LEANDRO GUIMARÃES BAIS MARTINS

Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto
em macrodrenagem urbana

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de Mestre
em Ciências

Área de concentração: Engenharia Hidráulica
e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

VERSÃO CORRIGIDA
São Carlos
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M382d Martins, Leandro Guimarães Bais
 Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana. / Leandro Guimarães Bais Martins ; orientador Rodrigo de Melo Porto. São Carlos, 2012.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

 1. Hidrologia. 2. Imagem de satélite. 3. Alta resolução espacial. 4. Bacia hidrográfica urbana. 5. Cobertura do solo. 6. Número de deflúvio. 7. SIG. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro LEANDRO GUIMARÃES BAIS MARTINS.

Titulo da dissertação: "Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana".

Data da defesa: 11/05/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado Rodrigo de Melo Porto (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. João Luiz Boccia Brandão
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. Erich Kellner
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e
Saneamento:

Prof. Titular Edson Cezar Wendland

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado Paulo Cesar Lima Segantine

Dedico este trabalho à Marjolly
e aos meus pais, Hélio e Maria de Fátima

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família. Aos meus pais, Hélio e Maria de Fátima, pelo carinho, total apoio e pelos exemplos de vida, valores e ensinamentos passados ao longo dos anos. Aos meus dois irmãos, Thiago e Lucas, pela amizade e companheirismo. À minha avó, Circe, pelo zelo. Aos meus tios e primos Celso, Selene, Luiza, Ana Clara e Rodrigo, por fazerem da família a companhia mais aconchegante do mundo. Estes foram fundamentais na realização deste trabalho.

Ao orientador Prof. Rodrigo de Melo Porto, pela transmissão de valiosos conhecimentos, amizade, atenção e pela confiança em mim depositada ao ingressar em uma área ainda pouco explorada no Departamento de Hidráulica e Saneamento.

Ao Prof. Edson Cezar Wendland, pela amizade, pelo espaço e infraestrutura concedidos durante a etapa de classificação da imagem, além dos muitos momentos de confraternização.

Ao Prof. Antônio Conceição Paranhos Filho, pelo empurrão inicial, me incentivando a ingressar na área de sensoriamento remoto em áreas urbanas e por todo o ensinamento ainda durante minha graduação, o qual foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Ricardo Ernesto Schaal, do Departamento de Transportes da EESC/USP, pela ajuda com o georreferenciamento da imagem, pelos ensinamentos na área de posicionamento global e pela disponibilização da equipe de trabalho.

À Marjolly Priscilla Shinzato, pessoa fundamental em minha vida, minha namorada, futura esposa, incentivadora e companheira. Agradeço por toda a paciência, incentivo e ajuda prestada durante esta etapa da vida.

Aos amigos Rodrigo Dico, Aline, Taís, Drica e Patrick pelas horas de descontração e por trazerem a São Carlos um pedacinho de casa. Aos amigos e colegas de mestrado Vinícius Bidjei, Vitor Madruga, Guilherme Piu, Lenin, Thiago Mineiro, Thiago Marisco, Samuel e Ivan, agradeço por toda a amizade e por dividirem, com todos os amigos já citados, os

melhores momentos que passei em São Carlos. Agradeço também a todos os amigos não citados que tenham dividido algum momento de felicidade que tive nestes dois anos.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP: Sá, Pavi, Rose, André e Valdecir pela colaboração, prestatividade e boa vontade sempre que precisei.

Agradeço também a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma com este trabalho.

“O Homem deve elevar-se acima da Terra – ao topo da atmosfera e além – para assim
somente entender na totalidade o mundo em que vive”.

Sócrates - 500 A.C.

RESUMO

MARTINS, L. G. B. **Determinação de parâmetros hidrológicos por técnicas de sensoriamento remoto em macrodrenagem urbana**. 2012. 113f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Nos centros urbanos, as precipitações sempre estiveram ligadas a problemas como inundações e propagação de doenças. Para solucioná-los, é comum a realização de obras hidráulicas nos sistemas de drenagem urbanos. Para tanto, deve-se conhecer as condições da bacia hidrográfica e as consequências que qualquer alteração no ambiente pode causar. Portanto, modelos hidrológicos são utilizados na previsão do comportamento das bacias frente a eventos de precipitação, aumentando a eficácia das obras e diminuindo os riscos associados a estas. Para o uso de modelos, são necessários diversos parâmetros hidrológicos referentes à bacia, tais como área de drenagem, comprimento e declividade dos talwegues, tipo de cobertura de solo etc. Com o avanço da tecnologia, a determinação destes torna-se cada vez mais precisa, bem como os modelos utilizados, trazendo o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e o sensoriamento remoto como poderosas ferramentas de apoio a estudos hidrológicos. Neste trabalho, aplicou-se o processo de classificação automática supervisionada pelo método da Análise Orientada a Objeto a uma imagem de satélite de alta resolução da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, para caracterizar sua cobertura de solo e determinar os parâmetros hidrológicos número de deflúvio (CN, pelo método do SCS), grau de vegetação (PP), área (A), comprimento (L) e declividades dos talwegues (S) das sub-bacias que compõem a bacia, para as quais os resultados obtidos foram bastante satisfatórios. Por fim, atualizou-se o modelo hidrológico EESC (1993), referente ao sistema de macrodrenagem de São Carlos, obtendo-se hidrogramas finais com diferenças, em relação ao modelo original, de até 33,96% para vazão de pico (Q_p), 77,78% para tempo de pico (t_p) e 29,86% para volume total de escoamento.

Palavras-chave: Imagem de satélite. Alta resolução espacial. Bacia hidrográfica urbana. Cobertura do solo. Número de deflúvio. SIG.

ABSTRACT

MARTINS, L. G. B. **Determination of hydrological parameters by remote sensing techniques in urban macrodrainage.** 2012. 113p. Thesis (MA) - School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012.

In urban centers, precipitation always been related to problems such as floods and spread of disease. To solve them, it is common to make hydraulic interventions in the urban drainage systems. For this, it is necessary to know the conditions of the watershed and the consequences that any change in the environment can cause. Therefore, hydrological models are used to predict the river behavior in opposite to precipitation events, increasing the efficiency of the hydraulic interventions and reducing the associated risks to these. For the use of models, it is necessary to have several hydrological parameters related to the basin such as drainage area, river length, slope of the thalweg, type of soil cover etc. Trough the technological advancement, the parameter determination becomes more accurate as well as the models, and the Geographic Information System (GIS) and remote sensing appear as powerful tools to support hydrological studies. In this study, we have applied the automatic supervised classification process by the Object-Oriented Analysis method to a high resolution satellite image of the córrego do Gregório watershed, to classify soil coverage and to determine the hydrological parameters curve-number (CN by the SCS method), vegetation degree (PP), area (A), length (L), and slope of thalwegs (S) of the sub-basins of the córrego do Gregório watershed, for which the results were quite satisfactory. Finally, a hydrological model for the São Carlos macrodrainage system called EESC model (1993) was updated with the new parameters, obtaining final hydrographs with differences from the original model up to 33.96% for peak discharge (Q_p), 77.78% for peak time (t_p) and 29.86% for total volume of runoff.

Keywords: Satellite image. High spatial resolution. Urban watershed. Soil cover. Curve Number. GIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das consequências da urbanização na drenagem urbana.....	19
Figura 2 - Foto da Avenida São Carlos em 1938 e em 2011.....	20
Figura 3 - Relação entre casos de inundações e expansão da urbanização	20
Figura 4 - Diferença entre enchentes, inundações e alagamentos.....	23
Figura 5 - Ponto de alagamento na região do mercado municipal.....	24
Figura 6 - Ábaco para a obtenção do parâmetro K.....	28
Figura 7 - Método do hidrograma unitário sintético triangular.....	31
Figura 8 - Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto...37	
Figura 9 - Espectro eletromagnético e destaque na faixa visível a olho humano	40
Figura 10 - Assinatura espectral de alguns tipos de cobertura de solo.....	40
Figura 11 - Composição de uma imagem de satélite à partir das bandas espectrais	42
Figura 12 - Diferentes composições RGB para uma mesma imagem, com A em 321 (luz visível) e B em 421 (falsa-cor).....	43
Figura 13 - Diferentes combinações de bandas com A em 321, B em 453 e C em 543.....	44
Figura 14 - Diferenças entre resoluções espaciais de 2,4m (A) e 0,52m (B) em uma imagem urbana.....	44
Figura 15 - Imagem com resolução de 4 <i>bits</i> representada em <i>digital numbers</i> e em níveis de cinza	45
Figura 16 - Diferenças de resolução radiométrica em uma imagem de área urbana	45
Figura 17 - Exemplo de localização de GCP (<i>ground control point</i> – ponto de controle ao solo) e suas coordenadas geográficas em imagem.....	47
Figura 18 - Resultado de uma classificação digital de área urbana	48
Figura 19 - Os três estágios da classificação automática supervisionada.....	49
Figura 20 - Imagem de uma parede de tijolos antes e depois da segmentação.....	51
Figura 21 - Exemplo da influência do parâmetro área na segmentação, sendo: 30 em A; 25 em B e; 15 em C....	52
Figura 22 - Definição de classes com hierarquia (A) e sem hierarquia (B)	53
Figura 23 - Metodologia da análise orientada a objeto.....	53
Figura 24 - Limite da área de estudo, bacia hidrográfica do córrego do Gregório, São Carlos, SP	56
Figura 25 - Hidrografia original do córrego do Gregório utilizada no Modelo EESC	56
Figura 26 - Imagem completa e pontos de controle ao solo para o presente trabalho	64
Figura 27 - Nova divisão das 12 sub-bacias do córrego de Gregório.....	65
Figura 28 - Hierarquias de classe para classificação de cobertura. O quadro A foi utilizado para a sub-bacia 42; o B para a sub-bacia 43; o C para as sub-bacias 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52 e 52; o D para a sub-bacia 51, a única que possuía a cobertura entulhos.....	69
Figura 29 - Plataforma do <i>software</i> Definiens e a sub-bacia 42.....	70
Figura 30 - Imagem da sub-bacia 49 destacando a vegetação em verde e a classificação vegetação/não vegetação	70
Figura 31 - Identificação dos solos que compõem a área de estudos utilizando-se o mapa pedológico da EMBRAPA.....	72

Figura 32 - Sensibilidade do Modelo EESC aos parâmetros CN e PP	76
Figura 33 - Análise de sensibilidade do modelo EESC aos parâmetros α e β	76
Figura 34 - Comparação entre os parâmetros α , β , CN e PP, analisados quanto à sensibilidade da vazão de pico do hidrograma.....	77
Figura 35 - Comparação entre os parâmetros α , β , CN e PP, analisados quanto à sensibilidade do tempo de pico do hidrograma.....	78
Figura 36 - Segmentação de uma área rural (bacia 42) e uma área urbana (bacia 48)	80
Figura 37 - Resultado da classificação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório	82
Figura 38 - Resultado do cálculo de CN nas sub-bacias hidrográficas do córrego do Gregório	86
Figura 39 - Comparação de hidrogramas entre o modelo EESC original e o atualizado	88
Figura 40 - Comparação de hidrogramas entre o modelo EESC original e o atualizado parcialmente (apenas os parâmetros CN, PP, L e S).....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e funções das bandas de imagens de satélite.....	41
Tabela 2 - Matriz de decisão para escolha do <i>software</i> a ser usado na classificação da imagem de satélite, parâmetros avaliados e desempenho das opções.....	60
Tabela 3 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.....	61
Tabela 4 - Número de hidrogramas gerados na análise de CN e PP.....	62
Tabela 5 - Faixas de variação e incrementos na análise de α e β	62
Tabela 6 - Número de hidrogramas gerados na análise de α e β	62
Tabela 7 - Tipos e exemplos de coberturas escolhidas para a análise orientada a objeto	66
Tabela 8 - Valores de segmentação utilizados em cada sub-bacia do córrego do Gregório	68
Tabela 9 - Número de deflúvio para cada tipo de cobertura	72
Tabela 10 - Resultado da matriz de decisão.....	74
Tabela 11 - Coordenadas dos pontos obtidas por GPS e pela imagem de satélite.....	79
Tabela 12 - Área de cada cobertura em cada uma das 12 sub-bacias do córrego do Gregório.....	84
Tabela 13 - Resultados obtidos após processamento de dados em ambiente SIG	85
Tabela 14 - Valores de α e β obtidos por Lira (2003).....	86
Tabela 15 - Comparação entre parâmetros do modelo original e os parâmetros atualizados	87
Tabela 16 - Variação nos resultados do modelo original para o modelo atualizado	89
Tabela 17 - Variação nos resultados do modelo original para o modelo atualizado parcialmente (apenas os parâmetros CN, PP, L e S).....	92

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS	18
3.2 A URBANIZAÇÃO E AS INUNDAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS	19
3.3 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA E SUA EVOLUÇÃO	21
3.4 INUNDAÇÕES URBANAS	23
3.4.1 Medidas estruturais e não-estruturais	24
3.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	25
3.5.1 Modelos hidrológicos	26
3.5.1.1 Método racional.....	27
3.5.1.2 Método SCS.....	29
3.5.1.2.1 Hidrograma unitário do SCS	30
3.5.2 Modelo EESC.....	31
3.5.2.1 Propagação de cheias: método da onda cinemática	32
3.5.2.2 Arquivo de dados chuvad.....	34
3.5.2.3 Arquivo de dados dredad	35
3.5.2.4 Arquivo de dados subdad.....	35
3.5.2.5 Arquivo de dados tredad.....	35
3.5.2.6 Dados de entrada do modelo EESC	36
3.6 SENSORIAMENTO REMOTO	37
3.6.1 Imagens de satélite e suas características.....	38
3.6.2 Espectro eletromagnético	39
3.6.3 Resolução das imagens	41
3.6.3.1 Resolução espectral.....	41
3.6.3.1.1 Composição falsa-cor.....	43
3.6.3.2 Resolução espacial	44
3.6.3.3 Resolução radiométrica	45
3.6.3.4 Resolução temporal	46
3.7 TRATAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE	46
3.8 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITE	47
3.8.1 Classificação tradicional.....	48

3.8.1.1 Classificação não-supervisionada.....	48
3.8.1.2 Classificação supervisionada	49
3.8.2 Análise orientada a objeto (AOO).....	49
3.8.2.1 Segmentação	50
3.8.2.2 Classificação.....	53
4 METODOLOGIA	55
4.1 ÁREA DE ESTUDO	55
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS NO TRABALHO	57
4.2.1 Material cartográfico	57
4.2.2 Softwares.....	58
4.2.2.1 Escolha do software para classificação de imagem.....	59
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	60
4.3.1 Parâmetros referentes à cobertura do solo	61
4.3.2 Parâmetros referentes à seção dos canais de macrodrenagem	62
4.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DA IMAGEM DE SATÉLITE	63
4.4.1 GCP - pontos de controle ao solo	63
4.4.2 Preparação da imagem final	64
4.5 CLASSIFICAÇÃO POR ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO	65
4.5.1 Definição dos tipos de cobertura de solos.....	65
4.5.2 Segmentação da imagem.....	67
4.5.3 Classificação da imagem e redes hierárquicas para cada sub-bacia	68
4.6 GEOPROCESSAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS HIDROLÓGICOS	71
4.6.1 Cálculo do número de deflúvio (CN) e grau de vegetação (PP)	71
4.6.2 Obtenção dos demais parâmetros hidrológicos por geoprocessamento	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 SOFTWARE ESCOLHIDO.....	74
5.1.1 O software Definiens Developer.....	75
5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	75
5.3 PROCESSAMENTO DA IMAGEM E ANÁLISE ORIENTADA A OBJETOS	79
5.3.1 Pré-processamento da imagem de satélite.....	79
5.3.2 Segmentação	79
5.3.3 Classificação da imagem de satélite	81
5.3.4 Obtenção dos parâmetros hidrológicos	85
5.4 ATUALIZAÇÃO DO MODELO EESC	86
5.4.1 Comparação entre o modelo EESC original e o atualizado.....	87
6 CONCLUSÃO	93
7 RECOMENDAÇÕES	95

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
APÊNDICE A - Hidrogramas da análise de sensibilidade	106
APÊNDICE B - Resultados para solo do tipo hidrológico A	108
APÊNDICE C - Resultado da classificação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório	111
APÊNDICE D - Imagem detalhada da bacia hidrográfica do córrego do Gregório	113

1 INTRODUÇÃO

Desde o início das cidades, a ocorrência das precipitações está associada a problemas como inundações, erosões, propagação de doenças, entre outros. Alguns são naturais, como as enchentes de rios ou alguns casos de inundações. Porém, alterações antrópicas no meio contribuem para o aumento desses episódios e dos prejuízos que estes causam. Este aumento geralmente é consequência da impermeabilização de superfícies e ocupação de áreas impróprias como planícies de inundação, várzeas e encostas de morro. Para a mitigação desses impactos, são comuns intervenções nos sistemas de drenagem urbanos através da realização de obras hidráulicas.

