parâmetros físicos do modelo foram discretizados em formato raster, onde toda a área de estudo foi dividida em células de igual tamanho que tiveram os valores de cada parâmetro como atributo. A representação física foi obtida pelo modelo gerado no software ArcGIS 9.2. Vale ressaltar que este trabalho considerou formulações diferentes em cada método testado, mas utilizou da ferramenta SIG em todos eles para efeito de comparação com o estudo inicial, realizado sem esta ferramenta.

Santos *et al.* (2006) avaliou a aplicação dos SIG na modelagem hidrológica de uma bacia hidrográfica do Sul de Portugal, com área de 110 km<sup>2</sup>, utilizando como recurso a ferramenta HEC-GeoHMS. As delimitações da bacia hidrográfica, das sub-bacias e das linhas de água foram efetuadas com base no Modelo (MDT). Segundo os autores o SIG possibilitou simular e comparar os cenários previstos no estudo, assumindo uma importância primordial na aplicação dos modelos hidrológicos.

Barreto Neto & Souza Filho (2007) desenvolveram uma rotina baseada em lógica fuzzy para estimar o escoamento em uma bacia hidrográfica classificada como tamanho médio, usando o modelo do Soil Conservation Service - *Curve Number*. Os dados utilizados foram coletados *in loco*, e obtidos por tratamento de imagens ASTER multiespectrais. Os modelos computacionais foram desenvolvidos utilizando a Linguagem de Modelagem Ambiental PCRaster. A lógica *fuzzy* possibilitou a modelagem matemática em zonas de imprecisão e/ou incertezas, já

que esta lógica considera as zonas de transição entre geo-objetos, permitindo uma interpretação dos dados mais próxima da realidade dos fenômenos naturais. A validação das vazões derivadas do método aplicado demonstrou que chegou-se a valores de escoamento superficial próximos aos observados na bacia, no que tange ao parâmetro de escoamento superficial, confirmando a adequação do uso da teoria da lógica *fuzzy* na representação de informações fisiográficas pois permitiu mais acurácia na modelagem do escoamento superficial.

Mendes Filho et al. (2007) utilizou do SIG para obter a capacidade de armazenamento de água no solo no município de São José dos Campos/SP, visando a implementação do modelo SCS-CN. O autor utilizou de estudo complementar para realizar a classificação do grupo hidrológico do tipo de solo analogamente à classificação original do modelo, em seguida utilizou de mapeamento do uso do solo fornecido pela prefeitura do município, interagindo os dados de forma distribuída através de álgebra de mapas, gerando o mapeamento da capacidade de armazenamento do solo em todo o município.

Melo et al. (2008) fez uma revisão sobre a utilização de SIGs na aplicação de modelos hidrológicos, com aplicação da ferramenta denominada AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment*) na obtenção de parâmetros físicos da bacia hidrográfica. O autor analisou a geração destes dados e ressaltou a eficiência da ferramenta computacional na automatização, manipulação e processamento dos dados relacionados aos modelos hidrológicos.

Diversas metodologias utilizando o geoprocessamento são aplicadas no sentido de obter os parâmetros físicos que compõem modelos hidrológicos. As aplicações são realizadas, em sua maioria, visando o aumento da confiabilidade do dado ou facilitar a aquisição de informações que originalmente são difíceis de serem obtidas. No item seguinte serão descritos os principais produtos gerados pelo geoprocessamento na aplicação de modelos hidrológicos, especificamente para a geração dos dados necessários para o modelo SCS – CN, objeto desta pesquisa.

### **3.6 Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente**

Por reunir diversos aspectos e processos da dinâmica hidrológica, a bacia hidrográfica se tornou a principal unidade espacial dos estudos hidrológicos. O relevo atua na bacia hidrográfica como agente regulador da distribuição do fluxo de água e energia, sendo representado em meio digital pelos modelos digitais de

elevação – MDE, em formato matricial (*raster*) e TIN (*Triangulated Irregular Network*), sendo este último mais difundido devido a suas peculiaridades técnicas, porém, menos recomendado por questões operacionais quando aplicado a grandes bacias (Chaves, 2006).

Por meio da representação do relevo em meio digital, os atributos físicos das bacias hidrográficas são passíveis de serem extraídos, com considerável rapidez, eficiência e, na maioria dos casos, com baixo custo operacional. Os modelos digitais de elevação devem ser elaborados de acordo com a análise do relevo pretendida. Algoritmos comumente utilizados para diversos estudos, como os geomorfológicos, geram superfícies que criam formas no terreno indesejáveis para os estudos hidrológicos, por exemplo, depressões que podem ser interpretadas como interrupções no fluxo da água. Visando solucionar e adaptar esta ferramenta para a utilização na hidrologia, algoritmos de processamento dos MDEs foram desenvolvidos, criando os denominados Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes – MDEHC.

Para a melhor compreensão dos elementos envolvidos na elaboração destes modelos, a seguir serão apresentados os principais tipos de representação digital do relevo, responsáveis pela geração dos MDEs, bem como os atributos físicos das bacias hidrográficas que são extraídos destes modelos na aplicação pretendida pela pesquisa.

### *3.6.1 Representação digital do relevo*

A representação digital do relevo é realizada a partir de bases de dados topográficas digitais. Estas bases podem ser disponibilizadas em forma de pontos cotados distribuídos no terreno, ou em forma de curvas de nível, isolinhas de altitude. A forma em que estes dados são digitalizados depende de como estão dispostos, como exemplo, as cartas topográficas demonstram as informações por meio das curvas de nível (isolinhas) e pelos pontos cotados ao longo do terreno, onde a cota altimétrica é inferior à equidistância das curvas de nível. A partir do momento em que estas informações estão inseridas em meio digital, atendendo as premissas de digitalização de dados cartográficos, pode-se afirmar que trata-se de uma base topográfica digital.

A representação citada torna-se útil em momentos em que a análise necessita demonstrar o relevo de forma gráfica, sem a extração de informações mais

complexas sobre os dados topográficos. Deve-se salientar que o relevo é apresentado em intervalos discretos, uma vez que não há informações entre as curvas de nível e também destas para os pontos cotados.

Os modelos digitais de terreno atribuem aos SIGs a funcionalidade da extração, tratamento e representação do relevo de forma sistêmica, onde o software consegue gerar dados e realizar análises mais complexas.

Felgueiras (2001), distingue três fases na confecção do MDE, sendo a primeira a aquisição dos dados amostragem), seguida pela escolha do modelo matemático a ser utilizado para a representação (modelagem) e por último a elaboração dos produtos finais (aplicações).

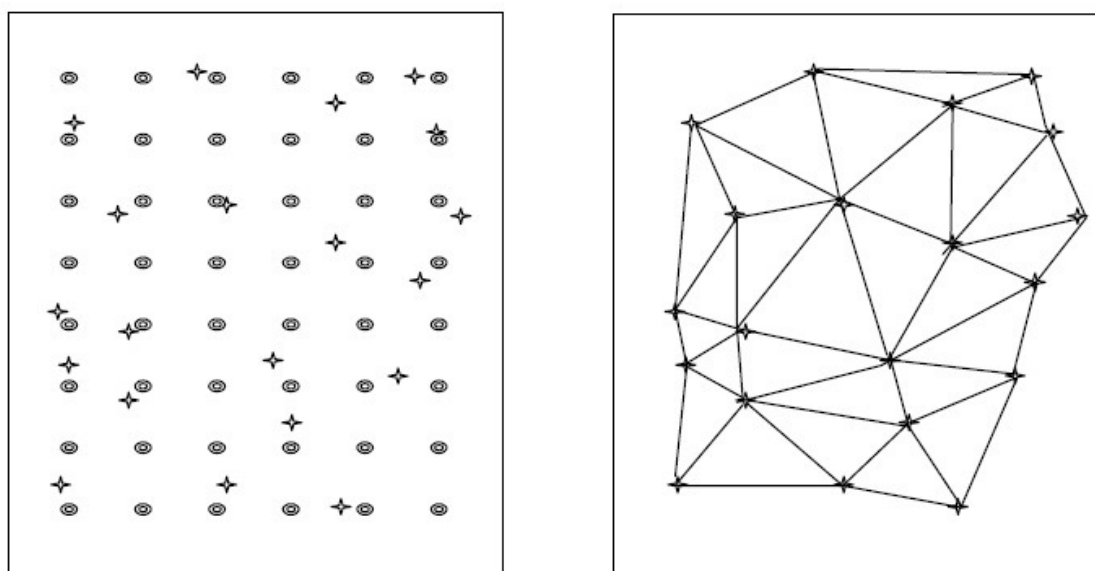
No Brasil, a principal fonte de dados topográficos para geração de MDE de bacias hidrográficas são as cartas topográficas do mapeamento sistemático nacional elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística a partir de levantamentos aerofotogramétricos datados do final da década de 60 e início da década de 70. As bases planialtimétricas foram restituídas ou digitalizadas de cartas topográficas existentes em papel, em diversas escalas, as maiores são 1:25.000 e 1:50.000, cujas equidistâncias das curvas de nível são, respectivamente, 10m e 20m.

Estes dados também podem ser adquiridos por sensoriamento remoto, porém, esta prática ainda é pouco realizada em estudos de maiores escalas devido ao alto custo, sendo aplicadas em estudos de menor escala, onde imagens de sensores orbitais são encontradas gratuitamente com resolução espacial adequada, a exemplo do *Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*. Quando estes dados são gerados, a malha amostral deve ser definida com base no comportamento do fenômeno que está sendo representado. Wu et al. (2007) avaliam os efeitos da resolução espacial destes modelos na performance de simulações de escoamento superficial em bacias hidrográficas.

A etapa de modelagem requer um conhecimento técnico sobre os interpoladores a serem utilizados. Deve-se considerar a distribuição espacial dos dados disponíveis para a escolha do melhor algoritmo a ser aplicado, buscando manter a fidelidade na representação do relevo. Dados topográficos gerados a partir de levantamento em campo ou aerofotogramétrico não tem, normalmente, distribuição espacial uniforme, sendo o modelo de representação adequado o de

grade irregular triangular, também conhecido pela sigla na língua inglesa *TIN* (*Triangular Irregular Network*). Já aqueles dados levantados em campo por malhas ou obtidos a partir de imagens de radar, onde cada *pixel* da imagem agrega valor altimétrico e distribuição uniforme, tem sua representação mais fidedigna como a grade regular retangular (Figura 4).

Figura 4 – Distribuição de pontos de grade regular (a esquerda) e pontos amostrais irregulares (a direita).



⊙ Ponto da grade      ✦ Ponto amostral

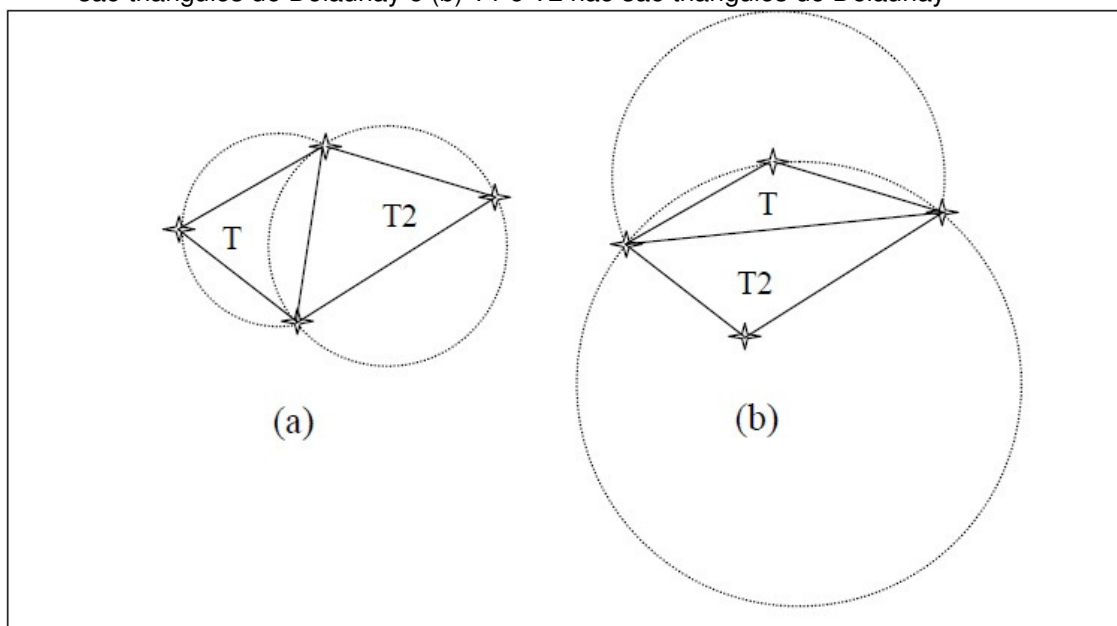
Fonte: adaptado de Felgueiras, 2001.

Os modelos ditos regulares, segundo Ferraz et al. (1999), são uma representação matemática da distribuição espacial das cotas altimétricas da área em estudo, como qualquer MDE, porém, a superfície gerada é representada por uma matriz com valores que demonstram a variabilidade da altitude do terreno. Para estes modelos, Filgueiras (2001) descreve diversos métodos estatísticos, como regressão polinomial, média móvel e suas variações (vizinho mais próximo, média simples, média ponderada, média ponderada por quadrante, média ponderada por quadrante e cota). O mesmo autor detalha os ajustes aplicados a estes modelos por interpoladores bilinear e bicúbico.

O modelo de grade irregular triangular TIN é definido por VEIUX (2004) como uma rede que representa a superfície como um conjunto de facetas triangulares não sobrepostas de tamanho e formas irregulares. Este tipo de modelo é gerado através de uma função de triangulação. Atualmente, os sistemas de informação geográfica

utilizam a função de triangulação de *Delaunay*, matematicamente descrita como a maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo, ou seja, o resultado final visa conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos (Figura 5). Maidment (2002) complementa que, após a triangulação, os vértices dos triângulos mantem seus valores originais de localização e cota altimétrica.

Figura 5 - Critério do circuncírculo para geração de triangulações de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay



Fonte: adaptado de Filgueiras, 2001.

Os modelos de grade irregular triangular podem utilizar de feições denominadas linhas de quebra para a sua geração. As linhas de quebra, conforme Maidment (2002), são feições lineares que representam elementos naturais do terreno, como córregos, cumes, ou até mesmo estruturas antrópicas como estradas. Estas feições são utilizadas como auxiliares no processamento da triangulação, podendo aumentar a fidelidade de representação do terreno.

É possível gerar um modelo regular a partir de informações não distribuídas regularmente no terreno com utilização de interpoladores. Alguns interpoladores são de ampla utilização como os que utilizam a média ponderada, conhecidos como vizinho natural, quando fazem a interpolação da média ponderada dos pontos vizinhos, onde os pesos são proporcionais às áreas proporcionais, e apenas de média ponderada quando utiliza a distancia euclidiana para atribuição dos dados altimétricos. O interpolador vizinho mais próximo atribui um valor altimétrico do ponto mais próximo de cada nó e o de média simples realiza a média aritmética dos

vizinhos da célula para atribuir o seu valor. Igualmente, o modelo TIN é passível de ser transformado em modelo regular no formato *raster*. Para esta transformação é necessária a definição dos parâmetros que descrevem o *raster*, como referência geográfica, resoluções espacial e tamanho da grade em número de linhas e colunas. Utilizando os valores das cotas dos vértices de cada triângulo, bem como dos vértices de seus triângulos vizinhos, é possível estimar o valor de cota do ponto da grade regular. Essa estimativa pode ser feita por interpolação linear ou uma interpolação polinomial de grau maior do que 1, uma vez que o três vértices de um triângulo definem um plano. Utilizando de metodologia análoga à de geração dos modelos regulares, para se ajustar superfícies não lineares para cada triângulo deve-se utilizar os vértices do triângulo e dos seus vizinhos (Câmara e Medeiros, 1998).

A transformação de um modelo de grade triangular em regular significa perda das informações primárias, assim deve ser implementada quando um modelo em formato *raster* é imprescindível na metodologia, como no caso de extrações de informações hidrológicas como direção de escoamento, que necessita de um modelo regular para realizar a interpretação do fluxo preferencial da água de acordo com as diferenças altimétricas da área em estudo.

A última fase de geração dos MDEs, focada nas aplicações, se refere aos procedimentos de análise, podendo ser de caráter qualitativo, diante da visualização do modelo, e quantitativo, quando realizados os cálculos de volumes e geração de mapas de declividades, dentre outras informações que são extraídas destes modelos (Felgueiras, 2001).

Tabela 6 – Tabela de comparação entre os tipos de modelos digitais de elevação

<i>Grade Regular Retangular</i>	<i>Grade Irregular Triangular</i>
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre os triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas e para análises multiníveis no formato “raster”	Mais utilizado em aplicações quantitativas.

Fonte: Câmara e Medeiros, 1998.

### 3.6.2 Parâmetros hidrológicos originados por Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes - MDEHC

Ko & Cheng (2004, apud Cheng et al. 2005), destacam que o tempo do escoamento superficial durante uma precipitação depende das propriedades físicas da rede de drenagem e do sistema de fluxo, caracterizados em diversos modelos a partir de modelos digitais de elevação.