Apesar do avanço tecnológico e do surgimento de novas linhas de pensamento na área de drenagem urbana, no Brasil ainda se trabalha sobre o sistema clássico de drenagem urbana, que visa o escoamento da precipitação o mais rápido possível para fora da bacia hidrográfica e, atualmente, grande parte dos esforços na área concentra-se ainda na solução de problemas de drenagem urbana. Portanto, as soluções mais utilizadas para casos de inundações, enchentes e alagamentos urbanos surgem na forma de obras hidráulicas nas redes de micro e macrodrenagem como, por exemplo, a construção de reservatórios de retenção e retenção, diques de contenção de cheias ou mesmo aumento de leito de rios ou canalização, visando a solução de problemas locais. As novas linhas de pensamento são focadas em prevenção e planejamento através, por exemplo, de zoneamento urbano, seguros contra inundações e controle de escoamento na fonte e/ou através dispositivos de infiltração e de retenção instalados nas bacias hidrográficas, além do amplo emprego de tecnologias que permitem o desenvolvimento urbano com baixo impacto hidrológico. Desta forma, estas novas linhas de pensamento visam atuar em toda a bacia hidrográfica obtendo melhores resultados e promovendo sistemas de drenagem urbano sustentáveis.

De forma geral, antes de qualquer intervenção, é necessário amplo conhecimento das condições da bacia hidrográfica e das consequências de alterações nesse meio. Surge assim a necessidade do uso de modelos hidrológicos – representações matemáticas das bacias

hidrográficas – como importantes ferramentas na área da drenagem urbana. Para países como o Brasil, com escassez de dados fluviométricos, os modelos do tipo chuva-vazão representam ferramentas essenciais em trabalhos de hidrologia urbana. Estes possibilitam a previsão de vazões em uma bacia hidrográfica a partir de séries de precipitações e de parâmetros hidrológicos específicos. Desta forma, os modelos hidrológicos auxiliam o poder público na tomada de decisões e projeção de situações futuras na bacia hidrográfica, dando suporte à solução de problemas e a planejamentos em longo prazo.

Para a utilização de modelos, são necessários diversos parâmetros hidrológicos referentes às bacias, tais como área de drenagem, número de deflúvio, comprimento e declividade de talvegues, séries históricas de precipitação, entre outras. Entretanto, a determinação dos parâmetros de entrada de modelos hidrológicos envolve muitas incertezas, que ocorrem devido a três principais motivos: variabilidade natural das características da bacia; estrutura dos modelos, que podem não representar bem os processos envolvidos no escoamento; parâmetros de entrada, que podem ser incertos devido a vários fatores, entre os quais está a utilização de dados ruins (como precipitação e vazão) ou devido aos métodos de estimativa destes, onde pode-se citar o número de deflúvio (CN) do método SCS, que pode variar de acordo com o usuário e sua interpretação da bacia hidrográfica.

Com o avanço da tecnologia, a determinação dos parâmetros hidrológicos torna-se cada vez mais precisa, bem como os modelos utilizados. A associação de novas ferramentas e instrumentos técnicos ao uso de modelos hidrológicos é cada vez mais frequente, trazendo um conhecimento mais refinado das características das bacias e aumentando a precisão dos resultados. Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o Sensoriamento Remoto surgiram como poderosas ferramentas de apoio a estudos hidrológicos e à obtenção de dados sobre as bacias hidrográficas. Por isso, este trabalho utilizou sensoriamento remoto e SIG na identificação da cobertura do solo das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Gregório, a fim de se determinar o número de deflúvio, grau de vegetação, área de sub-bacias, comprimento e declividades de seus talvegues. Desta forma, foram obtidos parâmetros de entrada atualizados para o modelo hidrológico computacional EESC (1993), referente à rede de macrodrenagem da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, no município de São Carlos/SP.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Determinar as variáveis hidrológicas número de deflúvio (CN), grau de vegetação (PP), área (A), comprimento (L) e declividade dos talwegues (S) da bacia hidrográfica do córrego do Gregório e suas sub-bacias por meio de técnicas de sensoriamento remoto para atualização do modelo hidrológico EESC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a sensibilidade dos hidrogramas do modelo hidrológico EESC frente à quatro parâmetros hidrológicos: número de deflúvio (CN); grau de vegetação (PP); α e β .
- Escolher, através de uma matriz de decisão, um *software* de processamento digital de imagens de satélite para a realização dos trabalhos de classificação da imagem de satélite da bacia hidrográfica do córrego do Gregório;
- Identificar e quantificar os tipos de cobertura do solo da bacia hidrográfica do córrego do Gregório por meio de técnicas de sensoriamento remoto (análise orientada a objeto) a partir de uma imagem de satélite;
- Atribuir valores de número de deflúvio para cada tipo de cobertura de solo e calcular o CN médio e o grau de vegetação das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Gregório;
- Calcular as variáveis hidrológicas área (A), comprimento (L) e declividade dos talwegues (S) a partir de uma imagem de satélite e outros materiais cartográficos em ambiente SIG;
- Atualizar o modelo hidrológico EESC e comparar os resultados originais e atualizados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO E SEUS IMPACTOS

A urbanização representa uma das manifestações mais significativas da atividade humana (BERTONI; TUCCI, 2005). No Brasil já existem mais de 12 cidades com população superior a 1 milhão de habitantes. Dentre as cidades brasileiras, as de médio porte foram as que apresentaram maiores taxas de crescimento – superiores à das grandes cidades e à média nacional de 9,37% – nos últimos 10 anos (IBGE, 2010). A média da população urbana brasileira já ultrapassa 80%, número muito acima da média mundial. De acordo com o Censo 2010, a população do estado de São Paulo cresceu 10,8%, enquanto a do município de São Carlos cresceu 12,2% nos últimos 10 anos e contava, em 2010, com 219.865 habitantes. A densidade demográfica de São Carlos – 192,7 hab./km² – encontra-se acima da média do estado de São Paulo e do Brasil, 165,75 hab./km² e 22,2 hab./km² respectivamente (IBGE, 2010), o que revela um alto índice de urbanização.

Com o crescimento urbano, a superfície do solo é modificada, aumentando consideravelmente as áreas impermeáveis (LAZARO, 1990). Essa impermeabilização ocorre junto com o início da urbanização, geralmente nas áreas mais baixas, próximas a beiras dos rios, várzeas ou a beira-mar, em direção às colinas dos morros, visto a necessidade da população interagir com os recursos hídricos (CANHOLI, 2005). Com a elevação das taxas de urbanização e o aumento de impermeabilização, a parcela de água que infiltrava no solo ou escoava lentamente começa a escoar mais rapidamente e em maior volume (TUCCI, 2002). Essas alterações causam um desequilíbrio ambiental com reflexo em diversos aspectos, dentre eles a quantidade e a qualidade da água na bacia hidrográfica, como mostra a **Figura 1**.

Figura 1 - Fluxograma das consequências da urbanização na drenagem urbana (HALL, 1984 *apud* PORTO, 2004)

3.2 A URBANIZAÇÃO E AS INUNDAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS

Historicamente, a maioria das cidades surgiu às margens dos rios. São Carlos seguiu essa tendência e cresceu incorporando os seus vários cursos d'água. Por muitos anos desde a sua fundação, em 1857, a porção urbana de São Carlos se restringiu à sub-bacia do córrego do Gregório (CDCC, 2007). O início da ocupação da região, que mais tarde viria a se tornar o centro da cidade de São Carlos, ocorreu no entorno de onde se construiu a primeira capela, hoje, a Catedral São Carlos Borromeu, região que por muitos anos representou toda a área urbana da cidade, que posteriormente se expandiu ao sul do córrego do Gregório em direção à ferrovia recém instalada. O entorno do rio Monjolinho foi alcançado pela urbanização apenas a partir da década de 1940.

A cidade de São Carlos passou por algumas mudanças que ocasionaram um crescimento populacional grande em sua história. A primeira se deu quando da chegada da Companhia Paulista de Estrada de Ferro, por volta de 1880. Porém, a principal iniciou-se no ano de 1920, quando o eixo econômico da cidade passou de eminentemente agrícola para um significativo processo de industrialização, posteriormente acentuado pelo início da crise cafeeira (CDCC, 2007; JAMBERSI, 2008). Com o crescimento industrial cada vez mais acelerado e a falta de

incentivo para a população rural permanecer no campo, as décadas de 1960 e 1970 registram um crescimento da população urbana ainda mais expressivo.

O processo de urbanização trouxe mudanças ao aspecto original do córrego do Gregório. Seu leito natural foi bastante modificado na região central da cidade, tendo sido retificado em 1970 e canalizado em alguns trechos para construção de ruas, avenidas e bairros residenciais e comerciais (CDCC, 2007). Além disso, a cobertura de solos na cidade foi modificada, mesmo em regiões plenamente urbanizadas, aumentando a área impermeabilizada e, conseqüentemente, o escoamento superficial. A **Figura 2** mostra um exemplo da diferença da cobertura urbana da cidade entre os anos de 1938 e 2011, onde o pavimento de paralelepípedo foi substituído por asfalto.

Figura 2 - Foto da Avenida São Carlos em 1938 e em 2011

A urbanização da cidade de São Carlos se deu de forma desordenada, gerando conseqüências que perduram até os dias atuais. Registros históricos indicam que a região onde foi construído o Mercado Municipal sofria com casos de inundação e alagamentos desde a década de 40 (MENDES; MENDIONDO, 2007). A **Figura 3** compara a área urbanizada e as ocorrências de inundações na cidade de São Carlos à partir do ano de 1940.

Figura 3 - Relação entre casos de inundações e expansão da urbanização (MENDES; MENDIONDO, 2007)

3.3 SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA E SUA EVOLUÇÃO

O termo "drenagem urbana" refere-se ao conjunto de medidas que tenham por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, diminuir os prejuízos causados por inundações e possibilitar o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável (TUCCI, 2001). Os sistemas de drenagem urbana são separados em microdrenagem e macrodrenagem. A microdrenagem define-se como sistema de condutos pluviais em nível de loteamento ou rede primária urbana, onde fazem parte por exemplo as bocas de lobo, meios-fios, sarjetas, galerias pluviais e poços de visita (PORTO, 1998). Todo este sistema conduz a água aos sistemas de macrodrenagem, que correspondem à rede de drenagem natural das bacias, constituídas de córregos, riachos e rios localizados nos talwegues e vales (MARTINS, 1998).

Com o crescimento das cidades e consequentes alterações na bacia hidrográfica, os sistemas naturais de drenagem tornam-se insuficientes para escoar toda a água precipitada. A falta de planejamento urbano adequado leva a uma impermeabilização excessiva da bacia, aumentando o escoamento e sobrecarregando os sistemas de drenagem, exigindo alterações e obras nestes sistemas. Segundo Martins (1998), a demanda por interferências na macrodrenagem aparece à medida que são implantadas as obras de microdrenagem, as quais aumentam o volume escoado e diminuem o tempo de concentração, aumentando a vazão de pico da bacia. Porém, além da vazão, ocupação indevida de leitos secundários, aporte de sedimentos e resíduos sólidos urbanos também figuram entre as principais causas para alterações na macrodrenagem.

Durante o século XIX, quando o escoamento pluvial era tido como um problema de saúde pública, as obras de macrodrenagem foram guiadas por uma visão "higienista", que tinha por objetivo o escoamento mais rápido possível da precipitação, evitando-se assim água parada ou empossada – considerada passível de contaminação – e inundações locais (ANDOH, 2002). Em meados do século XX, com um acelerado processo de urbanização, o resultado foi a obsolescência gradual e inexorável das redes de drenagem, levando a inundações cada vez mais frequentes em áreas urbanas. Nessa época, as soluções propostas para o controle das inundações se concentravam na correção dos sistemas antigos através de soluções locais,

como ampliação das canalizações, implantação de novas obras e modificações nos cursos de água naturais por meio da retificação de trechos de rios ou revestimento de seus leitos (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2002). Desta forma, a rede de drenagem e as soluções propostas concentravam-se ainda em controle do escoamento e não no controle de geração de escoamento resultante. Entretanto, o uso de soluções locais mostra sérias limitações e, com a urbanização ainda em processo de expansão, a gama de soluções viáveis tende a se esgotar em algum momento. De forma geral, promover o transporte rápido do escoamento em meio à crescente impermeabilização do espaço urbano apenas transfere o problema, contribuindo para o aumento da ocorrência de inundações à jusante das áreas de atuação (WRIGHT; HEANEY, 2001).

Apenas no final do século XX, os profissionais da área de drenagem urbana soaram um apelo para que a maneira como a água pluvial fosse tratada nas cidades se assemelhasse mais ao modo natural de escoamento, ou seja, que se buscasse um modo de escoamento semelhante ao da bacia em suas características originais. Esse movimento teve ainda suporte no reconhecimento, por volta dos anos 70, de que água de drenagem não era tão limpa como se supunha, apresentando na realidade uma grande carga de poluição difusa e, seguindo a tendência mundial de aumento das preocupações com a preservação ambiental, surgiu um novo conceito “ambientalista” de drenagem urbana, no qual se propunha a retenção de escoamento na fonte, diminuindo assim também a geração de poluição difusa nas grandes cidades (ANDOH, 2002).

Desde então, discute-se este controle de escoamento na origem e a gestão adequada dos sistemas de drenagem, além do mais recente termo “drenagem sustentável”, que remete a uma abordagem mais holística nos sistemas de drenagem urbana, levando à abrangência das várias facetas da água em ambiente urbano, visando principalmente aspectos relacionados à preservação ambiental e convívio da comunidade com os corpos d’água (SILVA, 2006). Porém, apesar da consciência atual da eficiência e necessidade de abordagens alternativas, a prática corrente em relação ao fornecimento de infraestrutura urbana de água ainda segue a linha de abordagens convencionais, pois a vasta riqueza de conhecimento e guias técnicos são ainda centrados nos sistemas convencionais (IWUGO; ANDOH; FEEST, 2002).

3.4 INUNDAÇÕES URBANAS

Os termos enchentes e inundações são frequentemente utilizados equivocadamente por parte da população e muitas vezes também no meio científico. A palavra enchente refere-se ao caso em que o nível de água dos rios eleva-se até a altura de suas margens, porém sem transbordar. No caso de transbordamento, configura-se então uma inundação (MENDES, 2005). Podem ainda ocorrer casos de alagamentos, configurados pelo acúmulo de água nas margens ou em outras regiões da bacia hidrográfica devido à ineficiência da drenagem urbana ou topografia desfavorável, não sendo consequência do extravasamento do rio. Todos estes problemas afetam muitas cidades do Brasil e do mundo, porém as inundações ainda são a maior causa de destruição e perdas materiais (MENDES; MENDIONDO, 2007). A **Figura 4** ilustra os três casos.

Figura 4 - Diferença entre enchentes, inundações e alagamentos (DEFESA CIVIL SBS, 2011)

Na cidade de São Carlos, são comuns as ocorrências de inundações urbanas, principalmente na área ao redor do Mercado Municipal e no encontro dos córregos do Gregório e Monjolinho. Entretanto, já foram registrados casos de alagamentos em várias regiões da cidade, devido principalmente à drenagem ineficiente. A **Figura 5** retrata um caso de alagamento às margens do córrego de Gregório, caracterizado pelo não extravasamento ou saturação de sua calha. O plano de macrodrenagem de São Carlos (SHS, 2011) apresentou uma série de pontos com deficiência de drenagem no município, muitos deles na bacia do córrego do Gregório.

Figura 5 - Ponto de alagamento na região do mercado municipal (MENDES, 2005)

Para o controle de enchentes e inundações, é necessário o combate às causas na fonte e não somente nas suas consequências. Este tipo de controle deve acontecer de forma permanente, que deve ser mantido pela comunidade e governo visando a redução social e econômica dos impactos. No Brasil, não existem programas sistemáticos de controle de inundações que envolvam seus diferentes aspectos, o que se observa são ações isoladas por parte das cidades (TUCCI, 2002). Geralmente o mais próximo possível que se chega de uma solução é a criação de um plano diretor urbano, muitas vezes limitado a algumas áreas do conhecimento. De forma geral, o controle de inundações envolve diversos tipos de medidas, que podem ser classificadas como estruturais e não estruturais.

3.4.1 Medidas estruturais e não-estruturais

As medidas estruturais de controle de inundações são aquelas que envolvem alterações no rio e nos sistemas de drenagem, geralmente obras hidráulicas como barragens, diques, canalização de trechos etc. Na maioria dos casos, estas têm caráter hidráulico-hidrológico e podem ser extensivas ou intensivas (BARBOSA, 2006). As medidas extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como modificação da cobertura vegetal no solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. Considera-se intensivas aquelas que agem mais diretamente sobre os problemas, como os diques e reservatórios (TUCCI, 2001).

Por medidas não-estruturais compreendem-se as de caráter preventivo e que não agem diretamente sobre o problema, sendo as principais o zoneamento urbano, sistemas de alerta ligados à defesa civil e seguros (TUCCI, 1998). Este zoneamento deve ser incorporado ao Plano Diretor das cidades e regulamentado por legislação. É ele quem define os tipos de ocupação para cada área e aquelas onde se deve desocupar, além também das áreas com o risco de inundações, áreas com capacidade de interferir nas cotas de cheia à montante e à jusante e áreas mais recomendadas para interferências de caráter estrutural, todas baseadas em eventos de cheia de tempo de retorno de 100 anos ou os maiores já registrados (BARBOSA, 2006). Sabe-se que o cumprimento do zoneamento urbano não é tão simples em cidades já consolidadas, porém, associado a outras medidas não-estruturais, espera-se que este reduza o problema de prejuízos por inundações em longo prazo.

Entretanto, não se pode achar que apenas um tipo de medida poderá controlar totalmente as inundações, as medidas sempre visam minimizar consequências, e não saná-las. Para o controle de inundação de forma eficiente torna-se necessária a associação de medidas estruturais e não-estruturais, de modo que garantam à população o mínimo de prejuízo possível além de possibilitar uma convivência harmoniosa com os corpos de água.

3.5 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial direto – ou precipitação excedente – é a parcela da precipitação total que escoar pela superfície do solo. Em tese, o fenômeno hidrológico pode ser descrito de maneira bastante simples; o excesso d'água da chuva que não é infiltrado no solo ou evaporado acumula-se inicialmente nas pequenas depressões do terreno para, em seguida, formar uma pequena lâmina d'água, concentrando-se em enxurradas e posteriormente em cursos de água maiores e mais bem definidos (SHS, 2011). Quem define qual o volume de água escoado e o infiltrado, no método SCS, é um parâmetro hidrológico chamado 'número de deflúvio' – referente ao tipo do solo e sua cobertura – que juntamente com precipitação e área da bacia definem o volume que será escoado em um evento chuvoso. Desta forma, o escoamento superficial depende do número de deflúvio e seu volume é diretamente proporcional ao grau de impermeabilização da bacia.

Com as influências antrópicas na bacia hidrográfica, são necessárias alterações no sistema de drenagem natural das bacias para adaptação à nova realidade da mesma, através de projetos de drenagem urbana. Uma análise criteriosa do escoamento superficial – incluindo determinação da vazão de pico, volume e forma do hidrograma – constitui um dos fatores de maior importância neste tipo de projeto (PORTO, 1998). Muitas vezes, para se simular o comportamento da bacia hidrográfica durante uma precipitação utiliza-se de modelos hidrológicos.

3.5.1 Modelos hidrológicos

Estudos hidrológicos envolvendo processos naturais complexos – como precipitação, escoamento superficial e infiltração – dependem de um grande número de fatores e de suas interações, o que dificulta sua análise quantitativa (PORTO, 1998). O modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida pela ciência para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e pode ser definido como “uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo” (MAIDMENT, 1993). A bacia hidrográfica é um sistema que, a partir da entrada de um estímulo (precipitação), responde através de uma saída (vazão escoada no exutório). Por representarem a bacia, os modelos hidrológicos funcionam da mesma maneira, respondendo através de uma saída (resultados) aos estímulos de entrada (parâmetros hidrológicos) (TUCCI, 2006).

Nas cidades brasileiras é comum a insuficiência ou inexistência de dados fluviométricos utilizados no dimensionamento de sistemas de drenagem. Por isso, um modelo de grande importância nestes casos é o chamado ‘chuva-vazão’. Estes calculam as vazões de uma bacia hidrográfica de forma indireta, ou seja, a partir de uma série de dados de precipitação. São usados para complementação de séries de dados de vazões, construção de hidrogramas sintéticos, previsão de cheias em tempo real e avaliação da ocupação do solo na bacia hidrográfica (FERRAZ; MILDE; MORTATTI, 1999). Contudo, a utilização destes modelos depende da disponibilidade de uma série de dados de precipitação consistente, além de diversos parâmetros físicos da bacia hidrográfica. Por isso, modelos como o método Racional e o método do *Soil Conservation Service* (SCS), que requerem poucos dados de entrada, tornaram-se comuns em estudos hidrológicos.

3.5.1.1 Método Racional

Vale lembrar que modelos chuva-vazão têm uma longa história e que os primeiros hidrólogos tinham um amplo conhecimento de processos hidrológicos, mesmo que os métodos que eles utilizavam fossem limitados pela escassez de dados e técnicas computacionais. Aproximadamente 150 anos atrás surgiu o primeiro modelo chuva-vazão amplamente utilizado, publicado pelo engenheiro irlandês Thomas James Mulvaney em 1851 (BEVEN, 2001). Este era o método racional que limitava-se a apenas uma equação (1).

$$Q_p = 0,278.C.I.A \quad (1)$$

Onde: Q_p - vazão máxima de escoamento (m^3/s)

C - coeficiente de deflúvio (adimensional)

I - intensidade média máxima de precipitação ($mm.h^{-1}$)

A - área da bacia (km^2)

O método calcula apenas a vazão de pico do hidrograma (Q_p), tendo como variáveis de entrada C, referente à cobertura do terreno, I, referente à precipitação e por último a área da bacia A. Este método aplica-se bem apenas a bacias pequenas, de no máximo $5km^2$ (WILKEN, 1978) e até hoje é amplamente utilizado em bacias menores que $2km^2$ (TUCCI, 1998). A hipótese central do método sugere que, em uma bacia sujeita a uma chuva de intensidade constante e distribuição uniforme, estabelece-se o regime de equilíbrio com a vazão máxima na seção de controle após a precipitação de duração igual ao tempo de concentração da bacia, o que garante que toda a bacia esteja contribuindo no momento de vazão máxima (FRANCO, 2004). Além disso, o método assume que a frequência com que ocorre esta vazão de pico é igual ao tempo de retorno da precipitação e que o coeficiente de deflúvio é o mesmo para todas as precipitações sobre a bacia (GENOVEZ, 1991).

O método sofreu diversas alterações durante os anos para aumentar as possibilidades de aplicação e a precisão dos resultados. Uma das mais famosas é conhecida como método de I-Pai-Wu (1963). O método aplica-se a bacias de 2 a $200km^2$, e sua apresentação é semelhante à do método racional, com a inclusão de um coeficiente K de distribuição espacial da chuva,

que pode ser obtido graficamente, em função da área da bacia e da duração da precipitação (**Figura 6**). A equação principal do método (2) é apresentada a seguir:

$$Q = \frac{C^* \cdot I \cdot A^{0,90}}{360} \cdot K \quad (2)$$

Figura 6 - Ábaco para a obtenção do parâmetro K (Adaptado de DAEE, 1994)

Porém, o coeficiente de escoamento C^* é estimado de forma diferente, levando em consideração o fator de forma da bacia, como mostram as equações 3 e 4.

$$C^* = \left(\frac{2}{1 + F} \right) \cdot C \cdot \left(\frac{2 + F}{4} \right) \quad (3)$$

$$F = \frac{L}{\sqrt{\frac{A}{\pi}}} \quad (4)$$

Onde: F - fator de ajuste relacionado com a forma da bacia

L - comprimento axial da bacia (km)

A - área da bacia (ha)

K - coeficiente de distribuição espacial da chuva

C - coeficiente de deflúvio (adimensional)

3.5.1.2 Método SCS

O método SCS foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS, 1975), que pertence ao Departamento Americano de Conservação de Solo Norte-Americano (USDA), representa um dos métodos de separação chuva-vazão mais usados no mundo, pois se aplica bem a casos onde não se dispõe de dados hidrológicos para determinar o escoamento superficial de forma direta em uma bacia hidrográfica. O SCS realizou trabalhos com o objetivo de estabelecer relações entre precipitação, escoamento superficial, vegetação, tipo e ocupação do solo. A popularidade do método está ligada diretamente a sua simplicidade, dependendo apenas de três variáveis: precipitação, umidade antecedente do solo e do complexo hidrológico solo-cobertura (SARTORI; LOMBARDI NETO; GENOVEZ, 2005). Apesar de originalmente ter sido desenvolvido para pequenas bacias rurais, o método tem sido adaptado com sucesso para bacias urbanas e aplica-se bem em áreas de 3km³ a 250km² (TOMAS, 2002). O método propõe um simples equacionamento relacionando a altura precipitada, a altura da lâmina escoada e o índice de armazenamento de água na bacia (5).

$$P_{ESDacum} = \frac{(P_{acum} - 0,2S)^2}{(P_{acum} + 0,8S)} , P_{acum} > 0,2S \quad (5)$$

Onde: $P_{ESDacum}$ - escoamento superficial direto acumulado (mm)

P_{acum} - precipitação acumulada de um evento (mm)

S - retenção potencial do solo (mm)

O método separa o escoamento superficial com base na capacidade de infiltração do solo, onde S é a capacidade máxima de infiltração, considerando-se que há escoamento apenas quando a precipitação supera 20% de S, ligando este parâmetro diretamente ao tipo de solo e sua cobertura. O cálculo de S (6) é feito pelo número de deflúvio ou número de curva (CN - *Curve Number*), um número adimensional.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

Os valores de CN foram estabelecidos a partir da análise empírica do escoamento superficial de pequenas bacias monitoradas pelo USDA e hoje se encontram tabelados (**ANEXO A**). O parâmetro, nas tabelas, depende basicamente do tipo do solo e das condições de seu uso e ocupação, porém, há ainda um fator de umidade antecedente a ser considerado (PONCE; HAWKINS, 1996). Estimou-se que a capacidade de armazenamento depende do volume precipitado num período de 5 a 30 dias antecedente a uma determinada chuva, portanto o SCS definiu três condições de umidade antecedente do solo para a determinação de CN e apresentou tabelas com a correspondência entre os CN para as três condições (**ANEXO A**), as quais são:

- Condição I: Solos secos - as chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm;
- Condição II: Situação média na época das cheias - as chuvas nos últimos 5 dias totalizaram entre 15 mm e 40 mm;
- Condição III: Solo úmido (próximo da saturação) - as chuvas nos últimos 5 dias foram superiores a 40 mm e as condições meteorológicas foram desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

No Brasil vários pesquisadores estudaram uma adaptação da classificação dos solos proposta pelo SCS para os tipos de solos brasileiros, dentre eles Setzer e Porto (1979), Lombardi Neto et al. (1989) e Kutner, Conte e Nitta (2001). Uma das mais recentes foi realizada por Sartori (2004) baseada em estudos anteriores, que corroborou com a classificação de Lombardi Neto et al. (1989), porém propôs uma extensão dessa classificação com nova nomenclatura no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, com base nos solos observados no Estado de São Paulo.

3.5.1.2.1 Hidrograma unitário do SCS

Para a propagação do escoamento gerado em toda a área da bacia até o rio o método SCS propõe o uso do Hidrograma Unitário Sintético Triangular (HUST), baseado no valor de vazão de pico (Q_p) e tempo de pico (t_p). Este admite um hidrograma de cheia em formato triangular, no qual área do triângulo corresponde ao volume de água escoado sobre a bacia. A **Figura 7** apresenta um típico HUST.

Figura 7 - Método do hidrograma unitário sintético triangular

O tempo de base (t_b) e o tempo de ascensão (t_a) são obtidos a partir das equações 7 e 8.

$$t_b = 2,67 \cdot t_a \quad (7)$$

$$t_a = t_r + d/2 \quad (8)$$

Onde: t_b - tempo de base (min)
 t_a - tempo de ascensão (min)
 t_r - tempo de retardamento da bacia (min)
 d - duração da chuva (min)

O tempo de retardamento da bacia corresponde tempo entre o instante correspondente à metade da duração da chuva e o instante da vazão de pico. Para se obter t_r , utiliza-se a equação 9, que calcula o tempo de pico (t_p) à partir do tempo de concentração (t_c).

$$t_p = 0,6 \cdot t_c \quad (9)$$

3.5.2 Modelo EESC

O modelo hidrológico EESC é um modelo computacional desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP, por Righetto, Porto e Villela (1994), para lidar com problemas de drenagem nas bacias hidrográficas dos córregos Monjolinho e Gregório. O

modelo tem caráter hidráulico-hidrológico, específico para a cidade de São Carlos, e foi criado como uma ferramenta de fácil entendimento e utilização para aplicações locais. A área abrangida pelo modelo é de aproximadamente 76km², dividida em 54 sub-bacias, 54 trechos principais e 34 tramos. Desta maneira o modelo permite que se simule o hidrograma de cheia em função do tempo de retorno e duração da precipitação, em qualquer ponto da rede de drenagem. Além disso, permite ainda a simulação de cenários fictícios, aceitando a alteração de seus parâmetros de entrada para prever hidrogramas de situações futuras de urbanização e retificação de canais. Portanto, o modelo EESC representa uma ferramenta de grande interesse para o planejamento da rede de macrodrenagem urbana.

Dividido em três partes, o modelo primeiramente define a configuração da rede de drenagem, acoplando todas as sub-bacias e seus respectivos nós e redes de canais. Na sua segunda parte, utiliza o método do *Soil Conserveation Service* na separação de chuva-vazão e geração dos hidrogramas das sub-bacias, onde a estimativa do escoamento superficial é basicamente uma função da precipitação de projeto e do número de deflúvio (RIGHETTO; PORTO; VILLELA, 1994). Por fim, utiliza o método da onda cinemática para simulação da propagação da onda de cheia, possibilitando a obtenção dos hidrogramas de cheia ao longo de toda a bacia.

Por ser um modelo computacional, o EESC é constituído de um programa principal denominado EESC, que utiliza 2 sub-rotinas – uma para o método SCS e outra para a propagação de cheias – e quatro arquivos de dados chamados CHUVAD, DREDAD, SUBDAD e TREDAD (RIGHETTO; PORTO; VILLELA, 1994). A utilização do modelo é bastante simples, sendo requeridos como dados de entrada para uma simulação o tempo de retorno e a duração da chuva, além do local onde se deseja simular o hidrograma, podendo ser uma sub-bacia ou um tramo do canal. As funções e componentes de cada arquivo de dados do modelo encontram-se em capítulos subsequentes.

3.5.2.1 Propagação de cheias: Método da onda cinemática

O método da onda cinemática aplica-se bem a canais urbanos de declividade acentuada – como é o caso de São Carlos – e baseia-se na equação da continuidade e na relação funcional entre seção molhada e vazão. As equações que descrevem o modelo de onda cinemática são a

equação da conservação da quantidade de movimento e a equação da continuidade e a equação utilizada no modelo EESC (10) foi definida por Righetto; Porto; Villela (1994).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_m}{\partial t} = q \quad (10)$$

Cada trecho de canal é hidraulicamente definido por meio de dois parâmetros (α e β) que relacionam área molhada (A_m) e vazão (Q) – equação 11.

$$A_m = \alpha \cdot Q^\beta \quad (11)$$

Os parâmetros α e β são obtidos a partir da geometria da seção do canal, declividade de fundo (I) e do coeficiente de rugosidade (n) da equação de Manning. Esta equação é válida para escoamentos permanentes, uniformes e turbulentos rugoso, com grande número de Reynolds (PORTO, 2006). A seguir encontra-se a dedução dos parâmetros α e β do modelo EESC a partir da equação principal de Manning, dada pela equação 12.

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I}} = A_m \cdot R_h^{2/3} \quad (12)$$

Como o raio hidráulico (R_h) corresponde à relação entre a área molhada da seção (A_m) e o perímetro molhado (P_m), pode-se substituir a relação $R_h = A_m / P_m$ na equação 12, obtendo-se a equação 13.