A direção de escoamento de uma bacia hidrográfica é estabelecida em modelos digitais de elevação por meio do algoritmo denominado *Determinisc 8* (D8) em função de considerar a movimentação da água em 8 direções possíveis. Para esta identificação, o MDE em formato *raster* é codificado de acordo com a análise da altimetria dos pixels, sendo o fluxo direcionado para os pixels de menor valor, conforme Equação 11).

Equação 11 – Cálculo do método D8

$$\Delta D = \frac{\Delta h}{d}$$

Onde:

$\Delta h = \text{diferença altimétrica}$

$\Delta D = \text{descida mais íngreme}$

$d = \text{distância}$

Os valores codificados no *raster* de direção do fluxo, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128, aumentam de acordo com a alteração da direção em sentido horário, utilizando oito pontos cardeais como referência, tendo como ponto de partida o menor valor voltado para leste e finalizando com o maior valor voltado para nordeste, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Aplicação do algoritmo para definição da direção de escoamento



Fonte: adaptado de Santos, 2007.

Para a geração da rede de drenagem também são utilizados algoritmos para interpretação de fluxo acumulado da rede de drenagem e, a partir da informação sobre a direção do fluxo é feita a identificação dos talwegues dos cursos d'água.

A delimitação dos limites das bacias hidrográficas em ambiente SIG é realizada a partir da interpretação da direção de escoamento ou fluxo no arquivo MDE raster. O software "varre" o *raster* gerado com a codificação da direção do fluxo e ao final, de acordo com os interflúvios identificados, define as áreas das bacias hidrográficas contidas no *raster* de referência. O usuário também possui a opção de indicar o exutório ao qual deseja saber a área de drenagem. O funcionamento deste algoritmo demonstra-se bastante eficaz e confiável, porém, deve-se salientar que seu desempenho depende integralmente da consistência dos dados altimétricos.

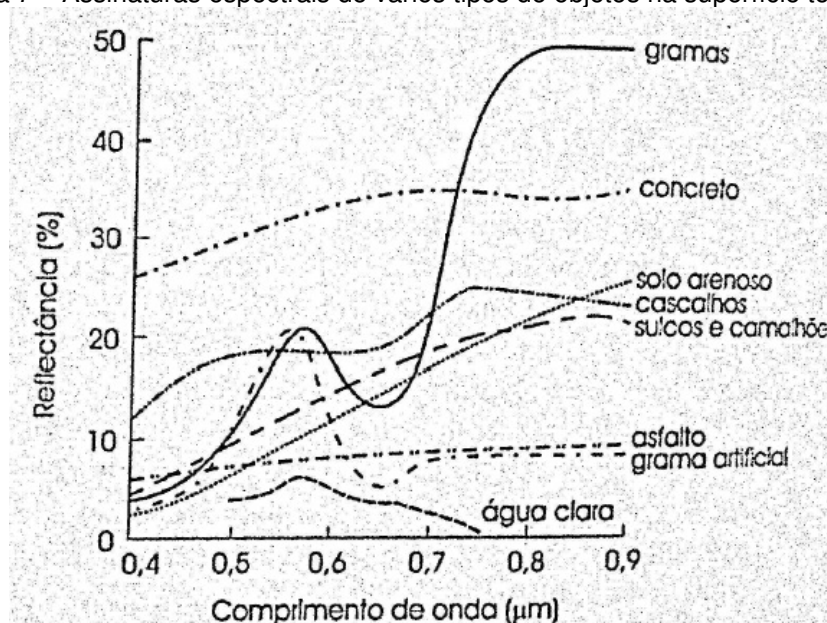
### 3.7 Uso e ocupação do solo por Sensoriamento Remoto

Como já introduzido, na modelagem hidrológica é essencial o conhecimento do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica, uma vez que este elemento afeta diretamente a distribuição do escoamento superficial no tempo. O sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta muito eficiente nesse sentido por se tratar de uma tecnologia que visa fornecer a aquisição de informações sobre a superfície terrestre sem a necessidade do levantamento primário, *in loco*, da região que se deseja

conhecer. Baseia-se nos princípios de propagação de energia a partir de uma fonte, no caso a superfície terrestre, conforme as formulações de Maxwell, físico e matemático britânico do século XIX.

Resumidamente, a energia eletromagnética é parcialmente absorvida pela matéria de acordo com sua composição físico-química, sendo retornada e passível de ser captada por sensores. A quantidade de energia absorvida ou retornada representa a assinatura espectral do elemento (Figura 7), ou seja, o valor dentro da faixa do espectro eletromagnético que este elemento representa.

Figura 7 – Assinaturas espectrais de vários tipos de objetos na superfície terrestre



Fonte: Liu, 2007.

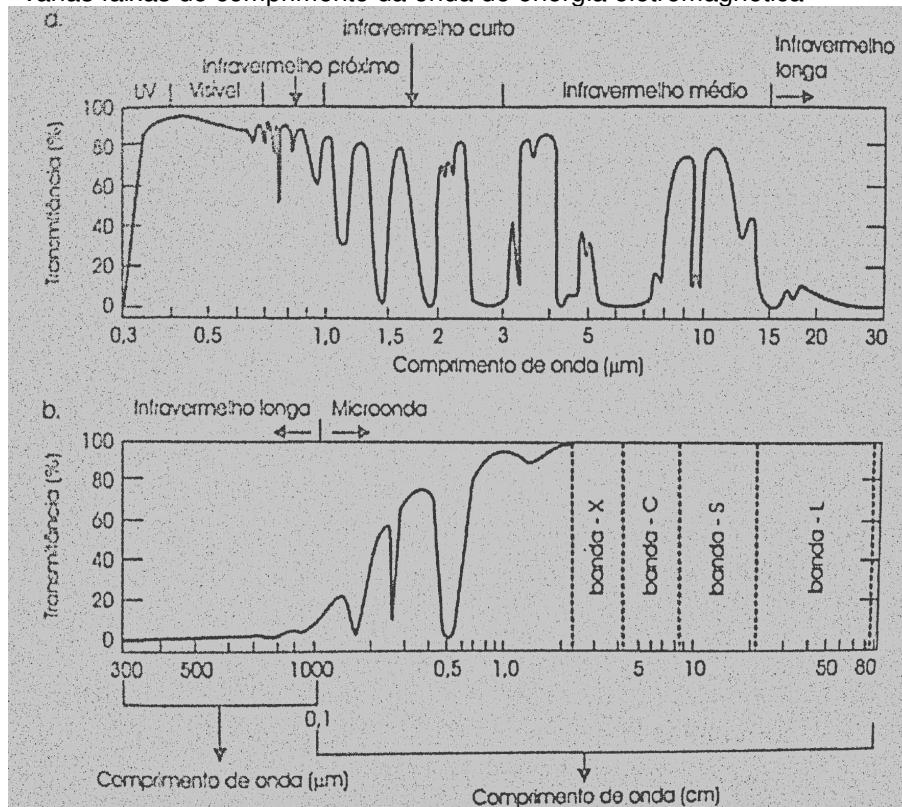
Sendo o sol a principal fonte de energia eletromagnética, a superfície terrestre pode ser conhecida por meio do sensoriamento remoto pela interpretação da energia retornada pela superfície, registrada em imagens, possibilitando a diferenciação e identificação dos elementos.

A partir desta compreensão, o sensoriamento pode ser detalhado, segundo Novo (1989), como a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos de processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc., visando estudar o ambiente terrestre pelo registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra.

As imagens de satélite registram a energia eletromagnética nas denominadas bandas espectrais (Figura 8), que são o registro de determinados intervalos do espectro eletromagnético. Desta forma, cada banda espectral tem a característica de

identificar certos tipos de elementos na superfície, de acordo com a sensibilidade espectral destes elementos na faixa do espectro representada. Uma imagem de satélite pode ser composta por várias bandas espectrais.

Figura 8 – Porcentagens de transmitância da radiação solar na camada atmosférica nas várias faixas de comprimento da onda de energia eletromagnética



Fonte: Liu, 2007

As imagens são adquiridas por diferentes sensores, que por sua vez possuem valores distintos no que diz respeito à resolução espectral, espacial e radiométrica. O intervalo, ou amplitude do espectro eletromagnético dividido entre as bandas espectrais define a resolução espectral, quanto maior esta resolução menor a capacidade do sensor em registrar pequenas variações no comportamento espectral dos elementos. A relação entre a amplitude do sensor e de suas bandas espectrais são fatores determinantes para a avaliação da capacidade de resposta da imagem de satélite.

A resolução espacial diz respeito à capacidade de distinguir visualmente os objetos identificados nas imagens de satélite, ou seja, o menor valor de área (*pixel*<sup>3</sup>) captado pelo sensor orbital. Este valor define a capacidade do usuário de interpretar as imagens de satélite pois, quanto menor o seu valor, melhor será a visualização da imagem em relação à visão humana.

A resolução radiométrica diz respeito à quantidade de níveis de cinza que são representados em cada banda espectral. Este valor também é essencial para a identificação dos elementos pois, quanto maior a quantidade de níveis de cinza, maior será a distribuição destes níveis para a identificação dos elementos contidos nas imagens.

Por fim, dependendo da análise dos elementos supracitados, as imagens podem ser classificadas, sendo cada classe representativa de elementos que a compõem, utilizando de algoritmos e técnicas específicas.

### 3.7.1 *Classificação de imagens de satélite*

A classificação de imagens de satélite pode ser realizada para cada banda espectral, bem como para várias bandas, sendo neste último caso denominadas multiespectrais.

As técnicas de classificação de imagens multiespectrais se divididas basicamente em duas, supervisionada e a não supervisionada. Ambas visam que um conjunto de *pixels* das imagens sejam atribuídos a uma determinada classe, quando combinadas a classificação pode ser entendida como híbrida.

Nas classificações supervisionadas, o usuário fornece para o computador informações de referência para o processo de classificação, ou seja, amostras das classes que se deseja identificar na imagem, que são adquiridas por conhecimento prévio da área em estudo ou por interpretação da imagem por parâmetros como forma, cor e textura. Estas informações representam o comportamento espectral dos elementos desejados, depois de inseridas, servem para a automatização do processo em toda a extensão da imagem.

Neste tipo de classificação, as análises empregadas utilizam de algoritmos estatísticos, dentre eles alguns são de ampla utilização, tais como; Análise de

---

<sup>3</sup> Uma imagem digital é composta por vários *pixels*. Um pixel pode ser entendido como a menor área capaz de ser atribuída uma cor em uma imagem digital.

Componentes Principais, Máxima Verossimilhança, Krigagem, Modelo de Mistura Linear e Redes Neurais Artificiais (Liu, 2007).

A classificação não supervisionada deixa a cargo do software identificar os padrões de comportamento na imagem. Neste processo o usuário fornece limiares de tolerância para que os padrões sejam definidos, desta forma, o software é capaz de analisar estatisticamente todas as respostas espectrais contidas na imagem, expressas em níveis de cinza, e definir a semelhança entre elas. Os algoritmos de ampla utilização neste método são fundamentados na técnica estatística de análise de cluster, que visa agrupar combinações de variáveis de forma homogênea.

A análise sobre o método a ser utilizado exige do usuário uma avaliação sobre o tempo desejado para o processamento, o nível de conhecimento sobre a área de estudo e a disponibilidade de imagens orbitais adequadas ao objetivo pretendido, principal fator limitante de aplicações.

#### **4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo foi definida em função da necessidade de se ter dados comparativos para avaliação da metodologia proposta. Assim, foi solicitado ao Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DER MG, órgão responsável pelos estudos hidrológicos voltados para o dimensionamento de estruturas de drenagem em Minas Gerais, a disponibilização de dados de um estudo cujas informações da bacia tenham sido obtidas por metodologia tradicional, levantamento de campo e técnicas manuais

O projeto fornecido foi para o dimensionamento de uma ponte no Rio Jacaré, localizado no sul do Estado de Minas Gerais (Figura 9). A bacia hidrográfica do rio Jacaré até o ponto onde a ponte foi implantada abrange os municípios de Campo Belo, Candeias, Santana do Jacaré, São Tiago, Bom Sucesso, Santo Antônio do Amparo, Oliveira, São Francisco de Paula, Camacho e Carmo da Mata, totalizando, considerando a localização da ponte como exutório, uma área de 1.603,9 km<sup>2</sup>. O gradiente altimétrico da bacia é de aproximadamente 530 metros, variando entre as cotas de 800 e 1.340 metros. A Figura 9 apresenta a localização da bacia hidrográfica.

As sedes municipais de Santana do Jacaré e São Francisco de Paula e Oliveira estão localizadas dentro da área de estudo, o que atribui à bacia algumas características urbanas, ainda que estes municípios sejam predominantemente rurais.

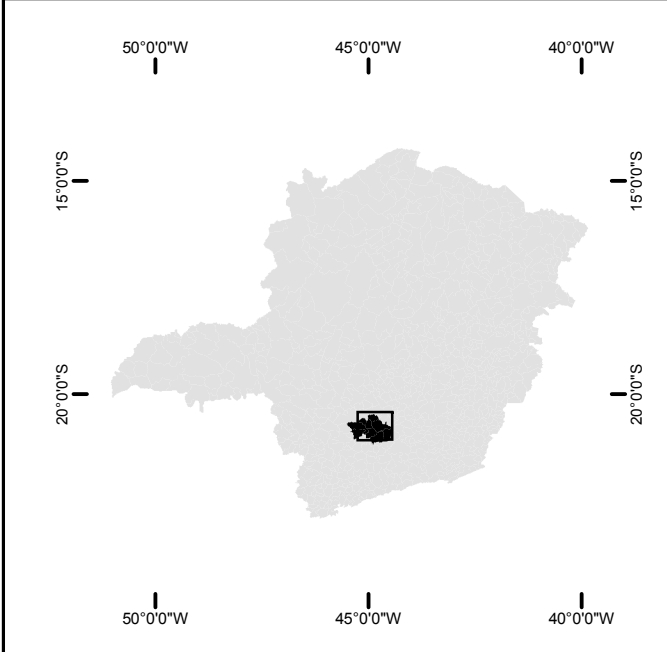
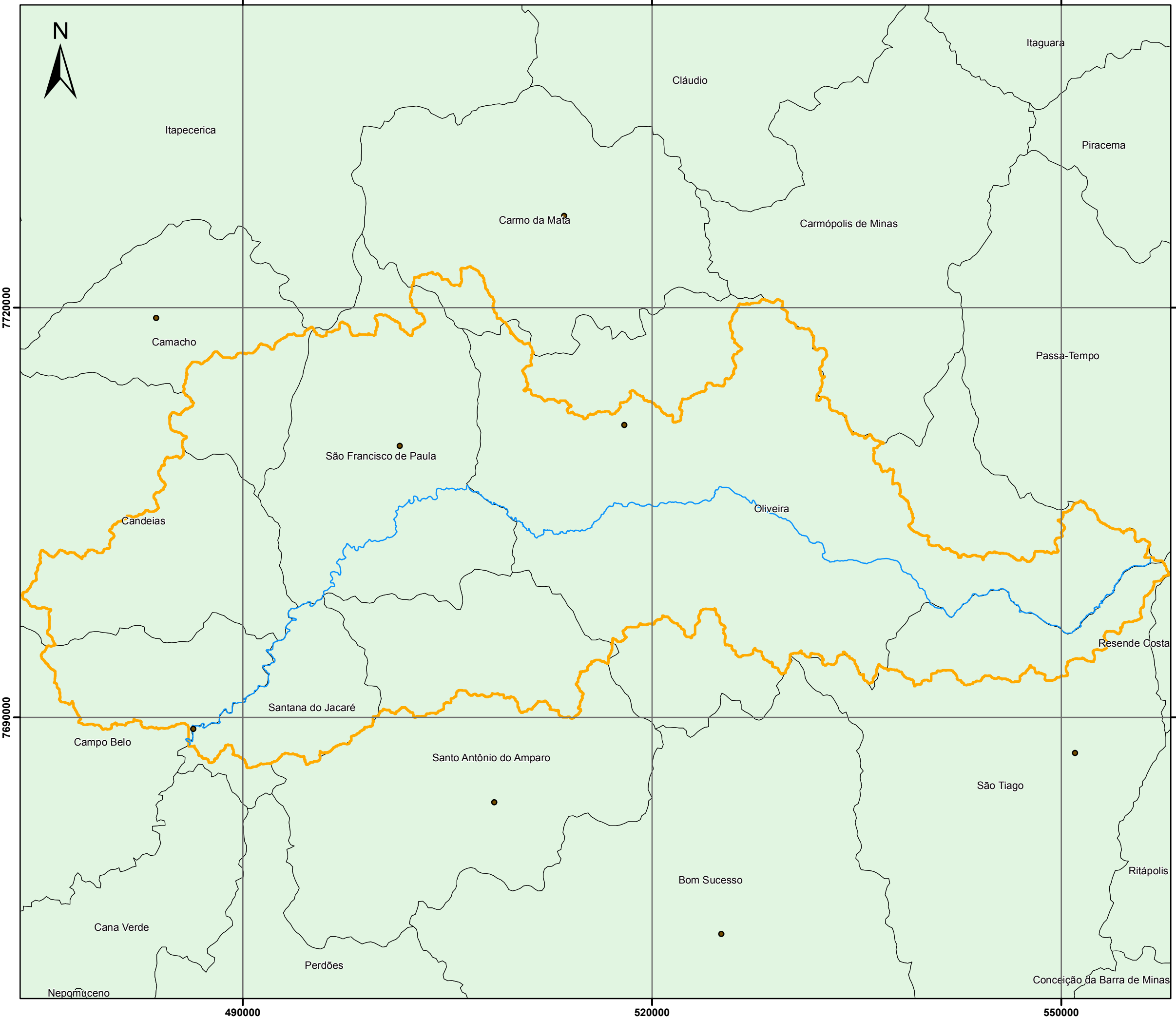
A área da bacia apresenta uso do solo predominantemente de pastagens, seguido por campo sujo, silvicultura, cultivos agrícolas, solo exposto, áreas urbanas e fragmentos florestais. Segundo o mapa de biomas do IBGE (2004), a bacia hidrográfica está localizada em área do bioma de mata atlântica, porém, devido a escala deste dado (1:5.000.000) e da proximidade da área com porções do bioma cerrado, é possível afirmar que trata-se de área de transição (Figura 10).