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I}} = \frac{A_m^{5/3}}{P_m^{2/3}} \quad (13)$$

Introduzindo-se a_1 e b_1 como parâmetros específicos dos canais, a área molhada e o perímetro molhado se relacionam por meio da equação 14.

$$P = a_1 \cdot A_m^{b_1} \quad (14)$$

Substituindo-se a equação 14 na equação 13, obtém-se a equação 15.

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I}} = \frac{A_m^{5/3}}{(a_1 \cdot A^{b_1})^{2/3}} \quad (15)$$

Que após algumas operações matemáticas encontra sua fórmula final representada pela equação 16.

$$A_m = \left(\frac{n \cdot Q}{\sqrt{I}} \cdot a_1^{2/3} \right)^{\frac{3}{5-2b_1}} \cdot Q^{\frac{3}{5-2b_1}} \quad (16)$$

Desta forma, ao fim do processo, encontram-se os parâmetros α (equação 17) e β (equação 18).

$$\alpha = \left(\frac{n}{\sqrt{I}} \cdot a_1^{(2/3)} \right)^{\beta} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{3}{(5 - 2b_1)} \quad (18)$$

Por fim, utiliza-se os parâmetros α , β , comprimento do trecho de canal, intervalo de tempo, vazão de base e hidrograma de entrada para calcular a propagação de cheia no canal.

3.5.2.2 Arquivo de dados CHUVAD

O arquivo CHUVAD alimenta o modelo com dados da chuva de projeto desejada, dependendo do tempo de retorno e duração da chuva escolhidos, são variáveis da sub-rotina:

NTEMP - número de intervalos de tempo

TR - período de retorno (anos)

DC - duração da chuva (horas)

D - intervalo de tempo (horas)

XK, B, C, T0 - parâmetros da equação intensidade-duração-frequencia (IDF) do modelo, expressa pela equação 19.

$$i = \frac{XK.TR^B}{(60.DC + T0)^C} \quad (19)$$

3.5.2.3 Arquivo de dados DREDAD

Responsável pela configuração da rede de drenagem possui os dados do número de trechos e seções por tramo, indicando quais estão conectados entre si e suas respectivas sub-bacias. São parâmetros deste arquivo:

NTR - número de tramos da rede de canais principais

NS(I), I=1, NTR - número de seções por tramos

J1(I), J2(I), I=1, NTR - dois possíveis tramos de montante conectados diretamente com o tramo I. O número zero indica ausência de tramo à montante

NSB (I,J), I=1, NTR e J=1, NS(I) - número de sub-bacias acopladas a um nó ou seção J do tramo I; no máximo, três sub-bacias podem estar acopladas a uma seção

3.5.2.4 Arquivo de dados SUBDAD

Possui os dados referentes às sub-bacias, como o número de deflúvio, comprimento do talvegue, grau de cobertura de vegetação e área de drenagem, definidos pelos parâmetros:

IISUB - número da sub-bacia

N - número de deflúvio

L - comprimento do talvegue ou do percurso principal do escoamento na sub-bacia (km)

PP - grau de vegetação da sub-bacia

S - declividade média do talvegue da sub-bacia

A - área de drenagem da sub-bacia (km²)

3.5.2.5 Arquivo de dados TREDAD

Contém os dados dos trechos da rede de canais, sendo eles:

NT - número do tramo da rede de canais

I - número do trecho

ALF - valor de α

BET - valor de β

DDX - comprimento do trecho I (m)

3.5.2.6 Dados de entrada do Modelo EESC

A maioria dos dados contidos nas sub-rotinas do modelo EESC provém de estimativas da época do ano de sua publicação (1994), feitas a partir de observações visuais da área, visitas a campo e material cartográfico disponível. Porém, além destes dados, o modelo utiliza ainda alguns dados e equações originários de outras publicações. O tempo de concentração (t_c) das sub-bacias é calculado pela equação de George Ribeiro (20) (AZEVEDO NETTO; VILLELA, 1969). Os dados de precipitação vêm da equação IDF de Barbassa (21) (1991) para a região de São Carlos.

$$t_c = \frac{16 \cdot L}{(1,05 - 0,2PP)(100 \cdot I)^{0,04}} \quad (20)$$

Onde: L - comprimento do talvegue (km)

PP - grau de vegetação da bacia

I - declividade média do percurso (m/m)

$$i = \frac{1519 \cdot Tr^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}} \quad (21)$$

Onde: Tr - tempo de retorno (anos)

t - duração da chuva (minutos)

i - intensidade média da precipitação (mm/h)

3.6 SENSORIAMENTO REMOTO

Sensoriamento Remoto (SR) pode ser definido como conjunto de técnicas destinado à obtenção de informações sobre objetos sem que haja contato físico com eles (NOVO; PONZINI, 2001). A maior fonte de informações, sem dúvidas, é proveniente da energia eletromagnética emitida pelos objetos, porém estes também emitem diversos outros tipos de energia. Como a definição apresentada é bastante ampla, as diversas áreas profissionais que utilizam SR adaptaram, ao longo dos anos, uma definição mais adequada ao uso que fazem da ferramenta. Como exemplo, temos os geólogos que relacionam em sua definição, além da energia eletromagnética, os campos magnético e gravimétrico naturais. Agrônomos e oceanógrafos preferem restringir o conceito apenas à energia eletromagnética, e no caso mais extremo, alguns autores incluem como parte integrante do sensoriamento remoto os sensores que operam com energia acústica, como sonares e sismógrafos, e até mesmo gravitacional, como gravímetro (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008; NOVO, 2008).

Tendo em vista que a energia eletromagnética se propaga no vácuo a uma velocidade de 3×10^8 m/s em direção ao sensor, ela se constitui no mais útil campo de força para a atividade de sensoriamento remoto, formando um meio de transferência de informação em alta velocidade entre as substâncias ou objetos de interesse do sensor (NOVO, 2008). Podemos então, a partir de agora e de acordo com os interesses desta pesquisa, definir o sensoriamento remoto como a obtenção de dados ou imagens de um objeto que está distante do sensor de amostragem, a partir de sua interação com a energia eletromagnética. Isto inclui fotos aéreas, imagens de satélite e radar, entre outras. Para melhor compreender esta definição, faz-se necessário identificar os quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto, os quais podem ser representados através do esquema apresentado na **Figura 8**.

Figura 8 - Esquema representativo dos quatro elementos fundamentais das técnicas de sensoriamento remoto

No centro do esquema encontra-se a Radiação Eletromagnética (REM), elemento que liga todos os demais que se encontram nos vértices. Por Fonte, entende-se o Sol, principal origem de energia para o SR; o Alvo é representado pelos objetos dos quais se deseja obter informações e; o Sensor é representado pelo instrumento capaz de coletar e registrar a REM refletida ou emitida pelo objeto (NOVO, 2008).

3.6.1 Imagens de satélite e suas características

Desde o lançamento do primeiro satélite, em outubro de 1957, pelos russos, a trajetória do sensoriamento remoto caminhou quase que exclusivamente para o uso de imagens de satélite. Hoje, milhares de satélites habitam a órbita terrestre com as mais diversas finalidades, porém as principais são: comunicação; meteorologia; astronomia; posicionamento global (GPS) e; observação terrestre. Neste trabalho todos os satélites citados serão de observação de recursos ambientais com fins de sensoriamento remoto.

As imagens destes satélites representam hoje a maior fonte de dados em trabalhos de sensoriamento remoto. Apesar das fotografias aéreas ainda representarem o “estado da arte” para a produção cartográfica de detalhe, o uso de imagens de satélites apresenta muitas vantagens sobre outros tipos de fontes de dados, dentre elas (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008):

- **Custo** - o custo das imagens por quilômetro quadrado é menor do que de imagens aéreas e levantamentos de campo;
- **Disponibilidade** - além da abundância de satélites, os quais muitos possuem grande poder de armazenamento de imagens, é relativamente rápido programar a amostragem de uma determinada região para a obtenção de uma imagem atualizada. Além disso, os satélites revisitam a mesma área de tempos em tempos, o que facilita trabalhos de monitoramento;
- **Cobertura** - atualmente os satélites alcançaram uma cobertura praticamente global, permitindo o imageamento desde as regiões de mais difícil acesso àquelas mais remotas do globo;

- **Aplicabilidade** - as imagens de satélite podem ser usadas para diversos fins, como meio ambiente, agricultura ou clima. Além disso, uma mesma imagem de satélite pode ser aplicada em diferentes tipos de estudos ou levantamentos;
- **Formato digital** - quase todas as imagens de satélite são obtidas digitalmente, poupando assim o tempo e o dinheiro que seriam investidos na digitalização das mesmas, uma vez que a maioria dos trabalhos se dá com o uso de computadores e plataformas digitais.

Existem dois tipos de satélites, classificados quanto a sua órbita. São eles (LIU, 2007; PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008):

Geoestacionários ou geosincronizados - são satélites cuja órbita encontra-se sobre a linha do equador e sua velocidade de revolução coincide com a da Terra, dando a impressão de que estão parados sobre o mesmo ponto da superfície. Estes ficam em grandes altitudes – cerca de 37.000km de altitude – e são capazes de registrar imagens de grandes áreas, em escala continental. Podem registrar duas cenas da mesma área com diferença de minutos.

De órbita polar ou heliossíncronos - também chamados satélites sincronizados com o Sol. Possuem órbitas quase polares, a maioria em torno dos 700km de altitude. A maioria possui sensores sincronizados com o Sol, ou seja, passam sobre um mesmo ponto da superfície terrestre em um mesmo horário solar, tendo assim o mesmo ângulo de incidência solar para imagens da mesma região, mesmo que capturadas em momentos diferentes.

3.6.2 Espectro eletromagnético

O sensor disponível em satélites de observação capta a radiação eletromagnética emitida pela superfície do alvo em comprimentos de ondas bem específicos. Toda a matéria acima do zero absoluto (0°K) emite energia eletromagnética e pode ser considerada fonte de radiação (NOVO, 2008). A energia radiante proveniente do Sol em direção à Terra é chamada Fluxo Radiante. A configuração deste fluxo radiante é bastante complexa devido às grandes variações de temperatura que ocorrem na superfície do Sol e pela opacidade de certas regiões da atmosfera terrestre (SCHRADER; POUNCEY, 1997). Ao se capturar uma imagem por meio de interações eletromagnéticas, apenas uma parte do espectro desta radiação faz parte da

imagem, o que varia dependendo do tipo de sensor usado. A **Figura 9** apresenta a faixa conhecida do espectro eletromagnético.

Figura 9 - Espectro eletromagnético e destaque na faixa visível a olho humano (Adaptado de HUNT, 2006)

Todos os tipos de cobertura – como rochas, florestas e água – absorvem uma porção específica do espectro eletromagnético, resultando numa “assinatura” distinta de radiação eletromagnética. Ao analisar-se uma imagem, conhecendo a faixa de absorção das coberturas, pode-se identificar, baseado na faixa espectral que este alvo emite ou reflete, qual tipo de cobertura este representa. Esta característica peculiar de cada objeto é chamada **assinatura espectral** (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). Contudo, alguns autores preferem utilizar o termo “padrão de resposta”, uma vez que o termo assinatura espectral pode levar a falsa interpretação de que determinados elementos tenham uma resposta espectral única e absoluta (LILLESAND; KIEFER, 2004). A **Figura 10** apresenta a resposta espectral de alguns tipos de cobertura.

Figura 10 - Assinatura espectral de alguns tipos de cobertura de solo (JENSEN, 2000)

3.6.3 Resolução das imagens

De forma geral, o que difere uma imagem de satélite de outra é o tipo de sensor que as captura. Para se diferenciar estas imagens deve-se conhecer o conceito de resolução. Schrader e Poncey (1997) citam que o termo resolução mais empregado refere-se à área real que o *pixel* representa na imagem. Porém, na realidade existem 4 tipos de resolução, espectral, espacial, radiométrica e temporal.

3.6.3.1 Resolução espectral

A resolução espectral determina qual o intervalo do espectro eletromagnético capturado na imagem. Este espectro é dividido em faixas, chamadas de bandas. As três cores básicas vermelho, verde e azul, correspondem às bandas 3, 2 e 1, respectivamente. As bandas 4, 5 e 6 são representam espectro infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal, respectivamente. Por fim, a banda 7 representa o infravermelho de ondas longas e a banda 8 representa a banda pancromática, formada apenas por níveis de cinza.

Uma imagem de satélite é composta por diversas bandas e cada uma tem suas características e funcionalidades. Na **Tabela 1**, são apresentadas as características de cada banda. Vale ressaltar que as bandas têm as mesmas funções em todos os satélites, porém o intervalo espectral que cada uma representa pode apresentar uma pequena diferença, geralmente não mais que 0,02 μ m, entre um satélite e outro.

Tabela 1 - Características e funções das bandas de imagens de satélite (adaptado de INPE, 2004) (*continua*)

Banda	Intervalo espectral	Características e aplicações
1	Azul 0,450 - 0,520 μ m	Útil para mapeamento de águas costeiras, diferenciação entre solo e vegetação, mapeamento de florestas e detecção de feições culturais (mancha urbana, rodovias, etc.), entre outras.
2	Verde 0,520 - 0,600 μ m	Grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando análise qualitativa. Corresponde à reflectância da vegetação verde e sadia. Útil para identificação de feições culturais.
3	Vermelho 0,630 - 0,690 μ m	Útil para discriminação entre espécies de plantas e delinear solo e feições culturais. Permite um bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação, como solo exposto, estradas e áreas urbanas. Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal, como campo, cerrado e floresta. Utilizada para delimitar a mancha urbana e identificar áreas agrícolas.

Tabela 2 - Características e funções das bandas de imagens de satélite (adaptado de INPE, 2004) (*conclusão*)

Banda	Intervalo espectral	Características e aplicações
4	Infravermelho próximo 0,760 - 0,900 μm	Permite estimar a quantidade de biomassa de vegetação presente em uma cena. É útil para identificação de culturas agrícolas, enfatizando a diferenciação solo/agricultura e água/solo. Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia.
5	Infravermelho médio 1,550 - 1,750 μm	Sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar o stress hídrico da vegetação. Pode ser usada para discriminação entre nuvens, neve e gelo.
6	Infravermelho termal 10,40 - 12,50 μm	Apresenta sensibilidade nos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água. Útil para avaliações de stress em plantas, intensidade de calor, aplicações de inseticida e estudos de atividade geotermal.
7	Infravermelho médio 2,080 - 2,350 μm	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Útil para a discriminação de tipos de rochas e estudo de solos, como também para estudar o conteúdo da umidade e da vegetação do solo.

Apesar da existência de diversas bandas espectrais, o olho humano é capaz de enxergar apenas as três cores básicas vermelho, verde e azul. Todas as outras cores que enxergamos são resultado da combinação destas cores entre si. Em uma imagem de satélite, as cores também são formadas pelas três cores básicas, denominadas na área de sensoriamento remoto de RGB (*Red, Green and Blue*), que sozinhas são responsáveis pela composição de todas as imagens coloridas (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). Para que a imagem tenha cores semelhantes àquelas enxergadas pelo olho humano, deve-se compor a imagem com a combinação R3G2B1, ou seja, banda 3 representada na cor vermelha (*Red*), banda 2 representada na cor verde (*Green*) e a banda 1 representada pela cor azul (*Blue*), e esta combinação recebe o nome de **Luz visível**. É comum também que se denomine composição das cores da imagem apenas com o número das bandas, representadas na mesma ordem que a composição RGB, portanto para a combinação R3G2B1 utiliza-se apenas o nome composição 321. A **Figura 11** ilustra como é formada uma imagem de satélite à partir da combinação das bandas.

Figura 11 - Composição de uma imagem de satélite à partir das bandas espectrais

Apesar do olho humano não enxergar além do espectro RGB, para facilitar a fotointerpretação de imagens, o operador do sistema pode combinar diferentes bandas na composição RGB, em um artifício chamado composição falsa-cor.

3.6.3.1.1 Composição falsa-cor

Estão enquadradas na composição falsa-cor todas as combinações RGB diferentes da luz visível (321). Utiliza-se este artifício para realçar algumas feições da imagem com base nas diferentes faixas de absorção eletromagnética de cada objeto real da imagem. Um exemplo muito utilizado e muito útil é a composição 421, utilizada para realçar a vegetação da imagem. Como a vegetação absorve muita radiação eletromagnética na faixa do infravermelho próximo (banda 4), nesta banda toda a vegetação recebe um *digital number* bastante diferenciado das demais coberturas e portanto fica em destaque na imagem. Quando se compõe a imagem com a combinação 421, a banda infravermelho próximo é representada na cor vermelha e toda a vegetação destaca-se nessa mesma cor (**Figura 12**).

Figura 12 - Diferentes composições RGB para uma mesma imagem, com A em 321 (luz visível) e B em 421 (falsa-cor) (adaptado de BATISTA; QUEIROZ, 2011)

Diferentes combinações de bandas podem ser utilizadas em RGB – dependendo somente da disponibilidade de bandas na imagem que se possui – e cada uma possui uma função diferente e, para se criar uma combinação, pode-se guiar pelas informações apresentadas na **Tabela 1**. Como outros exemplos, Lillesand e Kiefer (2004) afirmam que a composição 754 simula as cores obtidas em fotografias infravermelhas. Crósta (1998) exemplifica um uso histórico, afirmando que durante a 2ª guerra mundial, logo após a criação dos filmes coloridos

infravermelhos, utilizava-se a combinação 432 para distinguir-se camuflagem de vegetação verdadeira. O mesmo autor afirma ainda que não se deve aceitar “receitas prontas” de combinações, pois as bandas variam de um sensor para outro, de modo que uma determinada combinação pode apresentar diferenças entre as imagens de satélites distintos. A **Figura 13** apresenta mais dois exemplos de combinações falsa-cor, além da luz visível.

Figura 13 - Diferentes combinações de bandas com A em 321, B em 453 e C em 543 (FLORENZANO, 2003)

3.6.3.2 Resolução espacial

Resolução espacial refere-se à área do solo representada por cada *pixel* da imagem. Atualmente os satélites são capazes de registrar imagens com alta resolução espacial como 0,52m no satélite *WorldView II* e 0,62m no satélite *Quickbird*. A **Figura 14** mostra a diferença entre uma mesma imagem em resolução 0,52 e 2,4 metros. Pela imagem nota-se uma clara diferença entre os níveis de detalhamento da cena urbana.

Figura 14 - Diferenças entre resoluções espaciais de 2,4m (A) e 0,52m (B) em uma imagem urbana

3.6.3.3 Resolução radiométrica

Refere-se à capacidade do sensor em detectar as variações da radiância espectral recebida. A radiância de cada pixel passa por uma codificação digital e recebe valor numérico, denominado de *digital number* (DN) (SCHOWENGERDT, 1997). Desta forma, cada pixel da imagem possui um número que representa a radiação eletromagnética que este emitiu no instante da captura da imagem, expresso em níveis de cinza. Uma imagem pode possuir diversos níveis de cinza, que vão de 2 (somente preto e branco) a 2048 níveis. Este número de níveis de cinza está expresso em bits, ou seja, expresso em função do número de dígitos binários necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo de cinza. O seu valor é sempre em potência de 2, por exemplo 8 bits significam 256 níveis de cinza ($2^8=256$). As diferenças entre cinzas são mais visíveis nos níveis 2 e 4 do que nos níveis 256 e 2048, devido ao fato do olho humano não possuir sensibilidade às mudanças de intensidade acima de 30 níveis de cinza (CROSTA, 1998). A **Figura 15** demonstra como as imagens são formadas a partir de *digital numbers* e a **Figura 16** ilustra a diferença de níveis de informações entre diferentes resoluções radiométricas.

Figura 15 - Imagem com resolução de 4 bits representada em *digital numbers* e em níveis de cinza

Figura 16 - Diferenças de resolução radiométrica em uma imagem de área urbana (MELO, 2002)

3.6.3.4 Resolução temporal

Resolução temporal refere-se ao tempo necessário para que o satélite obtenha uma nova imagem do mesmo ponto da superfície terrestre. Este tempo está relacionado às características orbitais do satélite (altura, velocidade, inclinação) e ao ângulo total de abertura do sensor. A resolução temporal é de grande interesse especialmente em estudos relacionados a mudanças na superfície terrestre e no seu monitoramento (NOVO, 2008). Esta resolução é expressa em dias, por exemplo, a resolução temporal é de 2,9 dias para o satélite *Ikonos*, 16 dias para satélite *Landsat7* e 26 dias para o CBERS e para o SPOT (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008).

3.7 TRATAMENTO DE IMAGENS DE SATÉLITE

O tratamento de imagens refere-se ao conjunto de técnicas aplicadas a uma imagem de sensoriamento remoto para prepará-la para a extração de informações. A primeira dentre as diversas técnicas é o pré-processamento das imagens e refere-se à restauração quantitativa da imagem aplicando-se operações para a correção de imperfeições geométricas, radiométricas e/ou ruídos que aparecem no processo de aquisição da imagem (MELO, 2002). Se estes erros não forem corrigidos, pode-se ter uma imprecisão no processamento final da imagem e baixa qualidade de resultado. Portanto, o pré-processamento é a fase preparatória na qual a qualidade da imagem é aprimorada para a sua análise, fase em que serão extraídas as informações desejadas.

Durante a correção geométrica, processo no qual se atribui um sistema de coordenadas às imagens, são necessárias algumas informações do terreno a ser estudado, dentre as quais estão os GCP (*ground control point* – ponto de controle ao solo). Os GCP são pontos do terreno com coordenadas reais conhecidas, utilizados para correção geométrica e georreferenciamento de cartas e imagens. Estes GCP podem ser obtidos em levantamentos de campo com o auxílio de um aparelho de GPS ou extraídos de cartas topográficas (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). De acordo com Digital Globe (2004) existem dois tipos de GCP: os primários, obtidos diretamente em campo ou em um mapa e os secundários, obtidos

através de triangulações de outros GCP. A **Figura 17** mostra a localização de 11 GCP e suas respectivas coordenadas em uma imagem de satélite, onde são escolhidos pontos bastante visíveis na imagem e fáceis de serem identificados em campo, como finais de estradas (pontos 1 e 11), cruzamentos (ponto 9), divisas de campos cultivados (pontos 3 e 5), entre outros.

IMAGEM	X	Y
Ponto 01	689111,5	7755190,0
Ponto 02	682956,0	7755212,5
Ponto 03	683046,0	7750652,5
Ponto 04	689406,0	7751260,0
Ponto 05	684253,5	7754792,5
Ponto 06	688573,5	7753862,5
Ponto 07	684613,5	7754012,5
Ponto 08	686106,0	7751252,5
Ponto 09	687883,5	7752640,0
Ponto 10	683323,5	7752602,5
Ponto 11	686946,0	7754980,0

Figura 17 - Exemplo de localização de GCP (*ground control point* – ponto de controle ao solo) e suas coordenadas geográficas em imagem (Adaptado de PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008)

3.8 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITE

Segundo Lillesand e Kiefer (2004) é possível identificar objetos, de tamanho e forma variados, numa fotografia aérea ou imagem de satélite digital. Alguns são facilmente identificados, enquanto outros só são possíveis dependendo grau de percepção visual e conhecimento do intérprete. A interpretação visual de imagens consiste na identificação de objetos e o repasse desta informação a outros. Este processo de identificação dos objetos da imagem é chamado de classificação de imagem, e consiste basicamente em associar cada *pixel* da imagem a uma determinada classe que corresponde um objeto real da área imageada. Esta classificação pode ser feita manualmente, através de fotointerpretação, ou de forma automática.

Embora o olho humano seja um aparato ímpar no reconhecimento de cores e texturas, o processamento digital dessas informações só pode ser realizada por um computador. Desta forma a melhor maneira de se classificar uma imagem é por meio da associação das habilidades de um foto-intérprete e do computador, em um processo chamado classificação supervisionada de imagens (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). Entretanto, como nem sempre é possível se associar o conhecimento humano no processo, existem

métodos de classificações alternativos. De forma resumida, a classificação digital pode ser feita de duas maneiras: classificação tradicional, que inclui a supervisionada e a não supervisionada e; classificação orientada a objetos, também chamada de classificação por regiões. Para todas estas, como resultado final têm-se um mapa temático com as diferentes classes que compõem a cobertura do solo, que pode ser utilizado de formas distintas, como mapas temáticos, tabelas estatísticas ou ainda dados digitais, como insumos para um SIG. A **Figura 18** exemplifica o resultado de uma classificação de imagem digital.

Figura 18 - Resultado de uma classificação digital de área urbana (INTERIMAGE, 2011)

3.8.1 Classificação tradicional

Consideram-se tradicionais as técnicas de classificação cujo critério de decisão para alocar um pixel numa determinada classe baseia-se somente na distribuição dos níveis de cinza (representado pelo *digital number*) de cada *pixel* nas diversas bandas espectrais que compõem a imagem. A classificação dos *pixels* é feita através de métodos matemáticos – estatísticos e determinísticos – e pode ser dividida em dois tipos, não-supervisionadas e supervisionadas. A diferença básica entre ambas é que a primeira procura agregar os pixels em classes, de acordo com seus valores de cinza, enquanto a segunda utiliza-se de amostras de treinamento, escolhidas pelo foto-intérprete, para cada classe que se pretende identificar (LILLESAND; KIEFER, 2004).

3.8.1.1 Classificação não-supervisionada

A classificação não-supervisionada pode ser utilizada quando o analista não tem conhecimento prévio suficiente da área analisada para que possa definir classes e suas respectivas amostras. Desta forma, valendo-se de determinados algoritmos, o próprio *software*

utilizado é capaz de distinguir os agrupamentos de classe no espaço de atributos, cabendo ao analista sinalizar a quantidade de classes a serem identificadas. A definição das classes só se dá após a classificação ter sido concluída (MATHER, 2005).

3.8.1.2 Classificação supervisionada

A classificação supervisionada é aquela que associa o conhecimento do foto-intérprete no processo, que pode ser dividido em três estágios. O primeiro consiste no treinamento do *software*, no qual o foto-intérprete identifica diferentes áreas da imagem, cada uma representando uma classe de cobertura, e seleciona várias amostras representativas desta classe, que servem de fonte de informação para que o *software* faça a classificação automática. O segundo estágio é a classificação propriamente dita, em que cada *pixel* é rotulado pertencente a uma determinada classe baseado no conhecimento gerado pelas amostras. E o último estágio é o resultado propriamente dito, em forma de mapas temáticos (LILLESAND; KIEFER, 2004). A **Figura 19** ilustra o processo de classificação supervisionada em seus 3 estágios.

Figura 19 - Os três estágios da classificação automática supervisionada (LILLESAND; KIEFER, 1994)

Espera-se que com o auxílio do conhecimento humano no processo, o resultado da classificação apresente melhores resultados se comparado a métodos não supervisionados.

3.8.2 Análise orientada a objeto (AOO)

Apesar de configurar um método de classificação automática supervisionada, a análise orientada a objetos (AOO) apresenta-se como um método alternativo aos métodos tradicionais

de classificação, pois, além da informação espectral de cada *pixel*, utiliza também a informação da relação espacial entre os pixels e sua vizinhança. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um foto-intérprete ao reconhecer áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais de imagens (INPE, 2007). Paranhos Filho, Lastoria e Torres (2008) afirmam que a principal diferença entre este tipo de classificação e a tradicional é que a AOO não analisa os *pixels* individualmente, mas em relação ao seu conjunto, ou seja, o sistema não considera apenas o *digital number* do *pixel*, mas também os *pixels* ao seu redor, procurando por similaridades estatísticas e agrupando estes em conjuntos. Esse processo de agrupamento é chamado segmentação. Desta forma, o processo divide-se em duas etapas, segmentação e classificação.

Segundo Hay e Castilla (2008), a abordagem orientada a objetos possui vantagens em relação aos métodos tradicionais de classificação e, pelo fato de os elementos considerados não serem os *pixels* isolados, mas grupos deles (segmentos), obtém-se um significativo aumento no número de variáveis consideradas na classificação, pois além das informações espectrais, torna-se possível descrever cada região usando parâmetros em relação à forma do objeto (área, altura, largura, densidade, altura da borda, entre outros), à textura, às relações entre objetos vizinhos, entre outros.

3.8.2.1 Segmentação

Pekkarinen (2002) descreveu o processo de segmentação como a divisão de uma imagem em regiões espacialmente contínuas, disjuntas (não sobrepostas) e homogêneas, baseadas nas similaridades estatísticas dos *pixels*. Portanto, o processo de segmentação visa separar os elementos da imagem em grupos homogêneos, chamados objetos, baseados em propriedades como níveis de cinza, textura, cor etc. A **Figura 20** ilustra um exemplo de uma segmentação em uma imagem de uma parede de tijolos.

Figura 20 - Imagem de uma parede de tijolos antes e depois da segmentação

A segmentação pode ser feita por vários métodos – cada um utilizando um algoritmo diferente e gerando resultados diferentes – dentre os quais pode-se citar o de detecção de bordas e o de crescimento de regiões. A eficácia da segmentação depende de vários fatores e consequentemente gera resultados diferentes de acordo com as prioridades estabelecidas e técnicas utilizadas durante o processo. A divisão da imagem é feita por algoritmos baseados nas seguintes propriedades básicas de valores de níveis de cinza dos pixels: descontinuidade, similaridade e área (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Através da descontinuidade procura-se dividir a imagem baseando-se em mudanças bruscas nos níveis de cinza dos pixels. Tais mudanças podem ser detectadas com base em pontos isolados, linhas isoladas e ainda bordas na imagem, sendo esta última a mais utilizada para identificação de descontinuidades significantes nos níveis de cinza (BELTRAME, 2008). O limiar de similaridade está baseado na distância Euclidiana entre os valores médios dos níveis de cinza de cada região. Assim, duas regiões são consideradas distintas se a distância entre suas médias for superior ao limite de similaridade escolhido (FERNANDES, 2005). Já a área limita o tamanho mínimo (número de pixels) que uma região pode ter na imagem segmentada, geralmente expressa em número de *pixels* por objeto. As regiões que não obedecem ao critério mínimo da região são agrupadas à região mais frequente ao seu redor.

Como os parâmetros de segmentação geralmente são escolhidos pelo usuário dos *softwares*, é necessário que se realize diversos testes até que os parâmetros apropriados sejam encontrados (MEINEL; NEUBERT; REDER, 2001). A **Figura 21** exemplifica como o parâmetro área altera o resultado de uma segmentação no *software* SPRING.

Figura 21 - Exemplo da influência do parâmetro área na segmentação, sendo: 30 em A; 25 em B e; 15 em C (SOUZA et al., 2003)

Pela **Figura 21**, nota-se que ao se optar por um valor de área muito elevado, muitos objetos pequenos da imagem tendem a ser desconsiderados, e no caso de valores muito pequenos, tende-se a dividir o mesmo objeto em muitas partes, dificultando a classificação e gerando resultados confusos. Com isso, para uma boa segmentação são definidas algumas premissas (DEFINIENS, 2004):

- Um processo de segmentação deve produzir segmentos bastante homogêneos para boa separação de regiões na imagem;
- Considerando que cada problema de análise de imagem exige diferentes adequações do espaço-escala, o tamanho comum das escalas deve ser analisado de acordo com os objetos de interesse na imagem;
- Quase todos os atributos do objeto: cor, textura, forma e relações com regiões adjacentes são dependentes da escala. Somente estruturas com escalas semelhantes podem ser comparadas em termos de qualidade dos atributos.

Segundo Zhang (1996) *apud* Dlugosz et al. (2009), o resultado de uma segmentação pode ser avaliado por dois métodos. O primeiro, definido como método analítico, permite examinar e avaliar diretamente o algoritmo através da análise de seus princípios, suposições, propriedades, exigências, utilidade, complexidade etc. O segundo é o método empírico, que permite examinar e avaliar um algoritmo de forma indireta, através da aplicação de imagens-teste e medição da qualidade do resultado da segmentação ou através de inspeção e avaliação visual.

3.8.2.2 Classificação

Após a segmentação dá-se início à classificação das imagens, processo no qual se faz a distinção e identificação dos objetos que compõem a imagem. As principais características usadas na AOO são textura, cor, tonalidade, forma e arranjo espacial dos objetos (PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). Antes da classificação é necessário que se escolha as classes em que serão enquadrados os objetos segmentados. Estas classes podem ser criadas com ou sem hierarquia (**Figura 22**). A hierarquia define alguns níveis e quais classes pertencem a cada nível.

Figura 22 - Definição de classes com hierarquia (A) e sem hierarquia (B)

Após a definição de todas as classes da imagem, as amostras são selecionadas diretamente na imagem. Ao fim deste processo é feita a classificação de toda a imagem, resultando em um mapa temático composto por polígonos, no qual cada um destes representa um objeto real da área classificada. A **Figura 23** resume o processo de classificação por AOO.