De acordo com a classificação climática de Wladimir Köppen (1936), o domínio climático que se encontra inserido o município de Santana do Jacaré é do tipo Cwa, ou seja, mesotérmico úmido e semiúmido (quente, inverno seco, verão quente), com quatro a cinco meses quentes.

De acordo com o mapa de solos do Estado de Minas Gerais (UFV, 2010), a região onde está inserida a bacia hidrográfica do rio Jacaré apresenta os seguintes

tipos de solo: cambissolo háplico, latossolo vermelho-amarelo, argissolo vermelho-amarelo, latossolo vermelho, nitossolo, e neossolo (Figura 11). A escala desta base é de 1:600.000.

Figura 9 – Mapa de localização da bacia do rio Jacaré

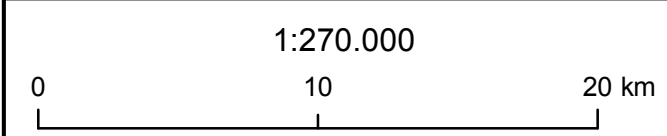


Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Mapa de Localização

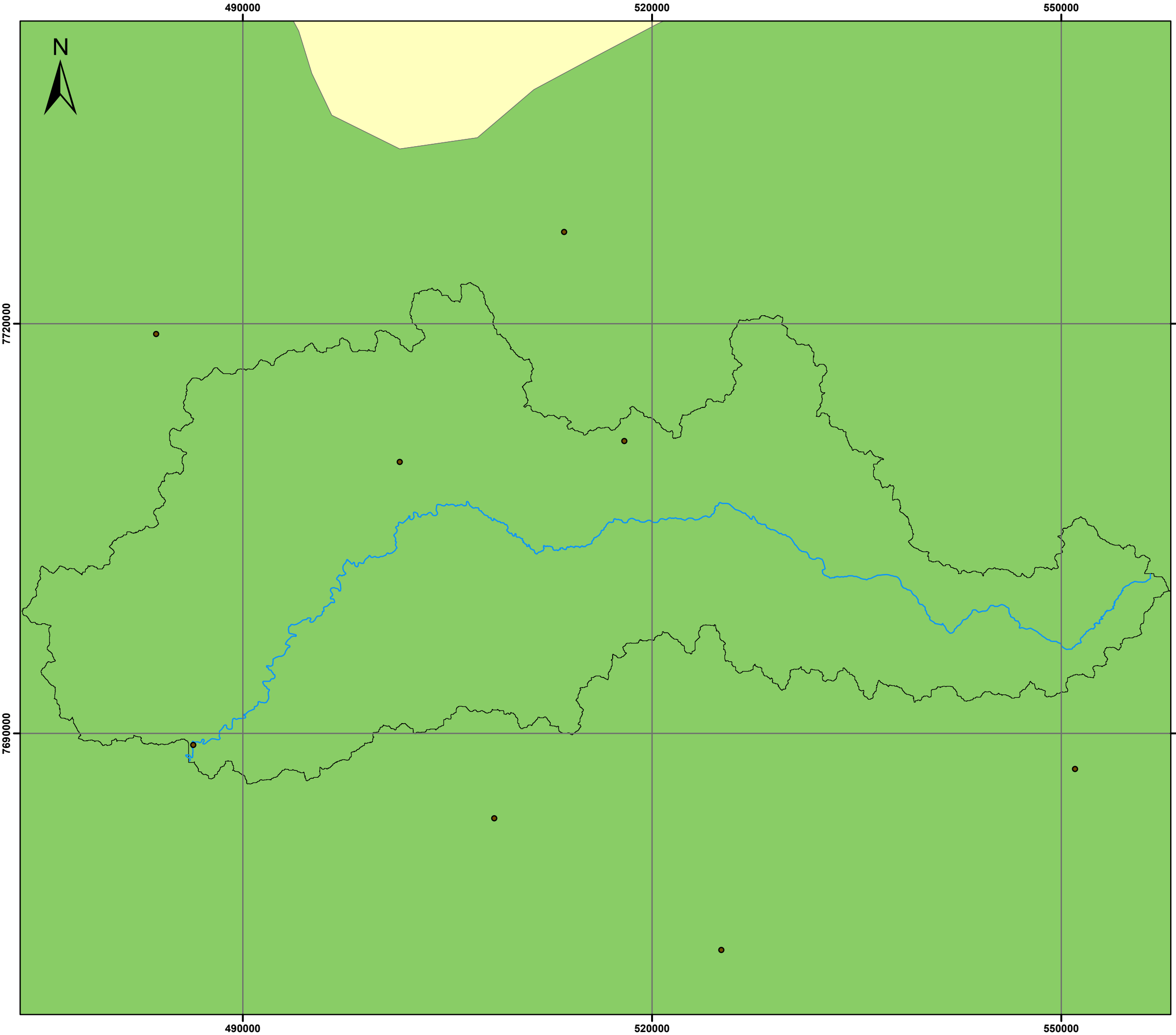


- Legenda:**
- Sede municipal
  - Rio Jacaré
  - Bacia hidrográfica - Rio Jacaré
  - Limites municipais

Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas.  
Limite da bacia e extensão do talvegue mapeados conforme metodologia da pesquisa.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

Figura 10 – Mapa de Biomas (IBGE, 2012)

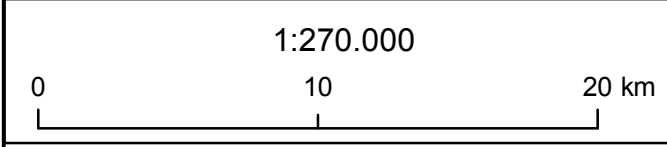


Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Mapa de Biomas

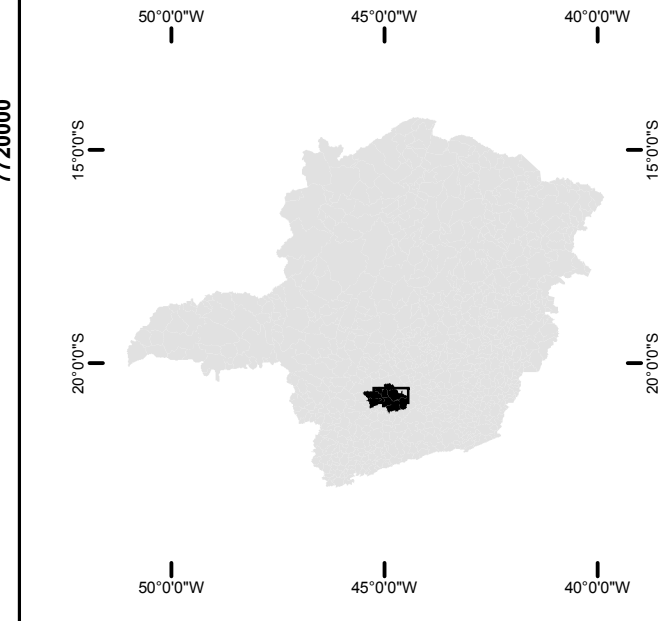
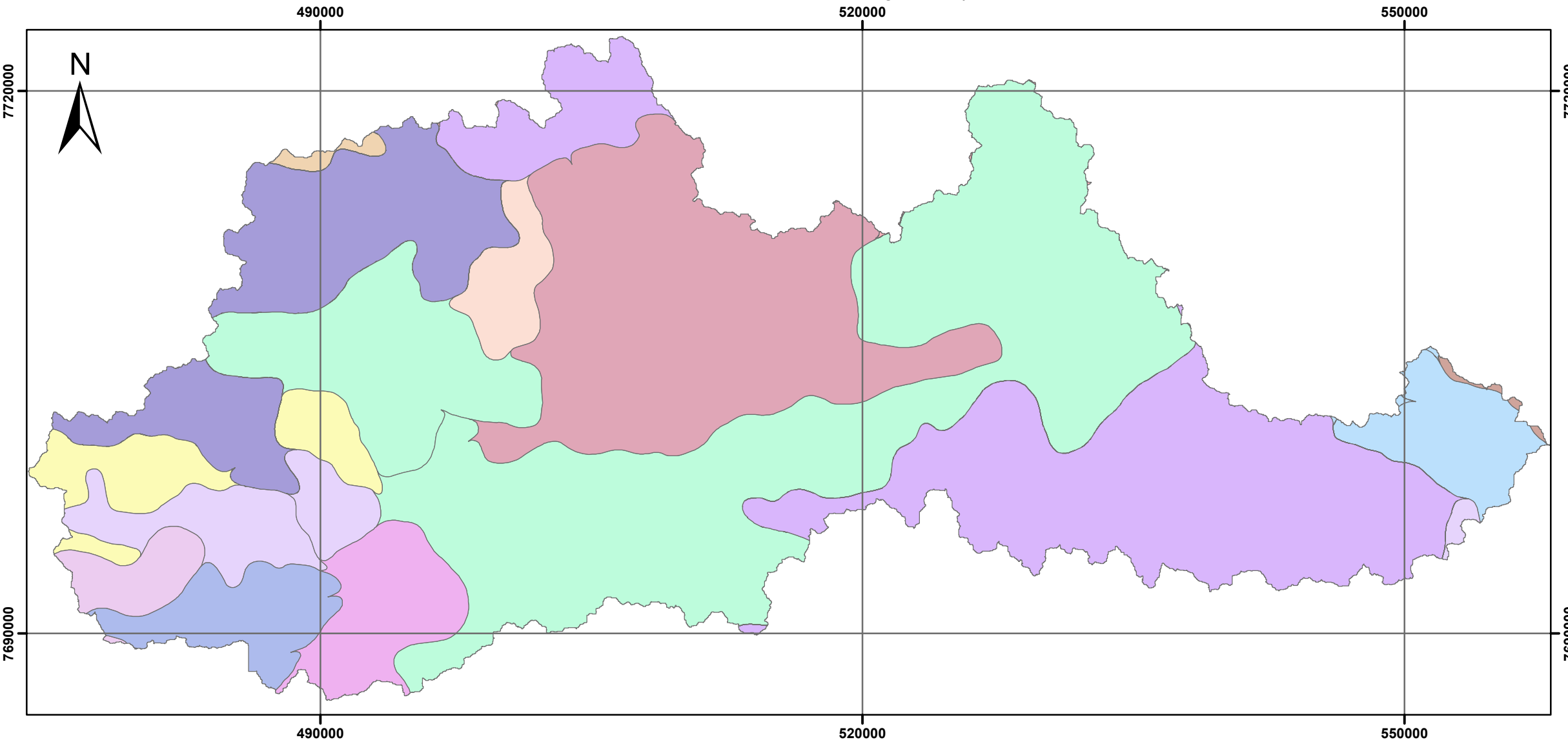


- Sede municipal
  - Rio Jacaré
  - Bacia hidrográfica - Rio Jacaré
- Biomas**
- Cerrado
  - Mata Atlântica

Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas.  
Limite da bacia e extensão do talvegue mapeados conforme metodologia da pesquisa.  
Mapa de Biomas do Brasil - Primeira Aproximação - escala 1:5.000.000, IBGE, 2004.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

Figura 11—Mapa de solos da área de estudo



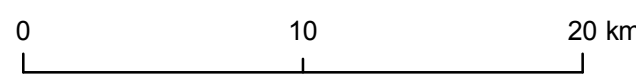
Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

**Mapa de Solos**

1:270.000



Tipos de solos	
	CXbd1
	CXbd7
	CXbe5
	LVAd1
	LVAd15
	LVAd21
	LVAd6
	LVd4
	NXd1
	PVAd9
	PVAe4
	PVd1
	RLd6
	PVAd8

Classificação SCS	Tipo de Solo*	Classificação SCS	Tipo de Solo*
CXbd1	CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco Af raco/mod er ad b t et ura argil oa; fase caatrga li pøxer çfil a rdevo f ort e ondul ad o	NXd1	NITOSSOLO HÁPLICO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa; ambos fase fr est a aduci fd i a rdevo p lano e suave ondul ad o
CXbd7	CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco Af raco/mod er ad b t et ura argil oa, cascalhento/não cascalhento + LATOSSOLO VERMELHO distrófico A no der ado textura argilosa; ambos fase caatrga li pøxer çfil a rdevo ondul ad e f ort e ondul ad o	PVAd10	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argilosa + NITOSSOLO VERMELHO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa; todos fase caatrga li pøxer çfil a e f lora ta sub aduci fd i a, rdevo ondul ad o e montanhoso
CXbe5	CAMBISSOLO HÁPLICO eutrófico píco A mæl er ad b /cher noz êni c o t et ura média/argilosa, cascalhento/não cascalhento + NEOSSOLO LITÓLICO eutrófico típo e dher ros s d i o A no der ado, pedregoso; ambos fase fr est a aduci fd i a relevo forte ondul ad o e montanhoso.	PVAd8	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A moderado textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco A moderado textura siltosa/argilosa; todos fase fr est a sub aduci fd i a rdevo ondul ad o e forte ondul ad o
LVAd1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argilosa; fase cerrado, relevo plano e suave ondul ad o	PVAd9	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura média/argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco A siltosa/argilosa + AFLORAMENTO ROCHOSO; todos fase fr est a sub per eni fd i a relevo forte ondul ad o.
LVAd15	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura média/argilosa; ambos fase fr est a sub per eni fd i a rdevo suave ondul ad o e ondul ad o e forte ondul ad o	PVAe4	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico píco A mæl er ad b t et ura média/argilosa, cascalhento; fase fr est a sub per eni fd i a rdevo forte ondul ad o e montanhoso.
LVAd21	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa + LATOSSOLO VERMELHO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco A mæl er ad b t et ura siltosa/argil oa, pedregoso/não pedregoso; todos fase cerrado, relevo plano e suave ondul ad o e ondul ad o.	PVd1	ARGISSOLO VERMELHO distrófico píco A mæl er ad b /f raco t et ura ní i a / argilosa; fase fr est a sub per eni fd i a rdevo forte ondul ad o
LVAd6	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico píco t et ura argil oa emi to argilosa (60%) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico lat os s d i o t et ura ní i a e argilosa (40%), ambos A moderado relevo forte ondul ad o e montanhoso	RLd6	NEOSSOLO LITÓLICO distrófico píco Af raco/mod er ad b + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico píco e l é c o t et ura siltosa/argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico píco A mæl er ad b t et ura ní i a / argil oa; todos fase cerrado, relevo suave ondul ad o e ondul ad o e forte ondul ad o
LVd4	LATOSSOLO VERMELHO distrófico píco A mæl er ad b t et ura argil oa + LATOSSOLO VERMELHO distroférrico típo A no der ado t et ura argil oa; ambos fase cerrado, relevo plano e suave ondul ad o		

Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas.  
Limite da bacia e extensão do talvegue mapeados conforme metodologia da pesquisa.  
Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais. UFV, 2010.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

#### 4.1 Estudo hidrológico da Ponte sobre o Rio Jacaré

Para cumprir o objetivo desta pesquisa, foi disponibilizado pelo Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais – DER-MG, o estudo hidrológico para dimensionamento da ponte sobre o rio Jacaré julgado pelo órgão de boa resposta à realidade, e realizado de forma convencional, prática atual da engenharia rodoviária, seguindo as orientações do órgão para a aplicação do modelo.

O estudo foi realizado por consultoria especializada em projetos rodoviários, incluindo implantação de estruturas de drenagem, que exigem a elaboração de estudos hidrológicos. Estes estudos são elaborados de acordo com a metodologia científica indicada pelo órgão regulador já demonstrada no item 3.4.

Para a obtenção das medidas de área da bacia hidrográfica, comprimento do talvegue e declividade efetiva, o projetista utilizou do software AutoCad, realizando o georreferenciamento e a interpretação com base em cartas topográficas na escala de 1:250.000, folhas Furnas (SF-23-V-B) e Divinópolis (SF-23-X-A).

O valor do parâmetro CN foi obtido inicialmente por levantamento expedito de campo e posteriormente ajustado após a aplicação da equação da continuidade (Equação 12), de acordo com a observação da marca da cheia no leito do rio próximo à ponte e de relatos de moradores da região sobre a altura da cheia.