Figura 23 - Metodologia da análise orientada a objeto

A análise orientada a objeto vem sendo largamente utilizada em imagens de alta resolução espacial em meio urbanos. Segundo Ribeiro e Kux (2009), isso se deve ao fato de os sensores a bordo dos novos satélites estarem cada vez mais adequados aos estudos urbanos, em função

do aumento das resoluções espacial, espectral e radiométrica, gerando assim imagens de altíssima qualidade. Blaschke e Kux (2007) consideram este aumento na qualidade uma grande revolução na área de sensoriamento remoto, mas destacam também o papel da análise orientada a objeto, sem a qual seria impossível extrair tantas informações das imagens, independentemente de sua qualidade. Jacquin; Misakova; Gay, 2008 (2008) e Hay e Castilla (2008) também enfatizam as vantagens do método. Porém, mesmo que a AOO apresente-se como uma ferramenta essencial para classificação de imagens urbanas de alta resolução, deve-se destacar que a utilização de tal abordagem exige uma compreensão sólida dos objetos a serem mapeados e que, em qualquer caso, a qualidade dos resultados é muito sensível aos dados de entrada e experiência do usuário (RIBEIRO; KUX, 2009).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e procedimentos metodológicos utilizados para a realização deste trabalho. O início dos trabalhos se deu após o entendimento dos métodos e do funcionamento do modelo EESC, para o qual foi feita uma análise de sensibilidade com a finalidade de se identificar quais as suas variáveis mais sensíveis. Desta maneira, um maior esforço poderia ser direcionado na obtenção destas e, conseqüentemente, uma maior precisão nos resultados seria obtida. Portanto, técnicas de sensoriamento remoto e processamento digital de imagens foram utilizados para determinação das variáveis: número de deflúvio (CN), grau de vegetação (PP), área (A), comprimento (L) e declividade dos talvegues (S) das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Gregório. Posteriormente, os dados gerados foram inseridos no modelo hidrológico EESC, para atualização das condições do sistema de macrodrenagem de São Carlos.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse é a bacia hidrográfica do córrego do Gregório. Esta unidade é uma das principais bacias da cidade de São Carlos/SP (**Figura 24**) e é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do córrego Monjolinho. A bacia encontra-se no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil. Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos (DAAE, 2006), o Estado de São Paulo está dividido em 22 unidades de gestão de recursos hídricos (UGRHI). A sub-bacia do córrego Monjolinho, onde está inserido o córrego do Gregório, faz parte da UGRHI 13 (Bacia Tietê/Jacaré), a qual se encontra em crescente processo de urbanização e possui parcelas urbanas e rurais. A bacia do córrego do Gregório tem aproximadamente 18,9km² e perímetro de 22,4km, com nascente a leste da cidade, na chácara Recanto Feliz, localizada nas coordenadas 47°46'03" de longitude e 22°01'49" de latitude (ESTEVEZ; MENDIONDO, 2003; BAILO, 2009). O córrego corre no sentido oeste em uma extensão aproximada de 8,6km até desembocar no córrego Monjolinho. Quanto à pedologia, São Carlos é caracterizada por solos altamente permeáveis, em sua maioria, constituídos por zonas

de latossolo-vermelho-amarelo e de areia quartzosa profunda com característica arenosa, tipo também do solo da bacia hidrográfica do córrego do Gregório (BARROS, 2005).

Figura 24 - Limite da área de estudo, bacia hidrográfica do córrego do Gregório, São Carlos, SP

A bacia hidrográfica do córrego do Gregório, para o modelo EESC, foi dividida em 12 sub-bacias, numeradas de 42 a 53, e 7 tramos, numerado de 6.1 a 6.7 (**Figura 25**).

Figura 25 - Hidrografia original do córrego do Gregório utilizada no Modelo EESC (LIRA, 2003)

O córrego do Gregório possui quatro afluentes principais:

- Córrego “Primeira Água” - nome dado pelos moradores da área que não consta em carta. É o primeiro afluente à margem direita e é o canal que drena a sub-bacia 43;
- Córrego do Sorregotti - à margem direita, nasce no bairro Tangará, próximo a rodovia Washington Luis e deságua no córrego do Gregório, na rotatória Celeste Zanon, drenando a sub-bacia 47;
- Córrego do Lazarini - segundo afluente à margem direita, nasce na Chácara do Parque e desemboca no córrego do Gregório próximo à rua Major Manuel Antonio de Matos, drenando a sub-bacia 49;
- Córrego do Simeão - à margem esquerda, nasce na região da Praça Itália. O córrego está totalmente canalizado sob a rua Episcopal, desembocando no córrego do Gregório na região do mercado, drena a sub-bacia 51.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS NO TRABALHO

Para a caracterização da bacia hidrográfica em ambiente SIG foram usados 4 materiais cartográficos: uma imagem de satélite; uma planta planialtimétrica e; dois mapas pedológicos. Foram utilizados também 2 *softwares*: um para o pré-processamento da imagem e trabalhos em ambientes SIG (**ArcGIS 9.3**) e outro para a classificação automática supervisionada pelo método da análise orientada a objetos (**Definiens Developer**).

4.2.1 Material cartográfico

A imagem de alta resolução é proveniente do satélite *Worldview II*, registrada em 11 de junho de 2011, com resolução espacial de 0,52 metros na banda pancromática e 2,4 metros na banda multi-espectral, contendo as bandas RGB e infravermelho próximo (bandas 1,2, 3 e 4). A imagem cobre toda a área urbana de São Carlos, além de uma parcela da área rural,

englobando toda a bacia hidrográfica do córrego do Gregório, a bacia do córrego do Mineirinho e praticamente toda bacia do córrego do Monjolinho. A imagem possui como interferências uma suave angulação – devido à posição do satélite não ser completamente ortogonal ao alvo no momento da captura – e uma parcela considerável de sombras. O *Datum* original da imagem é WGS84, que foi mantido até o fim dos trabalhos e está de acordo com a resolução da presidência do IBGE nº 5 (BRASIL, 1993).

Para trabalhos com o relevo do terreno utilizou-se uma planta planialtimétrica da bacia do córrego do Gregório – em formato CAD e escala 1:10.000 – proveniente do Centro de Divulgação Científica e Cultural (CDCC). A planta continha a hidrografia – desenho da rede de macrodrenagem e do contorno da bacia –, curvas de nível a cada 5 ou 10 metros e diversos pontos cotados ao longo da bacia. Estima-se que a precisão geográfica de distâncias desta imagem seja consideravelmente menor que a da imagem de satélite, porém, ainda assim, esta consiste em uma fonte confiável de informações sobre a área de estudo.

Por fim, foram utilizados dois mapas pedológicos do município de São Carlos, um proveniente de um convênio entre a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) e a Secretaria da Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, onde podem ser identificados os tipos de solo distribuídos ao longo da bacia hidrográfica, e outro proveniente do Plano de Macrodrenagem da cidade de São Carlos, adaptado do documento “Levantamento Pedológico Semi-Detalhado da Quadrícula de São Carlos, EMBRAPA/IAC, 1981”, originalmente um mapa em escala 1:100.000.

4.2.2 Softwares

Para os trabalhos em ambiente SIG foi utilizado o software de licença privada **ArcGIS 9.3**, que além já disponível na instituição onde foi realizado o trabalho, era bastante apropriado ao serviço. Contudo, para o software a ser usado na classificação da imagem de satélite foi feita uma criteriosa seleção entre 5 *softwares*, através de uma matriz de decisão, para que se escolhesse aquele que melhor se enquadrasse nos requisitos pertinentes à pesquisa.

4.2.2.1 Escolha do software para classificação de imagem

Para a execução dos trabalhos de classificação da imagem de satélite foi montada, após uma ampla pesquisa bibliográfica, uma matriz de decisão para a escolha do *software* a ser utilizado. Esta matriz é chamada matriz “Pay-off”, ou matriz de decisão e representa, simplificada, o processo de seleção da melhor opção com as informações necessárias à avaliação de cada alternativa.

A montagem da matriz se deu em função de diversos parâmetros técnicos pertinentes à pesquisa, tais como disponibilidade ao usuário, custo, facilidade de uso, aplicabilidade à pesquisa entre outros. Em seguida atribuiu-se um peso a cada parâmetro, definindo assim sua relevância para a decisão e por fim, calculou-se pela equação 22, a pontuação final de cada opção para que se escolhesse aquela com maior pontuação nos critérios de avaliação escolhidos.

A equação 22 considera a nota final (Nf) de cada opção de software a somatória do produto entre notas obtidas em cada parâmetro e o peso do respectivo parâmetro.

$$Nf = \sum_i^n (\text{Nota da opção X frente ao parâmetro i}) * (\text{peso do parâmetro i}) \quad (22)$$

Após a montagem da matriz (**Tabela 3**), foi preciso atribuir notas a cada *software* frente aos parâmetros técnicos para que se pudesse avaliar todas as opções. As notas basearam-se na experiência do decisor, além de informações de mercado, bibliografia e da própria instituição onde o trabalho seria realizado. Para o parâmetro de custos, desenvolveu-se uma equação (23) para que a opção mais cara (cerca de R\$ 60.000,00) obtivesse a menor nota (valor 1) e as opções mais baratas obtivessem nota máxima (valor 5). Por fim, apesar de sujeitas a um fator de subjetividade em determinados parâmetros, a decisão de qual ferramenta utilizar nos trabalhos de classificação de imagem de satélite foi tomada baseada no resultado final desta matriz.

Tabela 3 - Matriz de decisão para escolha do *software* a ser usado na classificação da imagem de satélite, parâmetros avaliados e desempenho das opções

	Peso	Função de Valor	ArcGIS	DEFINIENS	Erda Imagine	InterIMAGE	SPRING
Aplicabilidade à pesquisa	0,25	Muito aplicável= 5 Nada aplicável= 0	1	5	4	4	2
Custo (R\$)	0,20	Ver Equação 23	Gratuito*	15.000,00	12.155,00	Gratuito	Gratuito
Facilidade de uso	0,15	Muito amigável = 5 Nada amigável = 2	3	4	3	2	2
Existe na instituição (disponibilidade ao usuário)?	0,10	Sim= 5 Não = 2	Sim	Não	Não	Não	Sim
Compatibilidade com outros softwares	0,10	Muito compatível = 5 Nada compatível = 2	5	5	5	4	4
Tempo de existência no mercado	0,10	+20 anos = 5 +10 anos = 4 +6 anos = 3 +3 anos = 2 até 3 anos = 1 versão Beta = 0	+20	+10	+20	0	+10
Familiaridade com a ferramenta	0,10	Sim= 5 Não = 2	Sim	Sim	Não	Não	Não
SOMA dos pesos	1,00						

* o software tem o preço de R\$60.000,00, mas pela sua disponibilidade na instituição o mesmo foi considerado gratuito

$$C_1 = \left(\frac{\text{Custo do Mais barato} + 15.000}{\text{Custo da opção} + 15.000} \right) \times 5 \quad (23)$$

Ao fim desta etapa foi escolhido o *software* **Definiens**. Através de um contato direto com o fabricante do produto, conseguiu-se um empréstimo de uma licença durante um período de aproximadamente 3 meses, tempo suficiente para que fossem realizados os trabalhos de processamento digital da imagem de satélite. Desta maneira, mesmo tendo sido considerada neste fase da metodologia, a compra do produto não foi efetuada.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para melhor entendimento dos parâmetros utilizados pelo modelo fez-se uma análise de sensibilidade de alguns parâmetros do modelo. De forma geral, conhecer para qual parâmetro ou combinação de parâmetros a saída do modelo é mais sensível simplifica a escolha dos métodos de obtenção destes parâmetros, pois quanto mais sensível um modelo a determinado parâmetro, mais precisas devem ser as técnicas para a obtenção deste a fim de se diminuir os erros e aumentar a precisão do resultado.

Escolheu-se 4 parâmetros do modelo EESC para a análise de sensibilidade, sendo estes o número de deflúvio (CN) e grau de vegetação (PP), referentes à cobertura das bacias hidrográficas, e α e β , referentes às seções hidráulicas dos canais. Os parâmetros foram variados independentemente e individualmente durante as simulações. Estes parâmetros foram escolhidos por serem dos mais dinâmicos dentre as variáveis de entrada do modelo, ou seja, os mais susceptíveis a variações em curto e longo prazo. Durante a análise dos resultados, foram avaliadas as mudanças na vazão de pico, tempo de pico e volume de escoamento frente a variações nos parâmetros de entrada.

4.3.1 Parâmetros referentes à cobertura do solo

Os parâmetros CN e PP foram analisados em nível de sub-bacias, ou seja, alterando seus valores e simulando seus hidrogramas para apenas uma sub-bacia do modelo. Optou-se por essa escala de trabalho pois sabe-se que o comportamento do hidrograma final de uma sub-bacia é semelhante ao das demais frente a uma mudança de parâmetro equivalente. Desta forma, como a análise de sensibilidade apresenta resultados em valores percentuais, o resultado da sensibilidade dos parâmetros às alterações pode representar apenas uma sub-bacia ou a bacia hidrográfica inteira.

Para as análises destes parâmetros, foi necessário que assumisse valores iniciais e as faixas de variação de cada um. Para CN, optou-se por variar de 60 a 90 – valores que representam uma área rural e uma área urbanizada respectivamente – em incrementos de 10 unidades, englobando assim a maioria das áreas que podem ser encontradas na área de estudo. Para PP, a variação foi de 30% a 90% em incrementos de 30%, números bastante plausíveis para grau de vegetação de bacias com parcelas urbanas e rurais. As faixas de variação e incrementos durante as simulações estão apresentados na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade

	Faixa de variação	Incremento	Unidade
CN	60 - 90	10	Adimensional
PP	0,30 - 0,90	0,30	Adimensional
Tempo de retorno	10 - 100	10-25-50-100	Anos

Além destas variações, foram gerados hidrogramas para diferentes tempos de retorno a fim de se analisar a sensibilidade do modelo em diferentes intensidades de chuva. O número total de hidrogramas (**APÊNDICE A**) para cada parâmetro é apresentado na **Tabela 5**.

Tabela 5 - Número de hidrogramas gerados na análise de CN e PP

	Hidrogramas			
	Tr=10	Tr=25	Tr=50	Tr=100
CN	4	4	4	4
PP	3	3	3	3
Subtotal	7	7	7	7
TOTAL	28			

4.3.2 Parâmetros referentes à seção dos canais de macrodrenagem

Os parâmetros α e β foram analisados em nível de bacia hidrográfica, uma vez que a variação em apenas um canal refletiria de forma quase insignificante no hidrograma da bacia do córrego do Gregório. Portanto, optou-se por variar simultaneamente os valores de todos os canais que compõem a rede de macrodrenagem da bacia. Este método, entretanto, produz resultados extremos, pois variações desta magnitude seriam pouco plausíveis.

Para as análises de α e β , considerou-se 0,7 como valores iniciais de ambos os parâmetros por ser este o valor mais frequente na área de estudo, variando-se este número em incrementos de 10% para mais e para menos, até os limites plausíveis dos parâmetros. As faixas de variação para cada um e o valor dos incrementos são apresentados na **Tabela 6**.

Tabela 6 - Faixas de variação e incrementos na análise de α e β

	Faixa de variação	Incremento	Unidade
α	0,51 - 1,82	$\pm 10\%$	Adimensional
β	0,51 - 0,93	$\pm 10\%$	Adimensional
Tempo de retorno	10 - 100	10-50-100	Anos

Para os parâmetros da hidráulica dos canais também foram feitas simulações para diferentes intensidades de precipitação. O número total de hidrogramas (**APÊNDICE A**) gerados para cada parâmetro é apresentado na **Tabela 7**.

Tabela 7 - Número de hidrogramas gerados na análise de α e β

	Hidrogramas		
	Tr=10	Tr=50	Tr=100
α	14	14	14
β	7	7	7
Subtotal	21	21	21
TOTAL	63		

4.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DA IMAGEM DE SATÉLITE

Para o pré-processamento da imagem optou-se pelos processos de ortocorreção e georreferenciamento, que visam compensar as distorções devido à curvatura terrestre, relevo e velocidade do satélite durante a captura, fazendo com que a imagem corrigida tenha a mesma qualidade geométrica de um mapa, atribuindo para tanto um sistema de coordenadas ao terreno (NOVO, 2008; PARANHOS FILHO; LASTORIA; TORRES, 2008). Entretanto, a imagem de satélite utilizada neste trabalho era uma imagem já georreferenciada. Desta forma, para uma verificação mais apurada das características geométricas da imagem decidiu-se por definir alguns Pontos de Controle de Solo (*Ground Control Points* - GCP) e averiguar se um novo georreferenciamento com maior precisão seria necessário.