Equação 12 – Equação da continuidade para movimento uniforme em canais

$$V = \frac{1}{n} \times R_h^{\frac{2}{3}} \times i f^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = V \times A$$

Onde:

Q = vazão em (m<sup>3</sup>/s)

A = Área da seção molhada (m<sup>2</sup>);

n = Coeficiente de rugosidade de Manning;

V = Velocidade de escoamento ( m/s );

R = Raio hidráulico ( m ) R = A / Pm ( Pm = Perímetro molhado );

$i_f$  = Declividade do fundo ( m/m ).

A precipitação de projeto foi obtida de acordo com a equação de chuva intensa Equação 6), definida pela publicação “Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais” da Companhia de Saneamento Básico de Minas Gerais – COPASA e a Universidade de Viçosa – UFV, sendo o posto pluviográfico representativo o de Santana do Jacaré, cujos parâmetros a, b, c e d estão descritos na Tabela 7.

A vazão máxima foi obtida pela seguinte equação:

$$Q_p = \frac{(K \times A \times Q_m)}{T_p}$$

Onde:

$Q_p$  = Vazão máxima

$K$  = Constante empírica

$A$  = Área da bacia hidrográfica

$Q_m$  = escoamento superficial

$T_p$  = Tempo de pico

Tabela 7 – Tabela de cálculo do modelo SCS de acordo com o estudo hidrológico da Ponto sobre o Rio Jacaré

MÉTODO RACIONAL HIDROGRAMA TRIANGULAR SINTÉTICO												
POSTO PLUVIOGRÁFICO REPRESENTATIVO		ESTADO	CONSTANTES DO POSTO				LATITUDE		LONGITUDE		SÉRIE HISTÓRICA (ANOS)	FONTES
			A	B	C	D	G °	M (´)	G °	M (´)		
Santana do Jacaré		MG	3628,1	0,171	29,525	1,011	20	54	45	07	26	ANEEL

MÉTODO HIDROGRAMA TRIANGULAR SINTÉTICO																		
ELEMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA									CÁLCULO DA VAZÃO MÁXIMA									
No BACIA	LOCALIZAÇÃO ESTACA	NOME DO CURSO D'ÁGUA	A (km <sup>2</sup> )	L (km)	d (m/m)	tc (hora)	tp (h)	CN	S	PRECIPITAÇÃO MÁXIMA P (mm)			qm (m <sup>3</sup> /s)			VAZÃO MÁXIMA Q (m <sup>3</sup> /s)		
										25	50	100	25	50	100	25	50	100
1		Rio Jacaré	1381,00	98,36	0,001	32,45	25,17	40	15,00	95,01	106,97	120,43	0,89	2,30	4,60	10,12	26,29	52,60

Fonte: DER/MG, 2011

## **5 METODOLOGIA**

A metodologia foi delineada no sentido de utilizar as técnicas de geoprocessamento consagradas para a extração dos dados de entrada do modelo SCS - CN. Foram utilizados softwares ArcGIS versão 9.3, , sendo o foco das aplicações as extensões ArcHydro, 3DAnalyst e SpatialAnalyst, e o software Spring versão 5.2.3, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e disponibilizado gratuitamente.

A extração de informações para compor o modelo se restringiu aos parâmetros físicos da bacia hidrográfica, visando manter a comparabilidade com o método utilizado para a elaboração de estudos hidrológicos desta natureza. Portanto, o modelo é aplicado por evento uma vez que a chuva de projeto deve ser considerada para o dimensionamento de obras de arte.

### **5.1 Materiais**

Os dados e bases cartográficas utilizadas neste estudo foram constituídos pelos seguintes itens:

- Base Geominas – Cartas topográficas digitalizadas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, na escala 1:50.000 contendo curvas de nível com equidistância de 20 metros, hidrografia, manchas urbanas e rodovias;
- Mapa de solos do Estado de Minas Gerais na escala 1:600.000: legenda expandida /Universidade Federal de Viçosa; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010;
- Imagens do satélite Landsat7 datada de 13/05/2007 - Composição RGB Bandas 1, 2 e 3 (visível)

### **5.2 Aquisição dos parâmetros que compõem o modelo SCS através das técnicas de geoprocessamento**

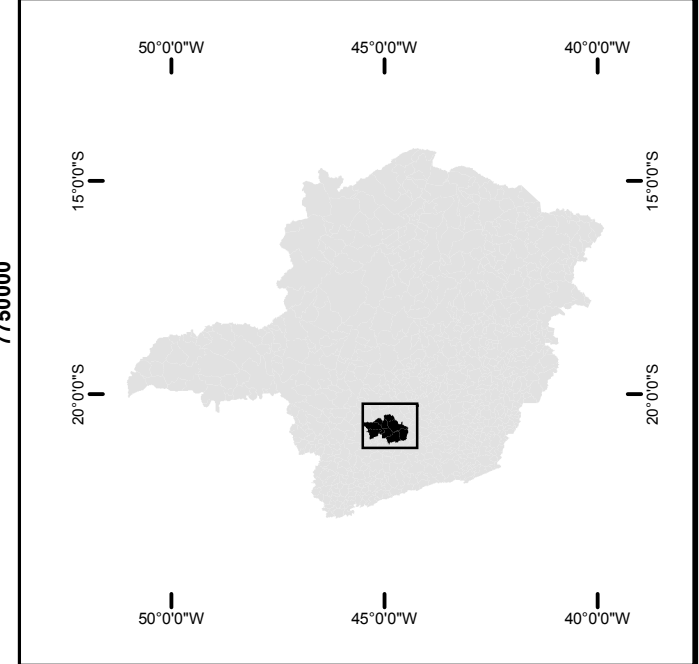
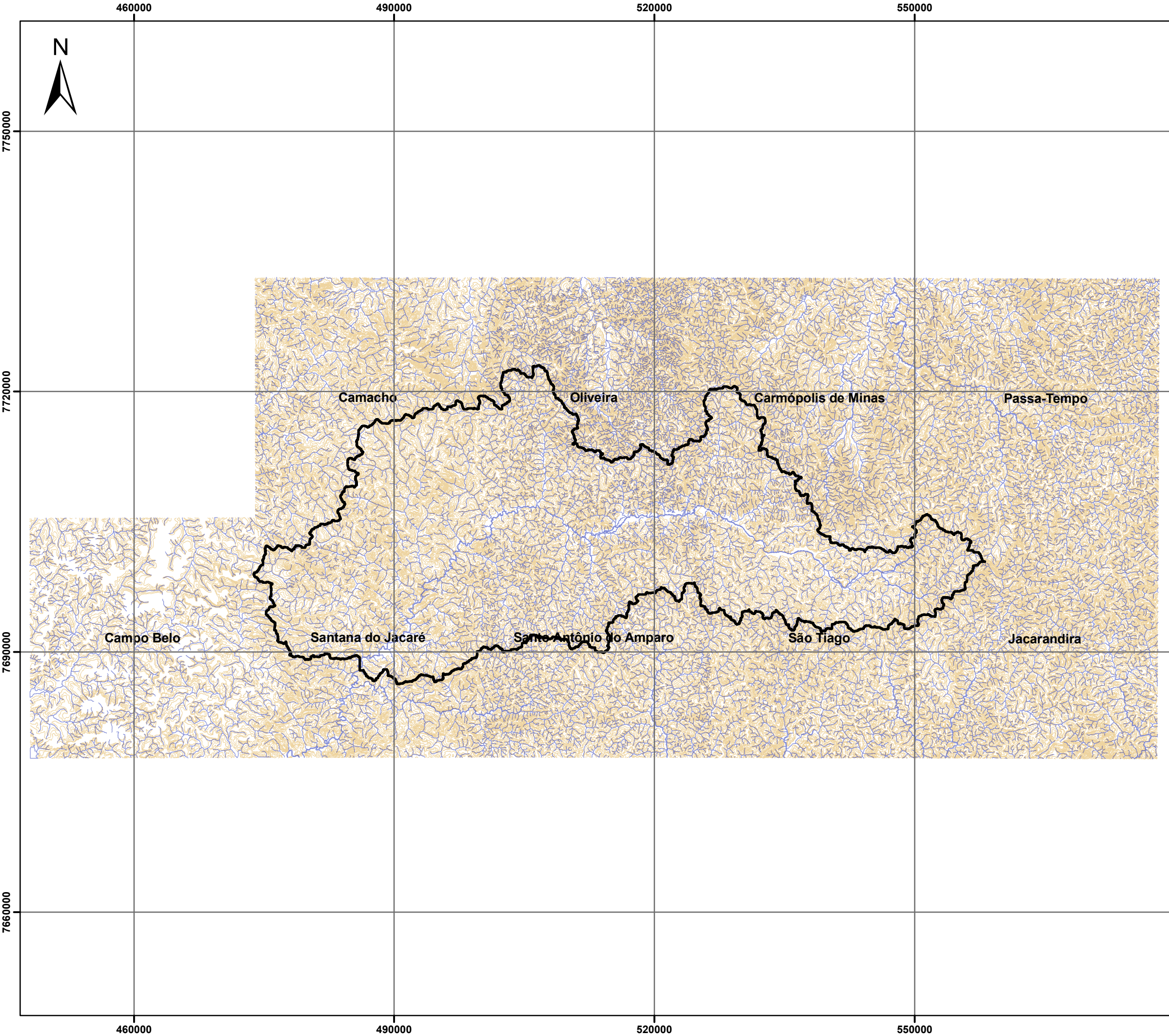
Grande parte das características físicas que irão alimentar o modelo hidrológico são provenientes da base topográfica da área de estudo. Conforme já demonstrado, a partir da topografia é possível extrair os dados de declividade, definição da bacia, do talvegue do rio. A fonte da extração destes dados é o modelo digital de elevação hidrologicamente consistente. Já para

mapeamento de uso e ocupação do solo foi usada a tecnologia do sensoriamento remoto.

#### *5.2.1 Geração do modelo digital de elevação – MDE*

O modelo digital de elevação foi gerado a partir das curvas de nível com equidistância de 20 metros das cartas topográficas do IBGE na escala de 1:50.000 digitalizadas e disponibilizadas pelo Projeto Geominas. Foram utilizadas nove cartas topográficas do Estado de Minas Gerais, a saber; Camacho, Oliveira, Carmópolis de Minas, Passa-Tempo, Campo Belo, Santana do Jacaré, Santo Antônio do Amparo, São Tiago e Jacarandira (Figura 12).

Figura 12 – Cartas topográficas utilizadas para a geração do MDE

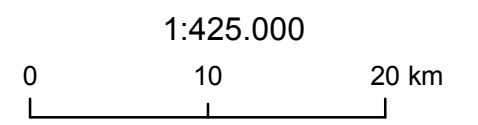





Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Cartas topográficas



-  Hidrografia
-  Curvas de nível
-  Bacia hidrográfica - Rio Jacaré

Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas, 2007.  
Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

Esta base foi interpolada através da extensão 3D Analyst do software ArcGIS 9.3, transformando-se em uma malha triangular – TIN (Figura 15), o algoritmo responsável por esta transformação utiliza a metodologia desenvolvida pelo matemático russo Boris Nikolaevich Delaunay, conhecida como triângulo de Delaunay, conforme já apresentado (Figura 5).

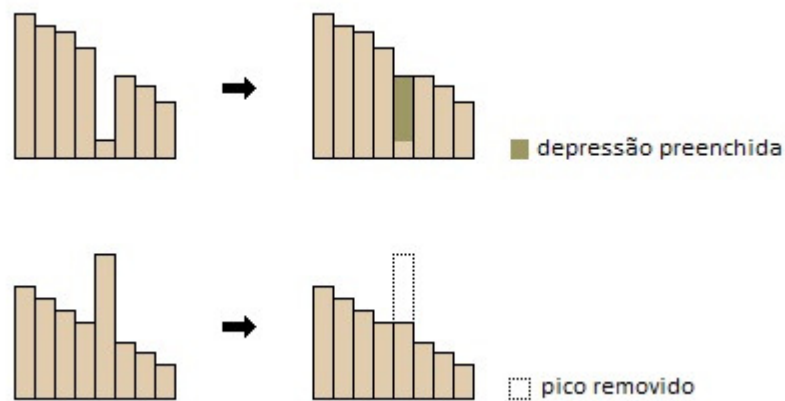
Para que o modelo digital de elevação possa passar pelos procedimentos necessários com fins de se tornar hidrologicamente consistente, o formato *TIN* deve ser transformado em formato *raster*, desta forma, a malha triangular, que é irregular, será transformada em uma malha regular, onde para cada célula é atribuído um valor de altitude. Este procedimento possibilita ao algoritmo estabelecer a direção de fluxo, uma vez que o formato triangular, por ser uma malha irregular, não possibilita a análise de vizinhança.

O modelo digital de elevação em formato *raster* foi gerado com a mesma resolução espacial da imagem do satélite Landsat7, utilizada neste estudo, portanto, foi gerada uma malha regular com resolução espacial de 30 metros (Figura 16).

Após a conversão, seguindo a metodologia para a geração do modelo digital de elevação hidrologicamente consistente, procedeu-se à aplicação do comando *Fill* da extensão *Spatial Analyst* do software ArcGIS 9.3, visando preencher as depressões e picos do modelo digital de elevação que possam ocasionar interrupções no fluxo da água.

Para o correto preenchimento, foi necessário definir o limiar desta ferramenta, de forma que ela seja aplicada em intervalos menores do que a equidistância das curvas de nível utilizadas (20 metros) para a geração do MDE, sendo assim, o preenchimento foi definido para ser realizado em diferenças de até 19 metros (Figura 13).

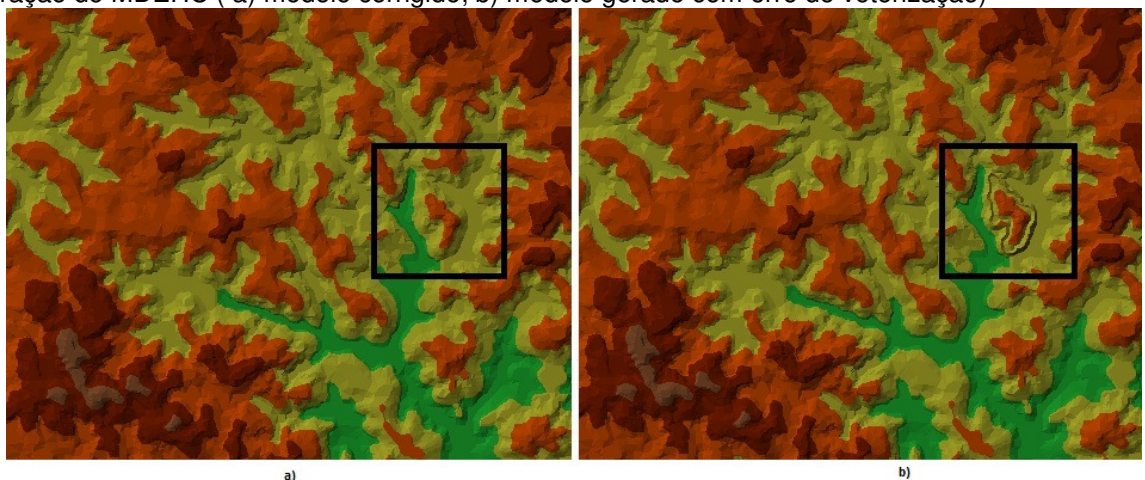
Figura 13 – Funcionamento do comando *Fill* do software ArcGIS 9.3