A imagem original foi fornecida em 2 arquivos distintos, um contendo a banda pancromática (banda 8) com resolução espacial de 0,52m e outro contendo as bandas espectrais 1, 2 3 e 4, todas em resolução 2,4m. Através de um processo denominado fusão de imagens, realizado no *software ArcGIS 9.3*, as imagens foram fundidas (mescladas), gerando uma imagem nova imagem com características multi-espectrais de alta resolução espacial, ou seja, uma imagem que continha as bandas 1, 2, 3 e 4, com a resolução espacial aumentada para 0,52m.

4.4.1 GCP - Pontos de controle ao solo

Foram coletados ao todo 3 GCP primários (**Figura 26**), todos na área urbana de São Carlos, sendo um a poucos metros do exutório da bacia (Ponto 1), dentro do estacionamento do Shopping Iguatemi; um dentro do Campus I da USP São Carlos (Ponto 2), sobre o prédio do departamento de Engenharia de Transportes e; o último ponto foi coletado a leste da bacia (Ponto 1), no centro de uma rotatória próxima à rodovia Washington Luis. Os pontos foram coletados não somente na área de estudo, mas de forma distribuída, para que se averiguasse o erro médio em toda a imagem, a fim de se evitar áreas distorcidas ou diferentes escalas de precisão em diferentes regiões da imagem.

Figura 26 - Imagem completa e pontos de controle ao solo para o presente trabalho

Posteriormente ao levantamento de campo dos pontos de controle, foram fornecidas pelo Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos as coordenadas de mais um ponto de controle – localizado no campus II da USP, chamado Puno – que foram também utilizadas na verificação do erro da imagem, nomeado de Ponto 4.

4.4.2 Preparação da imagem final

Após os trabalhos de pré-processamento da imagem, utilizando os pontos cotados e as curvas de nível da planta planialtimétrica, dividiu-se a bacia hidrográfica do córrego do Gregório em

12 sub-bacias (**Figura 27**), baseado na divisão original do modelo EESC (**Figura 25**). Por fim, separou-se da imagem de satélite as partes que não faziam parte da bacia estudada, obtendo-se assim a imagem final que seria classificada nos trabalhos de análise orientada a objetos.

Figura 27 - Nova divisão das 12 sub-bacias do córrego de Gregório

4.5 CLASSIFICAÇÃO POR ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO

A bacia do córrego do Gregório encontra-se, em sua maioria, em ambiente urbano. Sabe-se que a técnica mais apropriada para a classificação de imagens de satélite em ambiente urbano é a análise orientada a objetos, utilizada e recomendada por vários autores (FRAUMAN; WOLFF, 2005; JACQUIN; MISAKOVA; GAY, 2008; DURIEUX; LAGABRIELLE; NELSON, 2008; ANTUNES; CORTESE, 2007; PINHO; KUX; ALMEIDA, 2007). Portanto, a classificação da imagem de satélite foi feita utilizando-se esta técnica, visando a criação de um mapa vetorial da bacia urbana do córrego do Gregório, de onde seriam extraídas as informações necessárias para a atualização do modelo EESC. Para tanto, o processo se divide em três etapas, definição dos tipos de coberturas de solo a serem identificados, segmentação e classificação da imagem.

4.5.1 Definição dos tipos de cobertura de solos

Para o início dos trabalhos de classificação da imagem de satélite, definiu-se quais os tipos de cobertura de solo seriam identificados, considerando-os como alvos da classificação (**Tabela**

8). A escolha dos alvos se deu após a observação da imagem para reconhecimento das coberturas mais frequentes – mesmo que não fossem encontradas em toda a área da bacia hidrográfica – apoiada também por alguns testes de facilidade de identificação utilizando o *software* **Definiens**. Desta maneira, escolheu-se ao todo 8 tipos de cobertura de solo.

Tabela 8 - Tipos e exemplos de coberturas escolhidas para a análise orientada a objeto (*continua*)

Tipos de coberturas (alvos)	Coberturas enquadradas		
Telhados
	Telhado cerâmico claro e escuro	Telhados metálicos brancos	Quadras poliesportivas coloridas
Cinzas
	Asfalto claro e escuro	Pavimentos e lajes de concreto	Telhados de amianto/zinco ou metálicos cinzas
Culturas Perenes
	Plantações de árvores pequenas em linha e pomares		
Vegetação rasteira
	Gramíneas e vegetação baixa, não arbórea		
Vegetação arbórea
	Florestas e bosques	Árvores em área urbana	Reservas naturais

Tabela 8 - Tipos e exemplos de coberturas escolhidas para a análise orientada a objeto (*conclusão*)

Tipos de coberturas (alvos)	Coberturas enquadradas		
Solos
	Solo exposto e sem vegetação	Solos preparados para agricultura	Ruas e estradas de terra e areia
Sombras
	Áreas de coloração negra		
Entulhos
	Depósitos de lixo		Depósitos a céu aberto

Algumas coberturas como água, veículos automotores, cemitérios, entre outros, não foram considerados alvos urbanos tanto pela difícil identificação nas imagens quanto pela baixa taxa de ocorrência ou ausência dos mesmos na área de estudos. Foram tomadas as devidas precauções para que as coberturas enquadradas sob um mesmo tipo tivessem características hidrológicas – em relação à parcela de escoamento que produzem – semelhantes, evitando assim distorções significativas na caracterização hidrológica da cobertura de solo da bacia.

4.5.2 Segmentação da imagem

Para particionar o conjunto de dados contidos na imagem de alta resolução, divide-se esta em diversos segmentos através do processo de segmentação. A eficácia da segmentação depende de vários fatores e consequentemente gera resultados diferentes de acordo com as prioridades estabelecidas e técnicas utilizadas durante o processo. Durante o processo de segmentação, o *software* utilizado permitiu a atribuição de valores a dois parâmetros: (1) escala e (2) cor/textura. Estes definem os critérios a serem adotados na segmentação, sendo possível por

eles priorizar determinadas características dos objetos na segmentação, gerando resultados diferentes conforme a escolha.

A segmentação da imagem ocorreu de forma descontínua, ou seja, segmentando-se uma sub-bacia por vez, sem executar nenhuma vez o processo para toda a área de estudo de forma contínua, o que ocorreu por diversos motivos. Primeiramente, pela área de estudo apresentar características muito diferentes ao longo de sua extensão (com áreas comerciais, residenciais, industriais e urbanas), tornava-se impossível que os mesmos parâmetros de segmentação apresentassem resultados ótimos em todas as regiões. Portanto, optou-se pelo processo descontínuo para que se obtivessem melhores resultados ao longo de toda a área de estudo. A segmentação de uma área grande exigiria também um poder computacional muito grande e um elevado tempo de processamento, além de dificultar os trabalhos de inspeção da qualidade de segmentação e de exportação dos resultados para outras plataformas (por se tratar de um volume de dados muito grande). Portanto, a segmentação descontínua apresentou-se como uma boa alternativa para os trabalhos de segmentação.

Para a segmentação, foram testados diferentes valores para os parâmetros e optou-se por aqueles (**Tabela 9**) que, qualitativamente, apresentaram melhores resultados na separação dos objetos da imagem.

Tabela 9 - Valores de segmentação utilizados em cada sub-bacia do córrego do Gregório

Sub-bacia	Fator escala	Cor/Textura
42	25	0,90
43	35	0,90
44	25	0,90
45	25	0,85
46	25	0,90
47	35	0,90
48	25	0,90
49	25	0,90
50	25	0,90
51	25	0,90
52	25	0,80
53	25	0,90

4.5.3 Classificação da imagem e redes hierárquicas para cada sub-bacia

Após a segmentação de toda a área de estudo, fez-se a classificação das 12 sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Gregório gerando, para cada uma, um mapa vetorial com a cobertura de solo da bacia. Para tanto, foi necessária a escolha de quais classes

comporiam cada sub-bacia. Em seguida eram escolhidas aproximadamente 40 amostras bem distinguíveis e representativas de cada tipo de cobertura para que estas servissem de área de treinamento para o *software*.

As amostras de treinamento foram escolhidas por fotointerpretação (interpretação visual da imagem) e, após a sua seleção, tornava-se possível a classificação de toda a imagem. Este processo de classificação acontecia de forma progressiva, uma vez que o *software* separava a imagem em duas classes por vez, como por exemplo vegetação e não-vegetação, ou separando todos os tipos de vegetação em vegetação arbórea e vegetação rasteira. Desta forma, foi necessário que se coletasse as amostras de treinamento de duas classes por vez. Por esta razão, foi necessário a criação de uma hierarquia de classes para cada sub-bacia, de acordo com os tipos de cobertura existentes em cada uma (**Figura 28**). A hierarquia de classes separava os tipos de cobertura dois a dois à medida que a classificação progredia, seguindo até que todos os tipos de cobertura desejados fossem classificados.

Figura 28 - Hierarquias de classe para classificação de cobertura. O quadro A foi utilizado para a sub-bacia 42; o B para a sub-bacia 43; o C para as sub-bacias 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52 e 52; o D para a sub-bacia 51, a única que possuía a cobertura entulhos

Nas duas primeiras classes, negros e não negros distinguem o que fazia e o que não fazia parte da imagem, uma vez que as sub-bacias têm forma irregular e o *software* **Definiens** carrega apenas imagens no formato retangular. Portanto, as áreas não preenchidas com a imagem eram apresentadas na cor preta, como mostra a **Figura 29**.

Figura 29 - Plataforma do *software* Definiens e a sub-bacia 42

Posteriormente separava-se as classes vegetação e não vegetação. Para esta separação, utilizou-se principalmente a banda infravermelho-próximo, que destaca a vegetação e facilita a sua identificação. A **Figura 30** apresenta a imagem com destaque para a vegetação rasteira e arbórea na banda infravermelho-próximo, em verde, e a imagem já classificada nas classes vegetação rasteira, vegetação arbórea, não vegetação e sombras.

Figura 30 - Imagem da sub-bacia 49 destacando a vegetação em verde e a classificação vegetação/não vegetação

Posteriormente as classes eram divididas duas a duas até que chegasse aos tipos finais de cobertura pré-determinados. Ao fim do processo de classificação, o resultado era exportado para ambiente SIG, onde era gerado um mapa vetorial de toda a cobertura de solo da sub-bacia classificada. Este processo foi executado em todas as sub-bacias de forma individual, uma vez que cada uma possuía características de ocupação e coberturas diferentes. Por fim, após a classificação completa de cada sub-bacia, o resultado foi submetido a uma análise visual minuciosa – visto que a área das sub-bacias é relativamente pequena – para que fossem identificados erros de classificação provenientes de confusão espectral. Quando da ocorrência

de poucos erros, estes eram corrigidos manualmente. No caso de muitos erros, todo o processo de classificação era refeito desde a seleção de novas amostras até a análise visual dos resultados.

4.6 GEOPROCESSAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS HIDROLÓGICOS

O termo “geoprocessamento” diz respeito ao processamento de dados georreferenciados, e pode ser definido como um conjunto métodos e técnicas construídos em torno do processamento eletrônico de dados georreferenciados (com referências geográficas), analisando suas características e relações geotopológicas para produzir informação ambiental (SILVA, 2009). Portanto, após todos os trabalhos de classificação da imagem de satélite, realizou-se, em ambiente SIG, o geoprocessamento de todos os dados obtidos na AOO, para a obtenção das variáveis hidrológicas pretendidas. Além disso, optou-se também pela atualização dos parâmetros α e β obtidos por Lira (2003).

4.6.1 Cálculo do número de deflúvio (CN) e grau de vegetação (PP)

Após a classificação automática da imagem no *software* **Definiens**, os polígonos foram exportados para o *software* **ArcGIS**, onde criou-se um banco de dados de cada sub-bacia no qual foi calculada a área de cada objeto classificado. Desta maneira, criou-se o mapa vetorial da cobertura do solo da bacia, que é na realidade um mosaico de polígonos – onde cada um representa um objeto da imagem – com um banco de dados composto por números e referências geográficas.

Para a determinação do grupo hidrológico do solo, fez-se a sobreposição do contorno da bacia do córrego do Gregório sobre os dois mapas pedológicos e identificou-se os tipos de solo que compõem a bacia, como mostra a **Figura 31**.

Figura 31 - Identificação dos solos que compõem a área de estudos utilizando-se o mapa pedológico da EMBRAPA

Os tipos de solo identificados na bacia foram latossolo-vermelho-amarelo e latossolo-vermelho-escuro (identificado no mapa do SHS), que enquadram-se pelo método SCS no grupo hidrológico B, segundo a classificação de Sartori (2004) e Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), na qual a metodologia americana foi adaptada para a realidade brasileira. Portanto, neste trabalho assumiu-se que todos os solos que compõem a bacia hidrográfica do córrego do Gregório são do **tipo hidrológico B**. Vale ressaltar que o Plano de Macrodrenagem para o município de São Carlos considera o solo presente na bacia do Gregório como sendo de classe hidrológica A. Portanto, optou-se por apresentar, ao final deste trabalho (**APÊNDICE B**), o resultado da classificação para o caso de solos classe A comporem a área de estudos.

Por fim, pelo método das médias ponderadas, calculou-se o valor de CN e PP para cada sub-bacia e posteriormente para a bacia inteira, estando estes apresentados na **Tabela 10**.

Tabela 10 - Número de deflúvio para cada tipo de cobertura

Tipos de coberturas (alvos)	Valores de CN
Telhados	98
Cinzas	98
Culturas Perenes	78
Vegetação rasteira	61 - 69
Vegetação arbórea	55
Solos	82
Sombras	-
Entulhos	82

A cobertura de vegetação rasteira foi a única cobertura a receber diferentes valores de CN em diferentes áreas, pois este valor é baseado nas condições em que se encontra a cobertura vegetal. A cobertura de entulhos não consta em nenhuma tabela e recebeu o mesmo valor dos solos. Como as sombras representam interferências na imagem, estas não receberam valor,

porém também não foram consideradas durante os cálculos de número de deflúvio, ou seja, a área da bacia durante o cálculo foi considerada como sendo $A = A_{\text{total}} - A_{\text{sombras}}$. Desta forma, ao se desconsiderar esta parcela no cálculo de CN, comete-se um erro que varia proporcionalmente à área de sombras, ou seja, quanto maior a área de sombras, maior o erro. Entretanto, este método busca minimizar o erro, pois desconsiderar a área de sombras equivale a atribuir à esta um CN igual ao CN médio da bacia.

4.6.2 Obtenção dos demais parâmetros hidrológicos por geoprocessamento

Além dos parâmetros hidrológicos relacionados à cobertura do solo, com o material levantado foi possível também a obtenção dos parâmetros área das bacias, comprimento dos talwegues e declividade dos canais, todos calculados em ambiente SIG, das seguintes formas:

- Área das sub-bacias: calculou-se a área dos polígonos que representavam as sub-bacias, em m²;
- Comprimento dos talwegues: calculou-se a partir da vetorialização dos córregos visíveis na imagem de satélite, onde foi medido o comprimento dos mesmos, em metros;
- Declividade dos canais: obtido cruzando-se os vetores que representavam os córregos e as curvas de nível que compunham a planta planialtimétrica, com resultados em m/m.

4.7 ATUALIZAÇÃO DO MODELO EESC

A atualização do modelo EESC é uma tarefa relativamente simples, uma vez que o banco de dados do modelo pode ser facilmente manipulado por meio de um computador. Os novos dados foram inseridos nas sub-rotinas SUBDAD (CN, PP, A, L e S) e TREDAD (L, α e β). Em seguida, foram gerados hidrogramas de cheia para situações semelhantes utilizando o modelo original e o modelo atualizado. Os resultados estão discutidos no capítulo 5.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia proposta para a obtenção de parâmetros hidrológicos da bacia hidrográfica do córrego do Gregório por meio de técnicas de sensoriamento remoto e SIG. Em uma primeira etapa, escolheu-se o *software* que seria utilizado no processamento digital da imagem através de uma matriz de decisão. Em seguida analisou-se a sensibilidade do modelo EESC frente a quatro parâmetros hidrológicos. Posteriormente, foram realizados os trabalhos de classificação da imagem de satélite, geoprocessamento dos dados obtidos e determinação dos parâmetros CN, PP, A, L e S. Finalmente, atualizou-se o modelo hidrológico EESC e comparou-se o modelo original com o atualizado.

5.1 SOFTWARE ESCOLHIDO

Uma vez determinados os parâmetros que compõem a matriz de decisão e o desempenho de cada *software* em cada um deles, aplicou-se a **equação 2** para o cálculo das notas finais e escolheu-se aquele com melhor desempenho na avaliação, como apresentado na **Tabela 11**.