Fonte: adaptado de ESRI, 2008

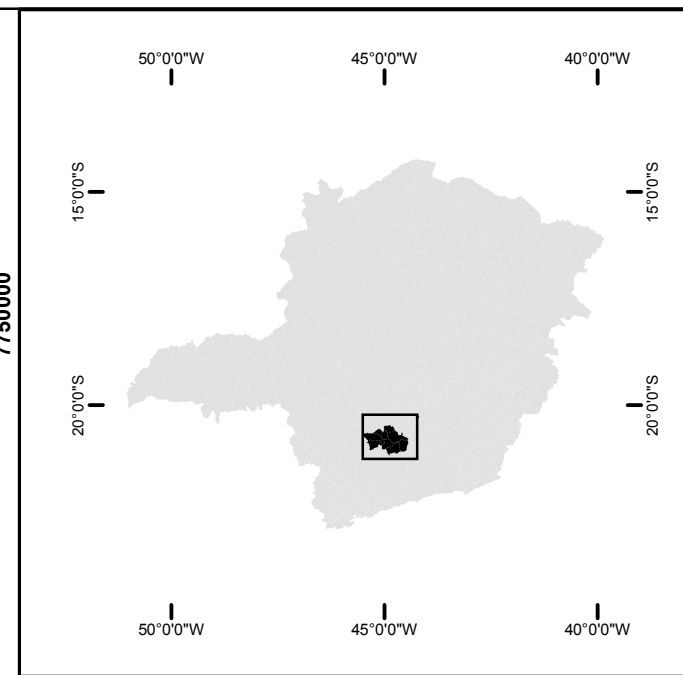
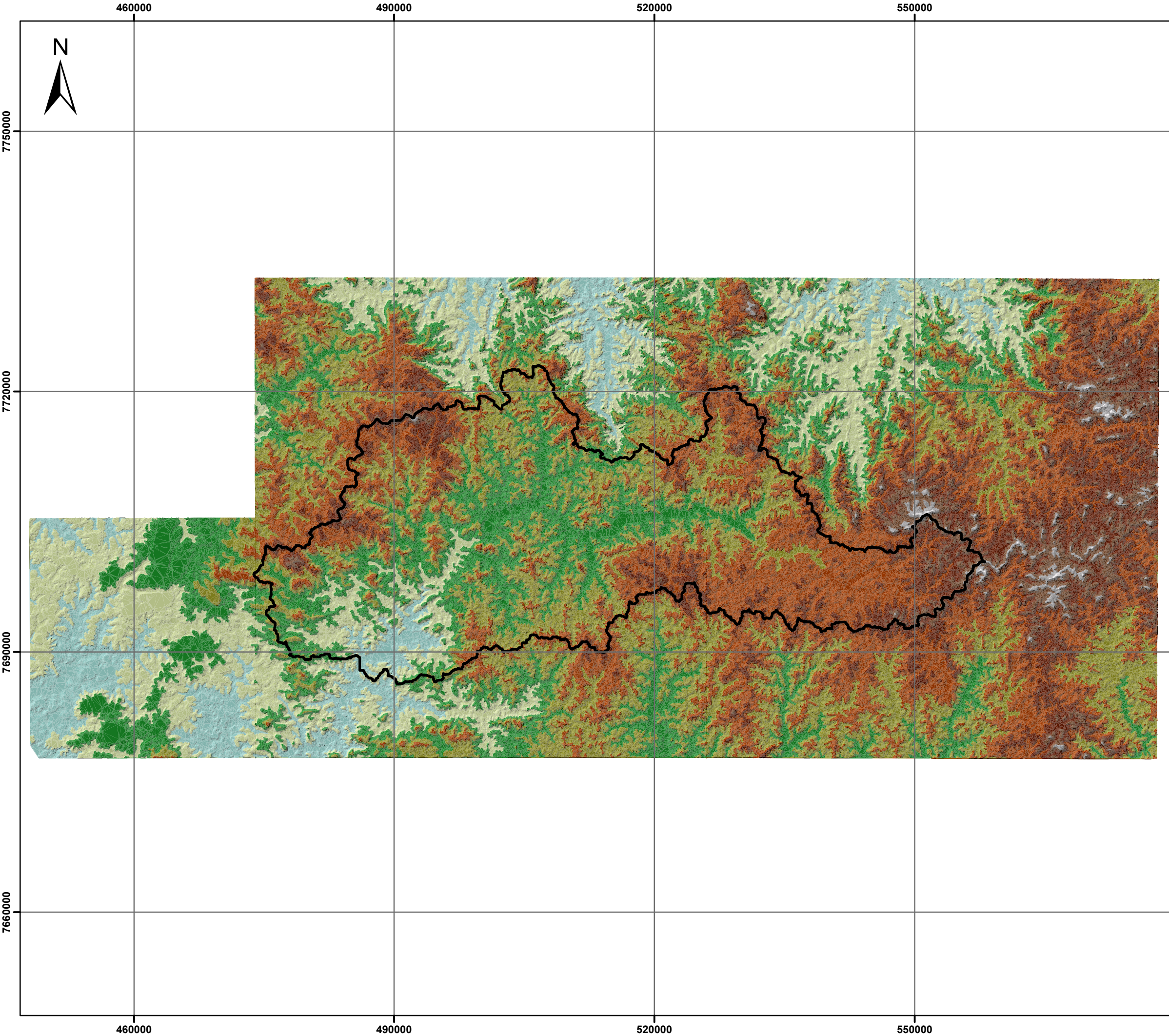
Observou-se que algumas depressões não foram preenchidas, bem como algumas diferenças altimétricas que ultrapassaram o limite imposto para o seu preenchimento, o que retornou um raster referente à direção do fluxo com valores não correspondentes às indicações das direções. Assim, foram identificados problemas de inserção de atributos na base do Projeto Geominas: algumas curvas de nível apresentam valor altimétrico diferente da carta topográfica original. Diante deste problema, as cartas topográficas originais foram consultadas (disponíveis no site do IBGE) e procedidas as devidas correções da base (Figura 14).

Figura 14 – Correção do erro de preenchimento de atributos na base utilizada para a geração do MDEHC ( a) modelo corrigido; b) modelo gerado com erro de vetorização)



Após a correção, foi gerado arquivo raster do modelo digital de elevação (Figura 16).

Figura 15 – Modelo Digital de Elevação em formato TIN

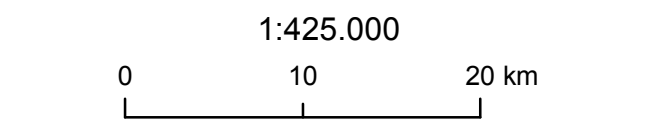


Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

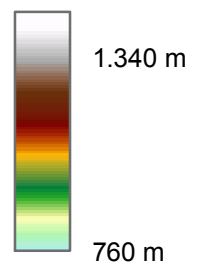
Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Modelo Digital de Elevação Formato TIN



 Bacia hidrográfica - Rio Jacaré

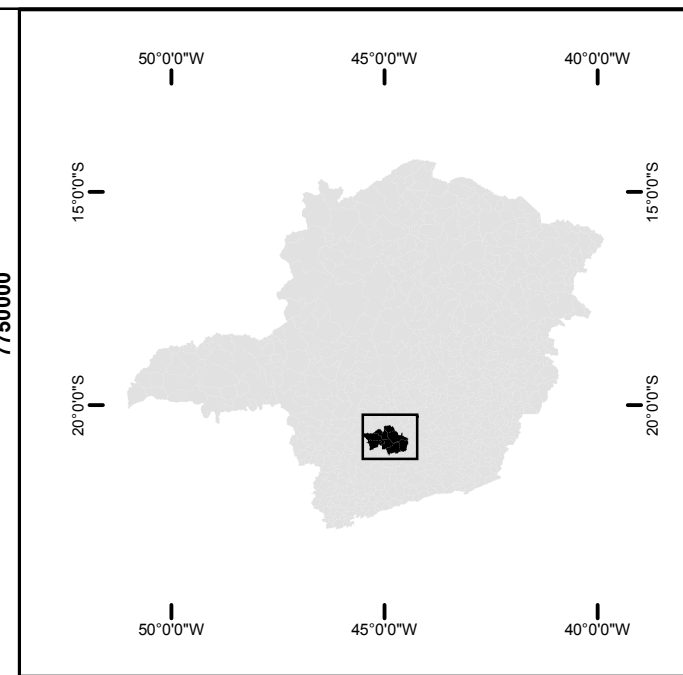
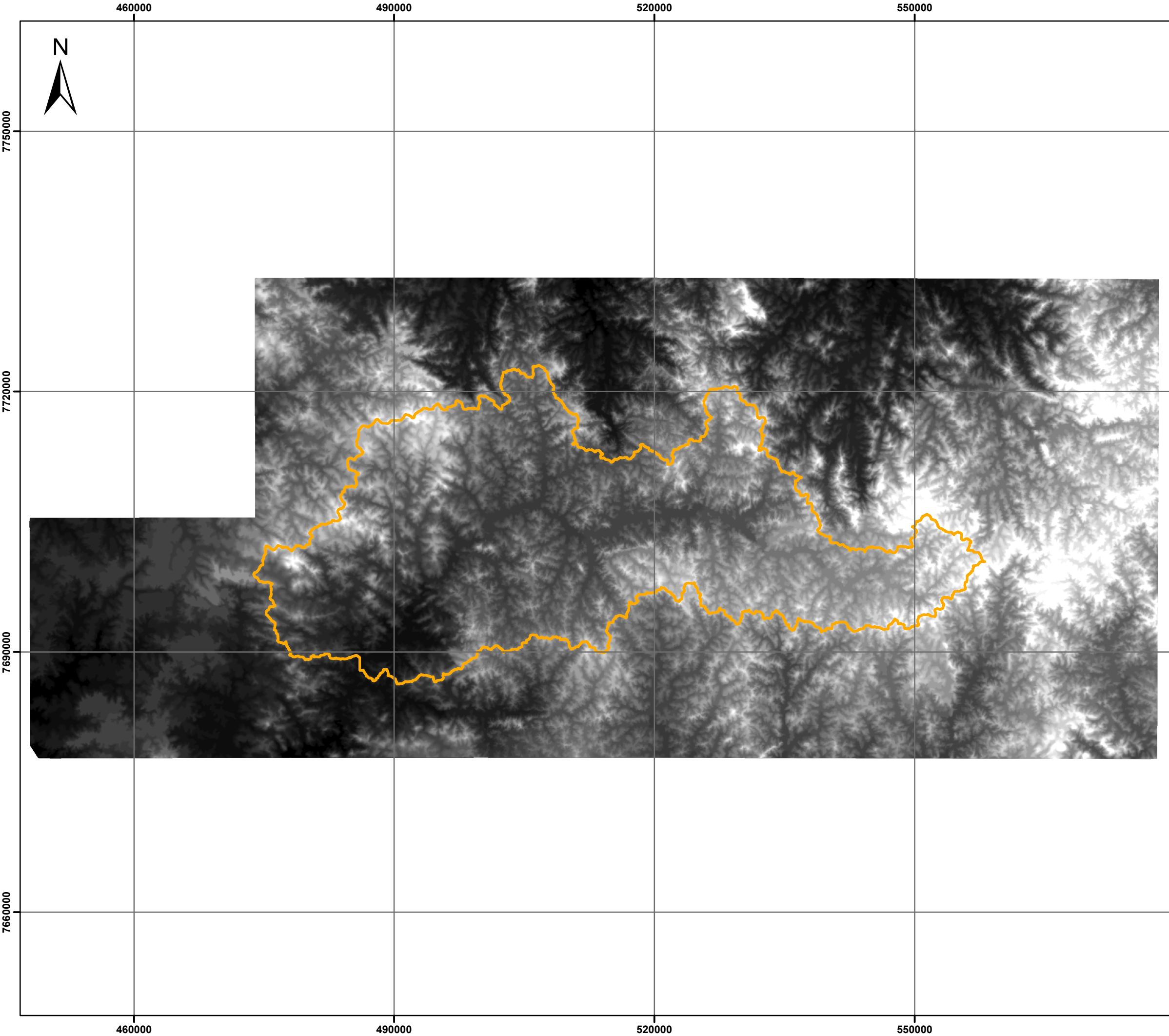
#### Altimetria



Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas, 2007.  
Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.  
Modelo Digital de Elevação gerado a partir das curvas do Geominas, 2007. (Equidistância: 50m)

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

Figura 16 – MDE em formato raster



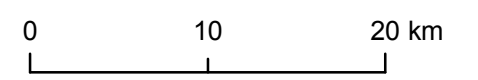
Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

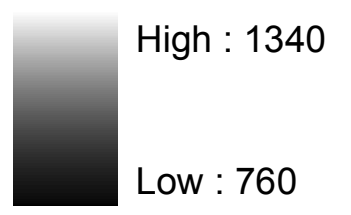
### Modelo Digital de Elevação Formato Raster

1:425.000



 Bacia hidrográfica - Rio Jacaré

#### Value



Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas, 2007.  
Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.  
Modelo Digital de Elevação gerado a partir das curvas do Geominas, 2007. (Equidistância: 50m)

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

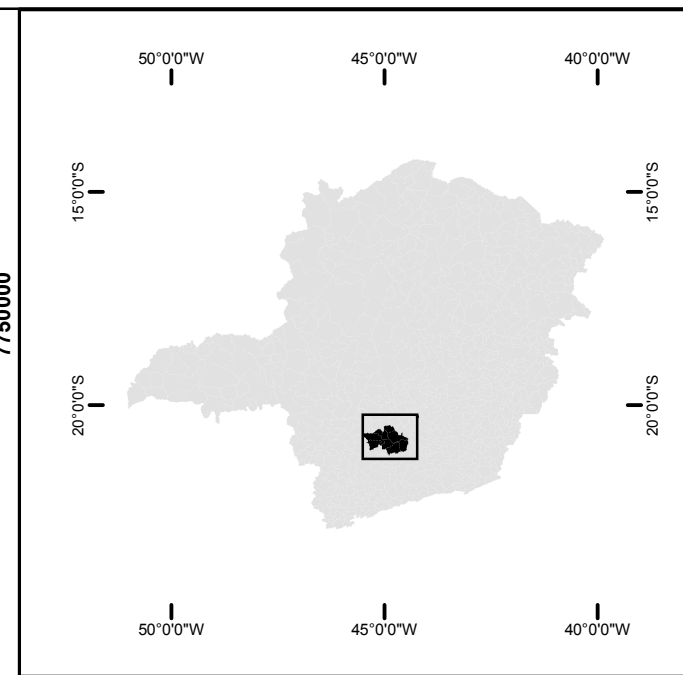
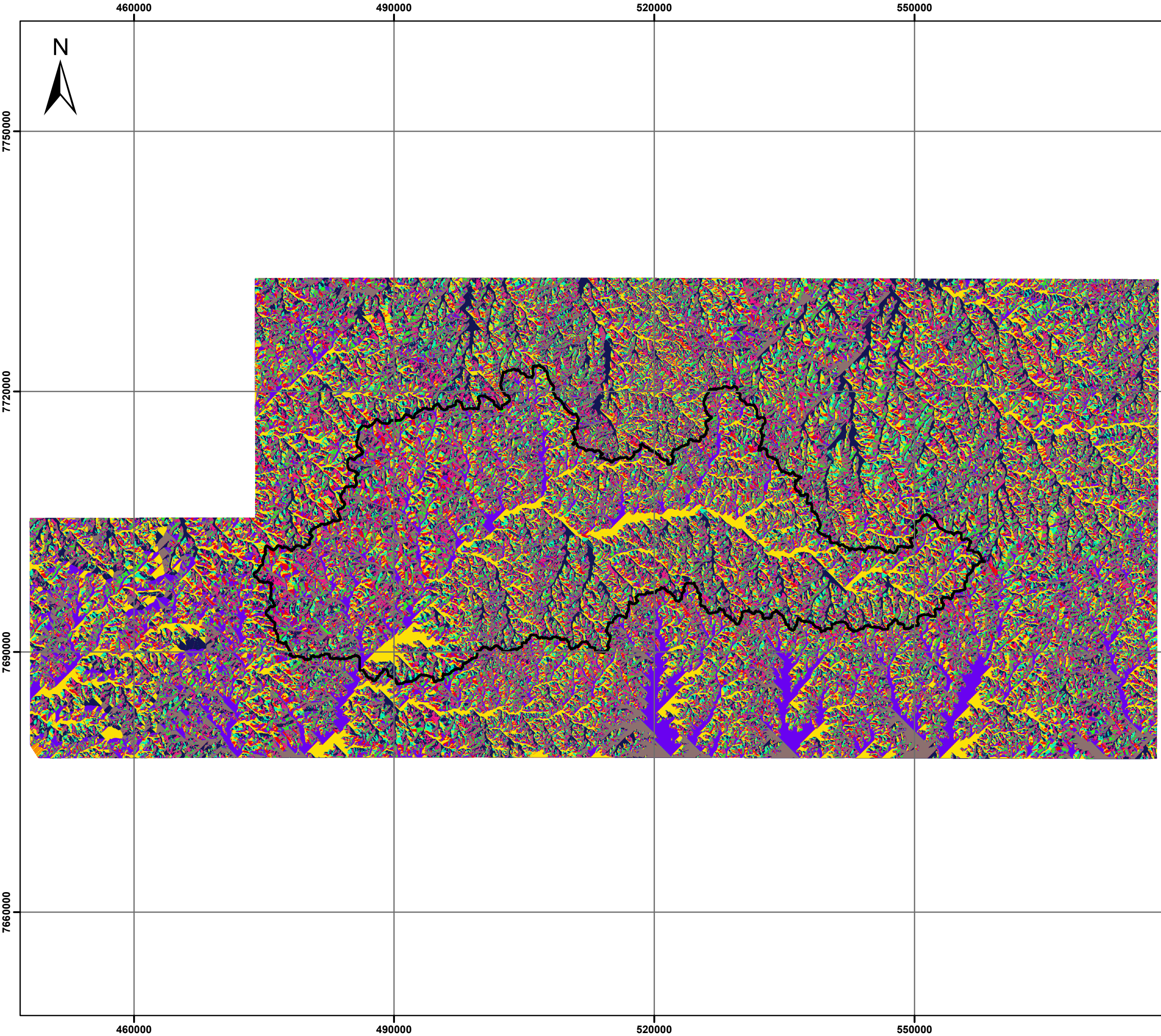
### 5.2.2 Delimitação do limite da bacia hidrográfica

Para delimitar a bacia hidrográfica foi necessário gerar o raster que identifica a direção do fluxo. O operador *Flow direction* da extensão SpatialAnalyst do software ArcGIS 9.3 foi utilizado para aplicação do método D8.

Em seguida o operador *Watershed* da mesma extensão foi utilizado para a definição da área da bacia (Figura 17). Para que este operador pudesse seguir a direção de escoamento da bacia hidrográfica, foi necessário indicar o pixel que representa o exutório da bacia, através da criação de uma feição de ponto que serviu como referência para o operador *Snap Pour Point* localizar e criar em formato raster o pixel desejado.

Desta forma, considerando a direção do fluxo o limite da bacia hidrográfica foi criado, retornando um valor de 1.603,9 km<sup>2</sup>.

Figura 17 – Raster de direção do fluxo e limite da bacia hidrográfica

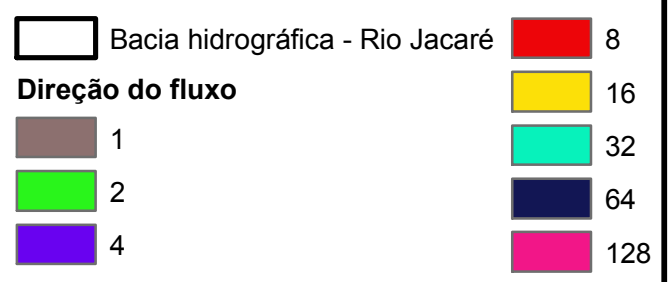
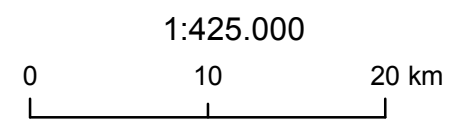


Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Direção de Fluxo



Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas, 2007.  
Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.  
Direção de fluxo gerado a partir de Modelo Digital de Elevação, conforme metodologia da pesquisa.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

### 5.2.3 Cálculo da declividade efetiva

Para que o cálculo da declividade efetiva fosse realizado, foi necessária a definição da extensão do talvegue. Diante da constatação de que as técnicas de definição do fluxo acumulado retornam linhas de fluxo conjuntas em planícies de inundação (Figura 18), relevo comum na área de estudo, e impossibilita a obtenção automática do comprimento do talvegue, optou-se pela alternativa que garantisse a precisão do dado, sendo a definição da extensão do talvegue realizada de forma interpretativa, tendo como base os vetores de hidrografia da base do Projeto Geominas.

Este procedimento também imprime exatidão na obtenção do dado, uma vez que os cursos d'água são feições de fácil delimitação em restituições aerofotogramétricas, portanto, a fidelidade sobre a real extensão do talvegue é considerável..

Figura 18 – Fluxo acumulado gerado pelo algoritmo em região de planície de inundação

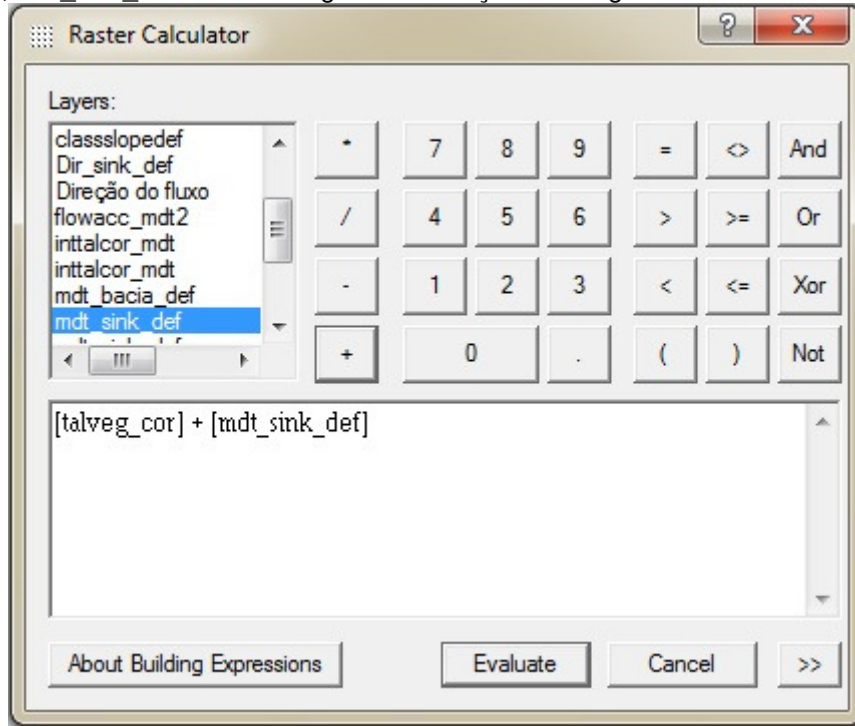


No Projeto Geominas, devido à largura do rio Jacaré sua vetorização foi realizada de forma a definir ambas as margens do curso d'água. No presente estudo a vetorização foi realizada visando estabelecer a linha do talvegue, ou seja, o ponto central entre as margens. Este processo de vetorização foi realizado no software ArcGIS versão 9.3, que ao final retornou uma extensão de 112,06 km para o talvegue.

Com a extensão identificada, foi necessário ter conhecimento da cota altimétrica de cada trecho do talvegue para proceder ao cálculo da declividade efetiva. Para isso, a linha do talvegue foi transformada em raster e atribuído a

cada pixel sua cota altimétrica a partir do MDE, para tanto foi utilizado do operador Raster Calculator da extensão Spatial Analyst do software ArcGIS 9.3 (Figura 19).

Figura 19 – Cálculo através do operador *Raster Calculator* (talveg\_cor = ao raster do talvegue; mdt\_sink\_def = modelo digital de elevação hidrológicamente consistente)



De posse do arquivo *raster* da linha do talvegue contendo a informação altimétrica, procedeu-se à conversão do mesmo em feição do tipo linha para a geração da tabela de atributos, contendo as cotas altimétricas de cada trecho.

A tabela de atributos desta feição foi exportada em formato “dbf” e tratada em uma planilha do software *Microsoft Excel*, onde foi aplicada a equação correspondente à declividade efetiva, chegando a um valor de 0,0003 m/m..

#### 5.2.4 Mapeamento do complexo solo/vegetação - CN

Como etapa inicial para definição do CN, o mapa de solos do Estado de Minas Gerais foi compatibilizado com a classificação hidrológica para os perfis representativos dos grandes grupos de solo do Estado de São Paulo, realizado por Sartori (2005). Esta compatibilização tornou possível adequar os grupos hidrológicos do modelo *SCS-CN* aos tipos de solos encontrados na área de estudo, sendo inserido um campo na tabela de atributos da base cartográfica identificando o grupo de solo compatível (Tabela 8).

Tabela 8 – Grupo hidrológico compatibilizado com a tabela do modelo SCS-CN dos solos encontrados na região de estudo

Classificação SBCS *	Tipo de Solo*	Grupo Hidrológico (SCS)**
CXbd1	CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típicos A fraco/moderado textura argilosa; fase caatinga hipoxerófila, relevo forte ondulado	D
CXbd7	CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A fraco/moderado textura argilosa, cascalhento/não cascalhento + LATOSSOLO VERMELHO distrófico A moderado textura argilosa; ambos fase caatinga hipoxerófila, relevo ondulado e forte ondulado	C
CXbe5	CAMBISSOLO HÁPLICO eutrófico típico A moderado/chernozêmico textura média/argilosa, cascalhento/não cascalhento + NEOSSOLO LITÓLICO eutrófico típico e chernossólico A moderado, pedregoso; ambos fase floresta caducifólia, relevo forte ondulado e montanhoso.	C
LVAAd1	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa; fase cerrado, relevo plano e suave ondulado	A
LVAAd15	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa; ambos fase floresta subperenifólia, relevo suave ondulado e ondulado e forte ondulado	A
LVAAd21	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura siltosa/argilosa, pedregoso/não pedregoso; todos fase cerrado, relevo plano e suave ondulado e ondulado.	A
LVAAd6	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico textura argilosa e muito argilosa (60 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico textura média e argilosa (40 %), ambos A moderado relevo forte ondulado e montanhoso	A
LVd4	LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura argilosa + LATOSSOLO VERMELHO distroférrico típico A moderado textura argilosa; ambos fase cerrado, relevo plano e suave ondulado	A
NXd1	NITOSSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa; ambos fase floresta caducifólia, relevo plano e suave ondulado	B
PVAd10	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado textura argilosa + NITOSSOLO VERMELHO distófico típico A moderado textura argilosa; todos fase caatinga hipoxerófila e floresta subcaducifólia, relevo ondulado e montanhoso	C
PVAd8	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa + LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura siltosa/argilosa; todos fase floresta subcaducifólia, relevo ondulado e forte ondulado	C
PVAd9	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico A moderado textura siltosa/argilosa + AFLORAMENTO ROCHOSO; todos fase floresta subperenifólia, relevo forte ondulado.	C
PVAe4	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico típico A moderado textura média/argilosa, cascalhento; fase floresta subperenifólia, relevo forte ondulado e montanhoso.	C
PVd1	ARGISSOLO VERMELHO distrófico típico A moderado/fraco textura média/ argilosa; fase floresta subperenifólia, relevo forte ondulado	C
RLd6	NEOSSOLO LITÓLICO distrófico típico A fraco/moderado + CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típico e léptico textura siltosa/argilosa + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura média/argilosa; todos fase cerrado, relevo suave ondulado e ondulado e forte ondulado	D
* Fonte: Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais		
** Fonte: Sartori, 2005		

O mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo foi realizado a partir de técnicas de interpretação e classificação de imagens. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat7 TM com resolução espacial de 30 metros, compatível com as escalas de todas as bases cartográficas que foram utilizadas no estudo, e composição RGB com as bandas 1, 2 e 3 (faixa do visível). O software utilizado para realizar esta classificação foi o *Spring* versão 5.2.3.

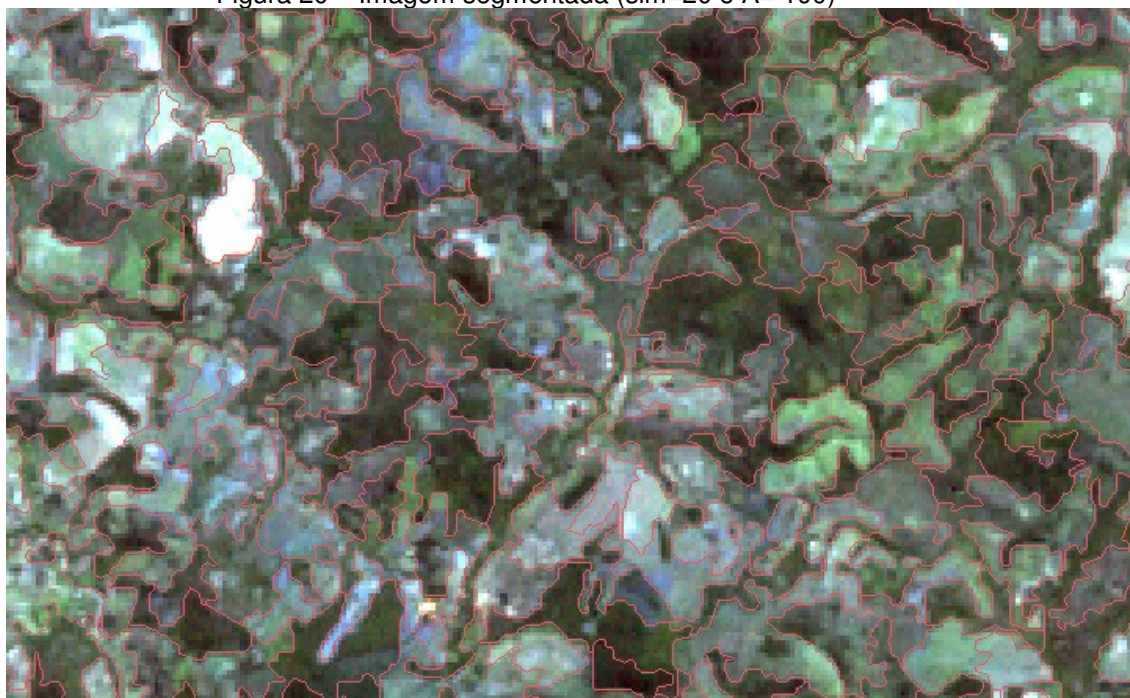
Ao carregar as imagens foi realizado o processo de composição das bandas espectrais que compõem a faixa do visível, sendo as bandas 1, 2 e 3 compostas, respectivamente, nos canais R, G e B. Foi aplicada a estas bandas ajustes de contraste para melhorar a identificação das feições a serem mapeadas.

A classificação foi iniciada com a realização do processo de segmentação da imagem Landsat por processo denominado “Crescimento de Regiões”. Este processo consiste em definir automaticamente zonas na imagem que possuem semelhança espectral, ou seja, cujas as respostas em cada banda se assemelham. Para isto, foram realizados testes ajustando os parâmetros que definem a segmentação, que são similaridade e área.

A medida de similaridade está baseada na distância Euclidiana entre os valores médios dos níveis de cinza de cada região. Duas regiões são consideradas distintas se a distância entre suas médias for superior ao limite de similaridade escolhido. O valor de área define o mínimo de pixel que devem conter em uma região segmentada. Regiões com área menor que o mínimo escolhido são absorvidas pelas regiões adjacentes mais similares a estas.

Esta análise depende da resposta espectral da imagem e das características de uso e cobertura do solo da região, o que exige sensibilidade do executor. Esta sensibilidade deve ter como foco o equilíbrio dos parâmetros entre as extensões e a homogeneidade ou heterogeneidade das ocupações. Para o presente estudo, a segmentação que melhor se ajustou à imagem utilizou os parâmetros de similaridade igual a 20 níveis e área igual a 100 pixels. Na Figura 20, os contornos em vermelho demonstram a segmentação das feições homogêneas na imagem de satélite utilizada.

Figura 20 – Imagem segmentada (sim=20 e A= 100)



A legenda do mapeamento foi definida de acordo com a compatibilidade dos itens da tabela de referencia definida pelo SCS para o valor de CN e a capacidade de resposta da imagem de satélite. Assim, tipologias como solo lavrado, plantações de cereais e de legumes ou cultivados foram excluídas, pois não foram identificadas .

As tipologias consideradas compatíveis para a identificação são apresentadas na Tabela 9 apresentada a seguir:

Tabela 9 – Tipologias mapeadas para a classificação das imagens e suas respectivas correspondências para o parâmetro CN

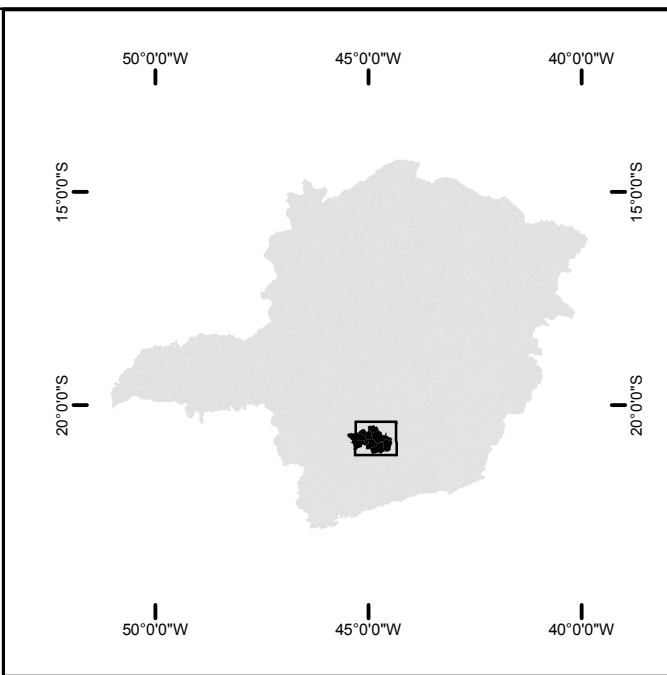
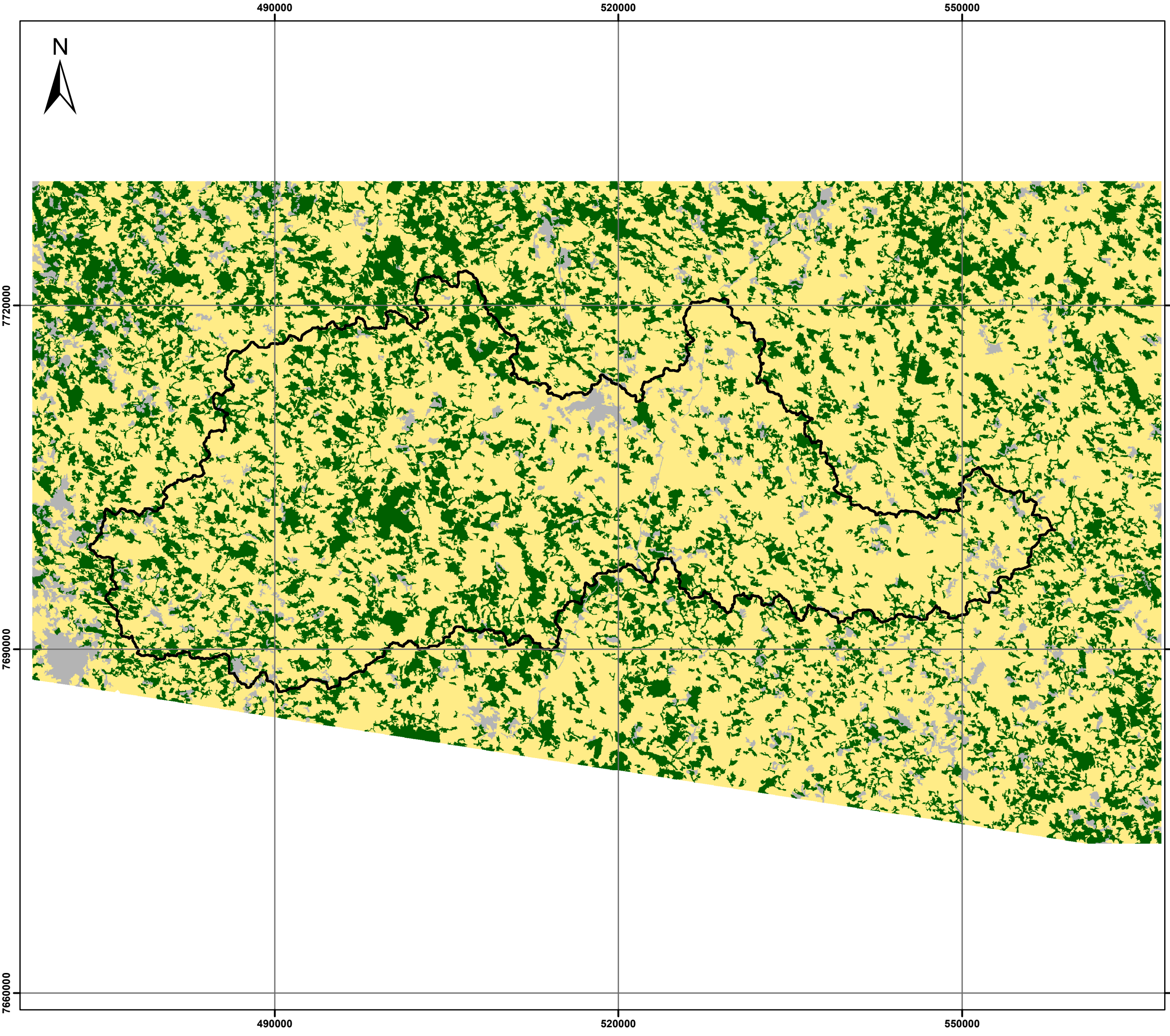
Uso do solo	Superfície	Tipo de solo			
		A	B	C	D
Pastagens em curvas de nível	normais	25	59	75	83
Floresta	esparsas	46	68	78	84
Asfaltadas e com drenagem pluvial		98	98	98	98

A partir da segmentação, foram selecionadas as amostras de treinamento para o processo de classificação. Este treinamento consiste em definir para algumas regiões segmentadas uma classe de uso de acordo com a Tabela 9. Depois de selecionado um número de amostras representativo na imagem, foi realizada uma análise da coleta realizada, visando verificar se não existem regiões com padrões de níveis de cinza semelhantes entre as classes.

Após satisfeita a análise das amostras, procedeu-se à classificação. O classificador escolhido foi o *Bhattacharya*, que tem o mesmo nome da medida estatística que utiliza. Este classificador avalia a diferença estatística entre um par de classes espectrais, ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidades das classes espectrais e as une quando semelhantes.

Devido ao pequeno número de classes, a etapa de pós-classificação, comum na classificação de imagens, foi excluída, uma vez que esse procedimento é indicado quando há ruídos entre as classes, ou seja, pixels isolados são classificados em classes diferentes, o que não ocorreu conforme análise do mapeamento (Figura 21). O mapeamento foi convertido para o software ArcGIS 9.3 para dar sequência à composição do CN.

Figura 21 – Mapeamento de uso e cobertura do solo

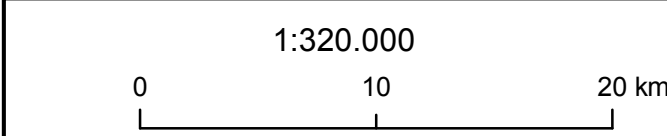






Universidade Federal de Minas Gerais  
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

### Uso e Ocupação do Solo



-  Bacia hidrográfica - Rio Jacaré
- Uso e ocupação**
-  Pastagens em curvas de nível normais
-  Florestas esparsas
-  Asfaltadas e com drenagem pluvial

Fonte dos dados:  
Base cartográfica Geominas, 2007.  
Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.  
Mapa de uso e ocupação obtido por classificação híbrida de imagem de satélite Landsat 7 TM, composição 123, datada de 13/05/2007.

Notas técnicas:  
Universal Transversa de Mercator  
Datum Córrego Alegre, Zona 23K

Em posse do grupo hidrológico e do uso do solo foi realizada a interseção entre ambos os mapeamentos, desta forma foi possível definir o número do CN correspondente a cada fragmento. Foi então gerado o mapa de cobertura/uso do solo com a definição dos respectivos CNs (Figura 22). A tabela de atributos desta feição foi exportada em formato “dbf” e tratada no *software Microsoft Excel*, onde foi calculada a média ponderada entre todos os fragmentos mapeados, conforme equação transcrita a seguir:

Equação 13 – Média ponderada do parâmetro CN

$$\frac{\sum CN_n \times A_n}{A}$$

Onde:

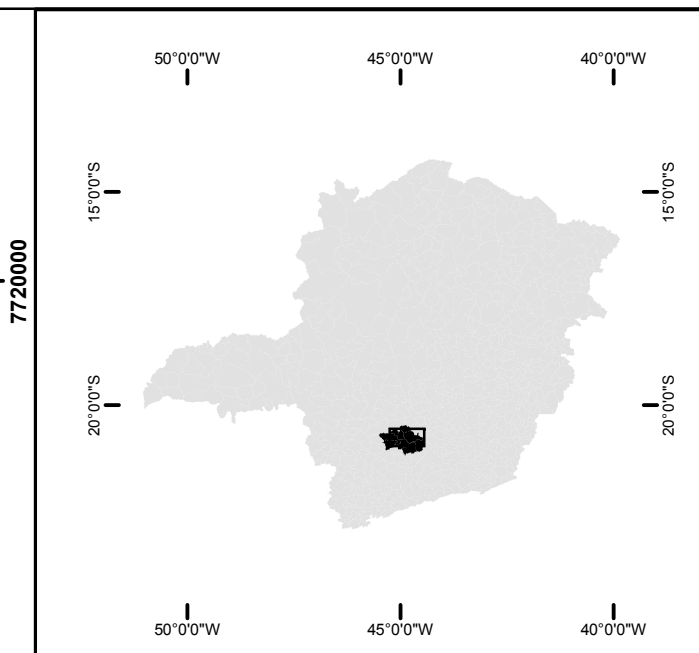
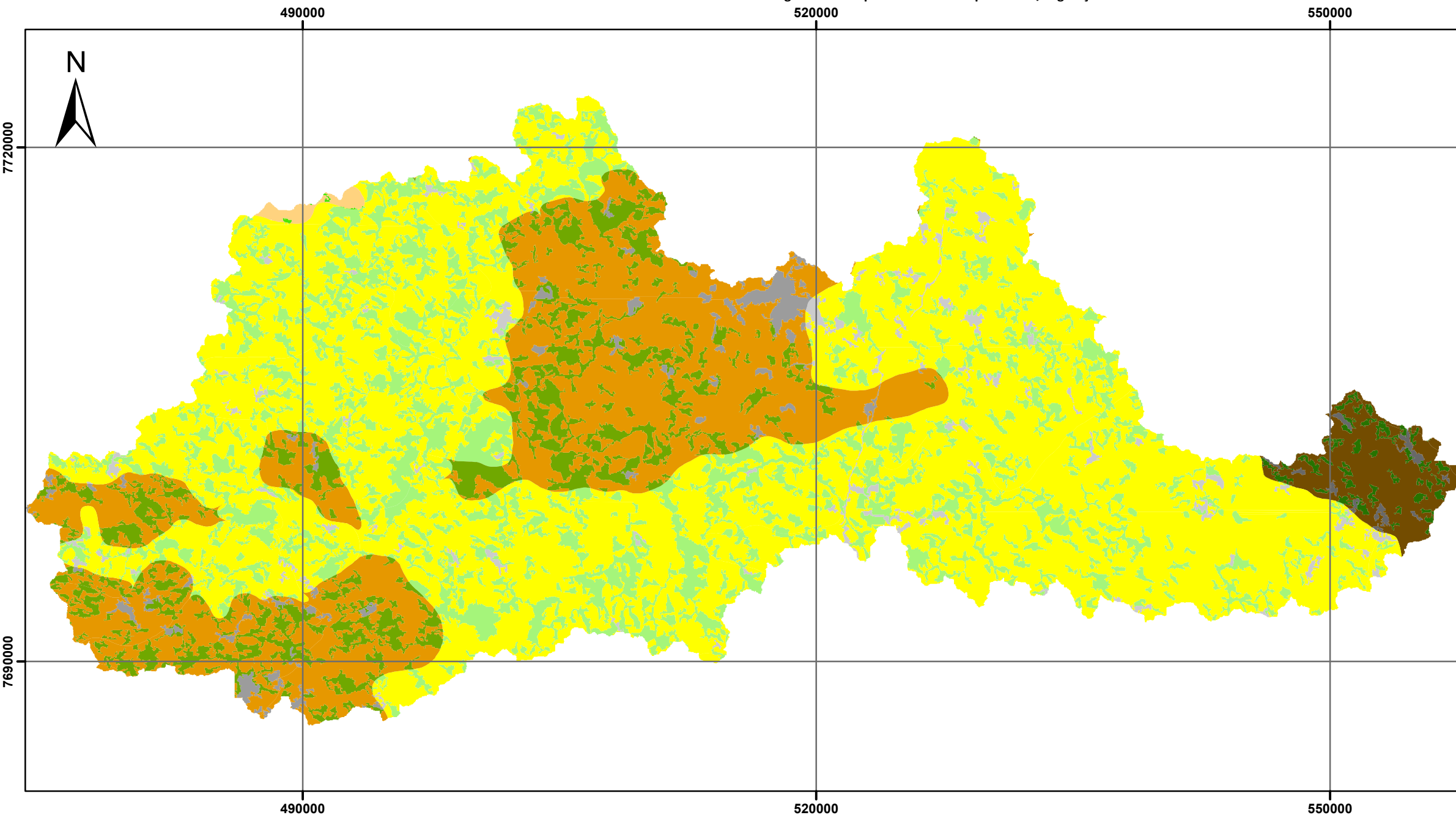
$CN_n$  = *valor CN correspondente a cada fragmento mapeado*

$A_n$  = *área de cada fragmento mapeado*

$A$  = *área total da bacia hidrográfica*

A média ponderada encontrada foi de 46,7.

Figura 22 – Mapeamento do complexo solo/vegetação - CN

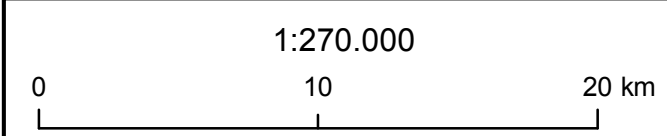













Universidade Federal de Minas Gerais  
 Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Técnicas de Geoprocessamento Aplicadas ao Modelo SCS – Soil Conservation Service - Curve Number

Autor: Rafael do Carmo Pompermayer  
 Orientadora: Maria Márcia Magela Machado

**Curve Number - CN**



- Curve Number - CN**
- Uso do solo , Grupo Hidrológico, CN**
-  Asfaltadas e com drenagem pluvial, A, 98
  -  Asfaltadas e com drenagem pluvial, C, 98
  -  Asfaltadas e com drenagem pluvial, D, 98
  -  Florestas esparsas, A, 46
  -  Florestas esparsas, B, 68
  -  Florestas esparsas, C, 78
  -  Florestas esparsas, D, 84
  -  Pastagens em curvas de nível normais, A, 25
  -  Pastagens em curvas de nível normais, B, 59
  -  Pastagens em curvas de nível normais, C, 75
  -  Pastagens em curvas de nível normais, D, 83

Fonte dos dados:  
 Base cartográfica Geominas, 2007.  
 Limite da bacia mapeado conforme metodologia da pesquisa.  
 Mapa de uso e ocupação obtido por classificação híbrida de imagem de satélite Landsat 7 TM, composição 123, datada de 13/05/2007.

Notas técnicas:  
 Universal Transversa de Mercator  
 Datum Córrego Alegre, Zona 23K

### 5.2.5 Modelagem

Os dados alfanuméricos gerados pela metodologia aplicada constituem-se nos parâmetros físicos da bacia hidrográfica que representam parte dos dados de entrada do modelo. Estes dados foram colocados em interação no *software Microsoft Excel*, compondo as equações matemáticas previstas no modelo *Soil Conservation Service - CN*.

A partir da interação destes dados, o valor de saída do modelo, representado pela vazão máxima produzida pela bacia, foi conhecido..

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os métodos utilizados visaram criar uma rotina de técnicas de geoprocessamento difundidas na atualidade no meio profissional e científico na obtenção de parâmetros físicos de bacia hidrográfica para aplicação do modelo SCS-CN. Para avaliação dos resultados alcançados é necessária uma análise comparativa dos mesmos com os valores obtidos no estudo hidrológico para dimensionamento da ponte sobre o rio Jacaré, realizado de forma convencional, sem utilização das ferramentas SIG e sensoriamento remoto. Assim, os valores obtidos a partir da metodologia aplicada nesse estudo e os disponibilizados pelo DER –MG são apresentados dispostos lado-a-lado na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 – Resultados obtidos para a Bacia do rio Jacaré

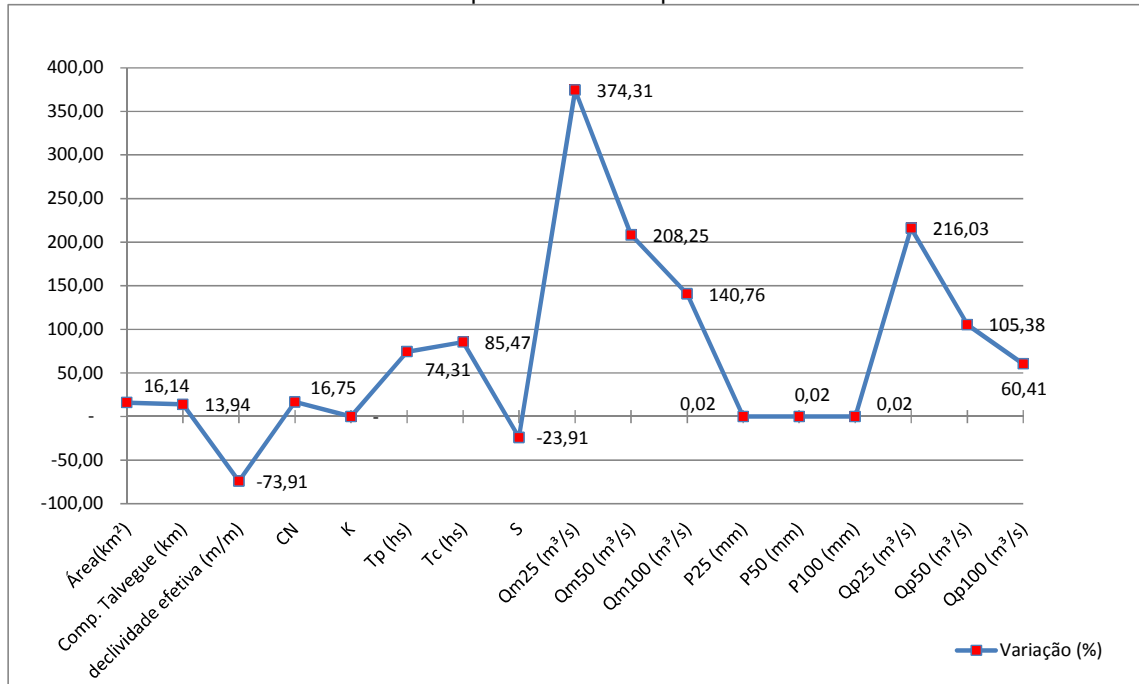
Método estudado		Método convencional	
Área(km <sup>2</sup> )	1603,9	Área(km <sup>2</sup> )	1381
Comp. Talvegue (km)	112,07	Comp. Talvegue (km)	98,36
declividade efetiva (m/m)	0,0003	declividade efetiva (m/m)	0,001
CN	46,7	CN	40
K	0,20836	K	0,20836
Tp (hs)	43,87	Tp (hs)	25,17
Tc (hs)	60,18	Tc (hs)	32,45
S	11,41	S	15,00
Qm25 (m <sup>3</sup> /s)	4,20	Qm25 (m <sup>3</sup> /s)	0,89
Qm50 (m <sup>3</sup> /s)	7,09	Qm50 (m <sup>3</sup> /s)	2,30
Qm100 (m <sup>3</sup> /s)	11,08	Qm100 (m <sup>3</sup> /s)	4,60
P25 (mm)	95,03	P25 (mm)	95,01
P50 (mm)	106,99	P50 (mm)	106,97
P100 (mm)	120,45	P100 (mm)	120,43
Qp25 (m <sup>3</sup> /s)	31,99	Qp25 (m <sup>3</sup> /s)	10,12
Qp50 (m <sup>3</sup> /s)	53,99	Qp50 (m <sup>3</sup> /s)	26,29
Qp100 (m <sup>3</sup> /s)	84,38	Qp100 (m <sup>3</sup> /s)	52,60

Dentre os dados analisados, destacam-se as pequenas diferenças entre os parâmetros de precipitação, uma vez que em seu cálculo são consideradas as constantes definidas para o posto pluviográfico de Santana do Jacaré, variando apenas o tempo de concentração, que não é expressivamente sensível nesta equação.

Dentre os parâmetros físicos, as variações dos cálculos da área da bacia hidrográfica, comprimento do talvegue e CN se mantiveram entre 13,9% e 16,7%, porém, este último é de extrema sensibilidade no modelo SCS, responsável pelas alterações nos parâmetros de capacidade de

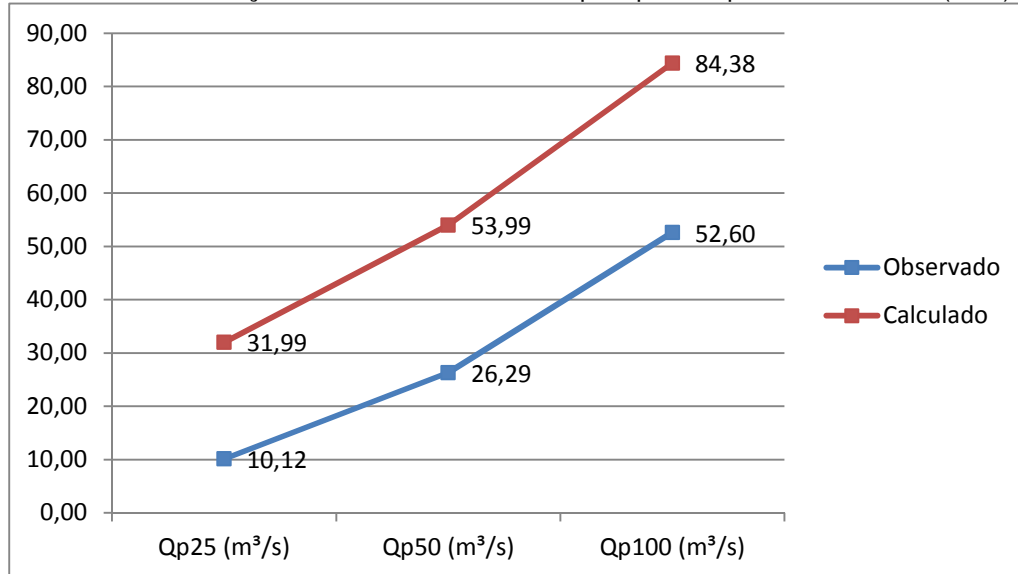
armazenamento no solo (S), que variou -23,91%, que por sua vez influi em escoamento superficial (Qm), que variou 374,31% pra um período de retorno de 25 anos, 208,25% para 50 anos e 140,76% para 100 anos, cujos valores interferem significativamente no parâmetro de vazão máxima (Qp), que variou respectivamente para os períodos de 25, 50 e 100 anos os valores de 216,03%, 105,38% e 60,41% (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Discrepância entre os parâmetros



Supõe-se que o projetista não valoriza a precisão nos parâmetros referentes à área da bacia e comprimento do talvegue devido à falta de sensibilidade na equação do modelo, que conseqüentemente não trará retorno significativo na vazão de pico (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Diferença dos valores da vazão de pico por tempo de recorrência (m³/s)



Vale ressaltar que estudos aplicados a este modelo, em sua maioria, visam à definição de parâmetros isolados, onde a vazão de pico não é o elemento de comparação, o que proporciona resultados mais satisfatórios quando comparados com os valores retornados pelo modelo.

Outro parâmetro divergente é referente à declividade efetiva. O valor utilizado pelo projetista é bem maior, quando na realidade, a declividade efetiva é bem menor, conforme pode ser verificado pela metodologia aplicada, que discretizou o relevo de forma mais detalhada.

Do ponto de vista hidrológico, a declividade calculada de forma distribuída com o método aplicado neste estudo talvez não seja indicada, já que o valor de 0,0003 m/m indica um movimento muito lento, pouco sensível para o modelo. Ressalta-se que este parâmetro tem grande sensibilidade na definição do tempo de concentração, que por sua vez define o tempo de pico. Este valor reflete as extensas planícies de inundação no talvegue do rio, que retornou pouca variabilidade da altitude no MDE. Esta metodologia deve ser aplicada para regiões de relevo mais ondulado, com vales encaixados, visando verificar se sua aplicação é adequada nestes cenários.

Por fim, ressalta-se que a semelhança entre os valores de escoamento superficial ( $Q_m$ ) para o período de retorno de 25 anos do método estudado e de 100 anos do convencional se aproximaram coincidentemente, devido ao equilíbrio nas equações entre o valor de capacidade de armazenamento do

solo (S) que foi maior no método convencional e o valor de precipitação (P) que foi maior no método estudado.

## 7 CONCLUSÕES

Conforme já mencionado, o modelo SCS-CN é amplamente utilizado devido ao número reduzido de parâmetros, o que se torna seu principal atrativo. Sua concepção se deu em solo norte-americano, o que traz a necessidade de avaliações sobre sua aplicabilidade em qualquer outro lugar.

O parâmetro Curve Number é um exemplo claro disto, sendo o de maior sensibilidade no modelo, supõe-se que sejam necessários mecanismos eficientes para sua obtenção, porém, a compatibilidade da metodologia proposta pelo modelo faz com que sua aplicação fique comprometida em outro local.

Essa afirmativa se baseia no fato de que a tabela de referência dos tipos de uso e cobertura vegetal foi criada com o intuito claro de que a identificação das tipologias seja realizada de forma primária, ou seja, identificadas com extrema exatidão em campo, como demonstram as definições de tamanhos de lote para as áreas urbanas e tipo de superfície (com sulcos retilíneos, em fileiras retas ou em terraceamentos em nível). A aplicação de técnicas de geoprocessamento visando atender o rigor que a tabela de referência do parâmetro CN propõe é inviável de ser praticada habitualmente, uma vez que exigiria levantamentos de campo extensos, auxílio de imagens orbitais de alta resolução de custo elevado e extensos tratamentos de informações espaciais.

Outra dificuldade para a definição deste parâmetro são as bases cartográficas pedológicas, ou até mesmo a geração destas em escalas adequadas. As compatibilizações do tipo de solo brasileiro com os grupos hidrológicos propostos pelo modelo são muito úteis, porém, necessitam de serem complementadas para todo o território, bem como avaliado até que ponto na composição do parâmetro CN, no que tange ao grupo hidrológico, os solos brasileiros retornam os mesmos valores propostos pelas tabelas de referência do modelo.

Na prática, o modelo SCS-CN é utilizado de forma a servir como referência teórica sobre a estimativa de vazão, porém, os valores de seus parâmetros são alterados de acordo com as medições em campo por outras metodologias notoriamente eficazes, o que demonstra que o aumento de precisão na metodologia de obtenção dos parâmetros por si só não traz aumento de precisão para o modelo, uma vez que os valores de CN são

alterados de acordo com estas medições, portanto, os resultados tornam-se tendenciosos, visando corroborar com os resultados do campo ou do conhecimento empírico do hidrólogo, e não com o resultado do modelo da forma restrita em que este foi desenvolvido.

Estes fatores demonstram uma conclusão recorrente em estudos hidrológicos, a de que as análises ainda dependem em grande parte da interpretação do hidrólogo. A heterogeneidade de cenários que a hidrologia trabalha ainda não foi passível de ser controlada por métodos científicos de forma a assegurar a aplicação explícita das formulações matemáticas desenvolvidas. A sensibilidade dos parâmetros frente a fenômenos de natureza física ou temporal das bacias hidrográficas é um desafio na criação destas formulações. Portanto, o papel do hidrólogo torna-se essencial na obtenção de novos modelos e metodologias para o conhecimento do comportamento hidrológico. Inclui-se neste cenário a expansão da rede de amostragem de fenômenos meteorológicos, visando municiar as análises com dados estatísticos representativos.

A diversidade de cenários no estudo da hidrologia também não permite que a presente pesquisa tome conclusões arbitrárias sobre a aplicação das técnicas de geoprocessamento para o modelo SCS-CN. Estas técnicas devem ser testadas em bacias com geomorfologia e ocupação distintas, visando avaliar a adequação do método com estas alterações. Outra perspectiva é aplicar as técnicas com fins de comparar este modelo aplicado por sub-bacias, visando avaliar a aferição dos dados observados quando aplicados em bacia de menores extensões.

É inegável a contribuição do geoprocessamento para a composição de parâmetros físicos do modelo SCS-CN, porém, o ganho em exatidão na geração destes parâmetros não foi capaz de ser avaliado quanto aos resultados obtidos para os dados observados. O parâmetro determinante, o CN, deve ser adaptado de forma a possibilitar uma aproximação mais precisa. Acredita-se que o desafio dos hidrólogos será conseguir adaptar este modelo a ponto de não alterá-lo em sua essência, ainda assim, o modelo SCS-CN certamente serve de inspiração e base para que outros modelos surjam com resultados satisfatórios.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO NETO, A. A. B., SOUZA FILHO, C. R. S. – *Modelagem hidrológica utilizando lógica fuzzy, SIG e dados de sensoriamento remoto*. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26, INPE, p. 3287-3294, 2007.
- BESKOW, S., MELLO, C. R., COELHO, G., SILVA, A. M. & VIOLA, M. R. - *Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:169-178, 2009.
- CÂMARA, G., MEDEIROS, C.M.B. *Geoprocessamento para projetos ambientais*. 2. ed., São José dos Campos-SP; INPE, 1998.
- CHAVES, M. A. *Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônica*. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- CHENG, Q., KO, C., YUAN, Y., GE, Y., ZHANG, S. *GIS modeling for predicting river runoff volume in ungauged drainages in the Greater Toronto Area*. Computers&Geosciences32 : 1108-1119, Canada, 2005.
- CHEREM, L. F. S. *Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG*. 2008. 111 p. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- CHIARI, G.R.P. *Análise comparativa entre modelos chuva-vazão distribuídos por módulos e concentrados por sub-bacias: um estudo de caso para a UHE São Simão*. Dissertação (Mestrado de Engenharia Sanitária e Ambiental) Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- CHORLEY, R. & HAGGETT, P. *Modelos, paradigmas e a nova geografia*. In *Modelos físicos e de informação em Geografia*. (CHORLEY, R.J. & HAGGETT P., Eds) Livros Técnicos e Científicos, 1-19. Rio de Janeiro, 1975.
- CHORLEY, R. & HAGGETT, P. *Models in Geography*. Methuen&Co. Londres, 1967.
- CHORLEY, R. & HAGGETT, P. *Modelos integrados em Geografia*. Livros técnicos e científicos. Rio de Janeiro, 1974.
- CHORLEY, R. & HAGGETT, P. *Modelos sócio-econômicos em Geografia*. Livros técnicos e científicos. Rio de Janeiro, 1974b.
- CHORLEY, R. & HAGGETT, P. *Modelos físicos e de informação em Geografia*. Livros técnicos e científicos. Rio de Janeiro, 1975.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais* 1ª edição. Edgard Blücher, São Paulo, 1999.
- COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. 2001. 196 p. Tese(Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

DRUZINA, A. G. S. *Integração de Dados Altimétricos Obtidos Através de Diferentes Técnicas para Geração de um Novo Modelo Digital de Elevação*. 2007. 79 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FELGUEIRAS, C.M.B. *Geoprocessamento para projetos ambientais*. 2 ed, INPE. São José dos Campos-SP, 1998.

FELGUEIRAS, C. A. *Modelagem numérica de terreno*. 2001 In: Introdução a Ciência da Geoinformação. – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2001.

FERRAZ, F. F. B., MILDE, L. C. E. & MORTATTI, J. *Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informação geográficas: um estudo de caso*. Revista de Ciência e Tecnologia, 14: 45 – 56, Campinas-SP, 1999.

GUERRA, T. J. A. & CUNHA B. S. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2007.

GEETHA, K., MISHRA, S. K., ELDHO, T. I., RASTOGI, A. K., & PANDEY, R. P.: *SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting*, Water Resource. Manag., 22(2), 165–190, 2008.

HAIGH, M. J. – *Geography and general systems theory, philosophical homologies and current practice*. Geoforum, 16(2): 191 – 203, 1985.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. *Mapa de Solos do Brasil - escala 1:5.000.000*. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em <http://mapas.ibge.gov.br/>, acessado em 10 de Julho de 2012.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. *Mapa de Biomas do Brasil - Primeira Aproximação - escala 1:5.000.000*, 2004. Disponível em <http://mapas.ibge.gov.br/>, acessado em 10 de Julho de 2012.

JABÔR, A. M. *Drenagem de Rodovias – Estudos hidrológicos e projeto de drenagem*. Apostila do curso de Drenagem de Rodovias. Belo Horizonte, 2013.

KRAUSKOPF, R. N. *Atualização de Modelos Chuva-Vazão-Propagação com Estimadores de Estado*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LIU, T. W., *Aplicações de Sensoriamento Remoto*. 1 ed. Ed. UNIDERP, Campo Grande, 2006.

MAGALHÃES, L. P. D. *Modelo Integrado para simulação de sistemas hídricos*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. Tese (doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MAIDMENT, D. R. *Arc Hydro GIS for Water Resources*. 2002. ESRI, New York, 2002.

MELO, H. A., NÓBREGA, R. L. B. & RUFINO, I. A. A. – *Interfaces de integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica (SIG): Avanços e desafios*. IV Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Aracaju, 2008.

MELO, H. A., CUNHA, J. E. B. L., NÓBREGA, R. L. B., RUFINO, I. A. A., GALVÃO, C. - *Modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica (SIG): Integração possível*. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador, 2008.

MENDES FILHO, W. M.; VENDRAME I. F.; CARVALHO, R. G.; *Utilização de sistema de informações geográficas para o mapeamento do potencial de retenção de águas pluviais no município de São José dos Campos – SP*. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Anais XIII, 2007, Florianópolis.

NOVO, M. L. M. E., *Sensoriamento Remoto – Princípios e Aplicações*. 1ª ed. Ed. Edgard Blucher, São José dos Campos, 1989.

PEREIRA, L. M. *Modelagem Hidrológica Dinâmica Distribuída para Estimativa do Escoamento Superficial em uma Microbacia Urbana*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2009.

PORTELA, M. M. 2005. Modelação Hidrológica. In: <https://fenix.ist.utl.pt/disciplinas/mh/2005-2006/2-semester/bibliografia>. Acesso em 29/05/2013.

SANTOS, A. R. *ArcGIS 9.1 total: aplicações para dados espaciais*. Fundagres. Vitória, 2007.

SANTOS, L. L. *Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações*. Revista Brasileira de Geografia Física – RBGF, Volume 2, n.03, set-dez, 2009-01-19, Recife-PE, 2009.

SANTOS, L. L. *Modelagem Hidrossedimentológica e Avaliação Comparativa de Três Modelos em Pequenas Sub-Bacias na Região Semi-Árida Paraibana*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

SANTOS, S., MONTEIRO, A., MOURATO, S. & FERNANDEZ, P. *Os Sistemas de Informação Geográfica na Modelação Hidrológica*. In Proceedings do XII Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Granada, Espanha, 2006.

SARTORI, A., NETO, F. L., GENOVEZ, A. M. *Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação*. In RBRH Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V10 n. 4, Campinas, 2005.

Singh, V.P., Woolshier, D.A. *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*. Journal of Hydrologic Engineering, Volume 7, Issue 4, pp. 270-292, 2002.

Soil Conservation Service, *Urban hydrology for small Watersheds*. Washington. U.S. Dept. Agr. Technical Release n. 55. 1986.

SCS - *Soil Conservation Service*. National Engineering Handbook, USDA, 1972.

TIBÚRCIO, E. C. & CASTRO, M. A. H. – *Uso de sistemas de informação geográfica para determinação do curve number em regiões hidrológicas*. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste, Cuiabá, 2007.

THIMOTTI, T. C. M. *Concepção e avaliação de um sistema de previsão de vazões de longo termo*. Dissertação (Mestrado de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. ABRH-UFRGS, Porto Alegre, 2005.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. ABRH-UFRGS, Porto Alegre, 2001.

WU, S., LI, J., HUANG, G. H. *Modelling the effects of elevation data resolution on the performance of topography-based watershed runoff simulation*. Environmental Modelling & Software, 22: 1250-1260, 2007.

XIANZHAO, L. & JIAZHU, L. *Application of SCS Model in Estimation of Runoff from Small Watershed in Loess Plateau of China*. Chinese Geographical Science, 18(3) 235–241, 2008.

Universidade Federal de Viçosa; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida*. Belo Horizonte, 2010.

VILLELA, M. S. & MATTOS A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, 1975.

VIEUX, B. E. *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Oklahoma. Kluwer Academic Publishers, 2004.