Tabela 11 - Resultado da matriz de decisão

Parâmetros	Peso	ArcGIS	DEFINIENS	Erda Imagine	InterIMAGE	SPRING
Aplicabilidade à pesquisa	0,25	0,25	1,25	1,00	1,00	0,50
Custo (R\$)	0,20	1,00	0,50	0,55	1,00	1,00
Facilidade de Uso	0,15	0,45	0,60	0,45	0,15	0,30
Existe na Instituição?	0,10	0,50	0,20	0,20	0,20	0,50
Compatibilidade com outros <i>softwares</i>	0,10	0,50	0,50	0,50	0,40	0,40
Tempo de existência no mercado	0,10	0,50	0,40	0,50	0,00	0,40
Familiaridade com a ferramenta	0,10	0,50	0,50	0,20	0,20	0,20
Resultado da Avaliação	1,00	3,70	3,95	3,40	2,95	3,30
Posição		2º	1º	3º	5º	4º

Na avaliação, o *software* **DEFINIENS DEVELOPER** obteve a maior nota (3,95) na comparação e foi escolhido para a realização dos trabalhos de classificação de imagens de satélite.

5.1.1 O software Definiens Developer

O **Definiens Developer** é um *software* projetado para análise de imagens de sensores remotos especializado em classificação de imagens de satélite com base na lógica *Fuzzi* e no método do Vizinho Mais Próximo (*Nearest Neighbor*). O *software* utiliza a técnica de Análise Orientada a Objetos (AOO) para a classificação das imagens. A principal diferença entre este tipo de classificação em relação à classificação tradicional é que na AOO, os *pixels* são classificados em relação ao conjunto ao seu redor, o que garante uma melhor interpretação de ambientes urbanos e rurais, enquanto o método tradicional classifica-os individualmente. A AOO é utilizada principalmente para imagens de alta resolução que, por captarem muitos detalhes diferentes (calçadas, gramados, casas, asfalto, terrenos baldios etc.), apresentam um padrão espectral complexo. Desta forma, este tipo de classificador permite um maior aproveitamento das imagens, distinguindo de forma mais precisa os objetos que compõem a imagem, aumentando a acurácia e a precisão da classificação.

5.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade do modelo EESC, realizada para os parâmetros CN, PP, α e β , possibilitou verificar a influência de cada um no hidrograma final (tramo 6.7) da bacia hidrográfica do córrego do Gregório. Os gráficos que ilustram os resultados de sensibilidade do modelo aos parâmetros CN e PP são apresentados na **Figura 32**.

Figura 32 - Sensibilidade do Modelo EESC aos parâmetros CN e PP

Dentre os dois parâmetros apresentados, CN se mostrou muito mais influente no hidrograma final, alterando de forma crítica os resultados em vazão e tempo de pico, mesmo com variações suaves em seu valor de entrada. Por outro lado, PP mostrou-se bem menos influente nos resultados, não causando variações consideráveis no hidrograma mesmo após variações bruscas em seu valor. Esse resultado é reflexo da origem do parâmetro PP, que exerce influência apenas no tempo de concentração das bacias, e não diretamente na parcela de escoamento destas. Por sua vez, CN representa o tipo de solo da bacia e sua cobertura, fator que é de suma importância no escoamento superficial, não apenas neste, mas quase em todos os modelos do tipo chuva-vazão existentes baseados no método SCS. Os resultados da análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros α e β são apresentados na **Figura 33**, com tempo de retorno de 10, 50 e 100 anos.

Figura 33 - Análise de sensibilidade do modelo EESC aos parâmetros α e β

Os parâmetros α e β apresentaram uma influência considerável na vazão de pico e no tempo de pico dos hidrogramas de cheia, porém, por serem de caráter hidráulico, não alteram o volume de escoamento sendo, portanto, menos sensíveis que o parâmetro CN. Porém, pelos hidrogramas gerados (**APÊNCIDE A**), fica evidente que estes parâmetros exercem grande influência no formato do hidrograma, podendo reduzir o tempo e a vazão de pico consideravelmente quando variados para maiores valores.

Os gráficos comparativos da sensibilidade do modelo EESC a cada parâmetro individual ilustram a influência de cada um sobre duas características do hidrograma final, a vazão de pico (**Figura 34**) e o tempo de pico (**Figura 35**).

Figura 34 - Comparação entre os parâmetros α , β , CN e PP, analisados quanto à sensibilidade da vazão de pico do hidrograma

Visto que neste tipo de comparação quanto mais vertical a curva mais influente é o parâmetro, nota-se claramente que a curva apresentada pela série de CN exerce a maior influência nos resultados, alterando a vazão de pico em cerca de 110% após uma variação de apenas 20% em seus valores de entrada. Para tempos de retorno menores, como o de 10 anos, essa variação chega a cerca de 220% frente às mesmas variações (**Figura 32**).

Figura 35 - Comparação entre os parâmetros α , β , CN e PP, analisados quanto à sensibilidade do tempo de pico do hidrograma

Para o tempo de pico do hidrograma, o parâmetro β mostrou-se o mais influente entre todos os analisados. Apesar de possuir uma faixa de variação pequena, este exerce mais influência no tempo de pico do hidrograma do que qualquer outro parâmetro. Entretanto, CN continua ainda muito influente, porém, este age de forma inversa no hidrograma, ou seja, quanto maior o número de deflúvio menor o tempo de pico observado. De forma geral, para modelo EESC, o número de deflúvio (CN) foi o parâmetro que mais exerceu influência nos resultados.

Tendo o parâmetro CN como o mais sensível do modelo, deve-se dedicar maiores esforços na determinação deste do que nos demais parâmetros a serem levantados para a atualização do modelo. Vale destacar que o parâmetro CN, além de difícil determinação, apresenta um certo grau de subjetividade, ou seja, seu valor para uma determinada área pode variar de acordo com o profissional e o método de estimativa. Além disso, este não é um parâmetro estático e, mesmo depois de levantado, varia ainda de acordo com a umidade antecedente do solo. Allasia (2002) analisou a sensibilidade do método SCS a diversos parâmetros e encontrou variações de até 10% na vazão de sub-bacias hidrográficas da bacia Arroio da Areia frente à variação de apenas uma unidade do parâmetro CN, destacando este como o mais importante parâmetro do método. Shinma (2011) analisou a sensibilidade de diversos parâmetros hidrológicos para a bacia do córrego do Gregório utilizando o modelo hidrológico computacional SWWM e apontou o grau de impermeabilização como o mais influente na vazão de pico dos hidrogramas. Por fim, Silveira (2010), aplicando o método SCS aplicado a uma bacia hipotética, concluiu que os parâmetros CN e tempo de concentração foram aqueles

que mais influenciaram a vazão de pico dos hidrogramas. Desta forma, o número de deflúvio, representando a cobertura e capacidade de infiltração do solo da bacia, constitui-se como o mais importante parâmetro hidrológico utilizado pelo modelo EESC, e provavelmente para todos os modelos do tipo chuva-vazão que utilizam o método do SCS.

5.3 PROCESSAMENTO DA IMAGEM E ANÁLISE ORIENTADA A OBJETOS

5.3.1 Pré-processamento da imagem de satélite

A partir dos GCP coletados na cidade de São Carlos, foi possível que se calculasse o erro médio da imagem através do software **ArcGIS**, onde constatou-se que esta apresenta desvio padrão de 2,90053 metros, o que indica uma boa qualidade espacial e bastante apropriada ao uso em hidrologia urbana. Na **Tabela 12** são apresentados os valores das coordenadas UTM coletados por GPS nos pontos 1, 2, 3 e 4 e seus respectivos valores obtidos pela imagem de satélite.

Tabela 12 - Coordenadas dos pontos obtidas por GPS e pela imagem de satélite

Ponto	Coordenadas GPS		Coordenadas Imagem		Erro residual (m)
	E	N	E	N	
Ponto 1	-198993,699938	-7562560,504562	-198989,9470000	-7562559,220000	2,64726
Ponto 2	-200661,380476	-7563779,008165	-200662,018000	7563785,969000	2,954229
Ponto 3	-204740,261599	-7560329,703186	-204749,536000	7560339,266000	1,74541
Ponto 4	-197672,240000	-7564506,760000	-197670,000000	-7564503,370000	3,85615

5.3.2 Segmentação

Para o processo de segmentação, utilizou-se o *software* **Definiens**, onde a imagem de cada sub-bacia foi dividida em segmentos correspondentes aos objetos de interesse. Para tanto, diversas combinações dos valores foram testadas para os parâmetros cor/textura e escala e, ao fim, todos os processos foram realizados com valores altos do parâmetro cor. Isso significa que a imagem se tornava mais distinguível quando se priorizava a separação por diferenças de cor, e não por diferenças de textura, o que ocorre pelo fato dos objetos na imagem serem demasiadamente pequenos – tinham de 25 a 200 *pixels* em média – a ponto de não apresentarem uma textura distinguível o *software*, fato que também exigiu que se adotasse em

média tamanho mínimo de 25 *pixels* por objeto. Desta forma, evitou-se a segmentação da imagem em objetos muito pequenos, o que geraria um alto grau de confusão espectral na classificação (e levaria consequentemente a muitos erros), e evitou-se também que houvessem segmentos muito grandes que poderiam conter mais de um objeto em sua área. A **Figura 36** ilustra alguns exemplos dos resultados da segmentação.

Figura 36 - Segmentação de uma área rural (bacia 42) e uma área urbana (bacia 48)

Nota-se pela **Figura 36** que a segmentação obteve bons resultados para áreas urbanas e rurais, apresentando alto grau de separação entre diferentes objetos, mesmo entre aqueles mais difíceis de serem distinguidos, como vegetação rasteira e arbórea nas áreas rurais, e asfalto e telhados nas áreas urbanas, o que mostrou que a priorização da cor na segmentação foi uma medida eficaz para a melhoria do processo. Entretanto, com valores de escala limitados, nas áreas rurais nota-se que objetos grandes como pastagens ou grandes áreas de solo exposto tiveram que ser divididos em vários segmentos para enquadrarem-se nos limites pré-determinados, o que não se caracteriza como um erro nem prejudica os resultados da segmentação, mas aumenta a quantidade de informações a serem interpretadas nas fases posteriores de classificação. O limite de escala agiu de forma oposta em áreas urbanas, onde os baixos valores de escala resultaram na não detecção de alguns objetos muito pequenos na imagem, como automóveis e postes de luz, o que também não representou grandes problemas aos trabalhos de classificação e à qualidade dos resultados. A qualidade da segmentação foi aferida apenas visualmente, considerando-se adequada aquela que obtivesse um alto grau de separação de alvos sem a distorção de seus formatos e sem que mais de um objeto de interesse fosse enquadrado em um mesmo segmento.

5.3.3 Classificação da imagem de satélite

Na **Figura 37** é apresentado o resultado da classificação na bacia do córrego do Gregório como um todo, que pode ser visto de forma mais detalhada no **APÊNDICE C** e comparado com a imagem original em maior escala apresentada no **APÊNDICE D**. As aferições do resultado da classificação nas sub-bacias mostraram que a distinção dos alvos urbanos foi bastante boa, apresentando alta precisão na identificação de diferentes tipos de coberturas como superfícies de terra, vegetação e superfícies impermeáveis. Porém, em algumas regiões da imagem houve confusão na identificação das classes telhados e cinzas, principalmente nas regiões altamente urbanizadas e de densa ocupação. Este problema foi também enfrentado por Costa (2010) para a classificação das classes telha escura e cimento. Essas confusões na classificação devem-se ao fato das respostas espectrais (assinaturas espectrais) dos materiais impermeáveis – como concreto e telhados – serem muito semelhantes entre si e muito diferentes das demais, problema relatado também por outros pesquisadores. Esteves (2006) quantificou superfícies impermeáveis em quatro pequenas áreas de controle de Brasília e verificou confusão espectral apenas entre classes impermeáveis, tendendo a uma superestimação da classe asfalto. De forma geral, este tipo de erro não prejudica a quantificação de superfícies permeáveis de impermeáveis, mas gera confusão quando da necessidade de separação de diferentes tipos de superfícies impermeáveis.

Figura 37 - Resultado da classificação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório

Dependendo da qualidade da imagem de satélite e das bandas disponíveis, confusões entre diferentes classes também podem ocorrer. Souza et al. (2003) relataram dificuldades entre a distinção de telhados de amianto, vegetação e solo exposto em uma imagem de resolução espacial de 1m com as bandas espectrais 1, 2 e 3. Esta confusão entre classes bastante distintas pode ser explicada por um experimento de Herold et al. (2002), que compararam o comportamento espectral de alvos intra-urbanos em diferentes bandas e comprovou que as

bandas infravermelho próximo (banda 4) e médio (banda 7) são extremamente importantes na diferenciação dos alvos urbanos. Portanto, é importante verificar se a imagem que se dispõe é realmente apropriada ao uso que se pretende fazer dela e, em casos de imagens de alta qualidade, deve-se assegurar que se possuem as ferramentas apropriadas para a extração das informações desejadas. Pinho, Kux e Almeida (2005) compararam a análise orientada a objetos com a classificação tradicional e concluiu que a primeira é uma alternativa promissora para minimizar o problema da grande variabilidade espectral entre classes em áreas urbanas. Desta forma, fica evidente que a classificação de imagens de alta resolução é uma questão desafiadora, que envolve muitos fatores além das próprias técnicas de classificação, principalmente se o objetivo do trabalho é a extração de informações com alto grau de detalhamento de áreas intra-urbanas.

Neste trabalho, a imagem de satélite, o material cartográfico e as ferramentas utilizadas mostraram-se adequadas ao nível de detalhamento desejado na classificação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório. As características utilizadas pelo *software* durante a classificação foram cor, textura, forma, resposta espectral entre outros. Quando se tem classes com respostas espectrais semelhantes, a classificação limita-se àquelas características que apresentam comportamento diferente, limitando assim a qualidade da classificação. Entretanto, apesar da confusão apresentada entre as classes cinza e telhados em algumas regiões da imagem, o resultado final não foi alterado de forma significativa, uma vez que ambas as coberturas possuem CN igual a 98, referente a superfícies impermeáveis. Vale lembrar estas duas foram as únicas coberturas que apresentaram confusões significativas entre si, o que ocorreu apenas em algumas regiões da imagem, enquanto as demais classes foram classificadas com bastante precisão. Desta forma, acredita-se que o resultado da classificação, sendo esta para fins hidrológicos, foi bastante satisfatório.

O uso de sensoriamento remoto em estudos hidrológicos não é recente e tem seu exemplo mais clássico na previsão do clima e precipitações a partir de Radares Meteorológicos. Entretanto, com o aumento da disponibilidade de imagens de satélite, estas tem sido frequentemente utilizadas para a caracterização de grandes bacias hidrográficas quanto a relevo e tipo e cobertura de solo com baixo grau de detalhamento, principalmente pela possibilidade de uso de imagens de baixa resolução espacial, disponibilizadas de forma gratuita pelas operadoras de satélites. Muitos estudos levantaram as características de grandes bacias a partir de sensoriamento remoto, utilizando diversos tipos de imagens e sensores

amostrais e para os mais diversos fins, desde a caracterização geomorfológica e gerenciamento de bacias até a análise de *habitat* naturais (SANTANA et al., 2008; GALVÍNCIO et al., 2007; TNER, 2004; SLOVINSCKI et al., 2009; SOLANKE et al., 2005; KUMAR; KUMAR, 2011). Porém, até recentemente, a classificação de ambientes urbanos nestes estudos limitou-se apenas à identificação da mancha urbana, sem nenhum tipo de detalhamento. Com o recente surgimento das imagens de alta resolução espacial, a identificação de objetos de pequena escala nas bacias tornou-se possível, e o detalhamento de objetos urbanos vem avançando de forma progressiva.

Na classificação realizada neste trabalho, foi possível quantificar as áreas das coberturas extraídas em cada sub-bacia, apresentados na **Tabela 13**, pelas quais foram obtidos os parâmetros hidrológicos referentes à cobertura de solo. Nota-se que as áreas classificadas, na somatória final, variam ligeiramente (cerca de 0,1%) em relação à área de cada sub-bacia calculada pelo **ArcGIS**. Este desvio ocorre porque o *software* faz um arredondamento do valor final da área dos polígonos durante o cálculo das mesmas. Desta forma, o valor de área obtido pelo cálculo de apenas um polígono (sub-bacias) difere ligeiramente daquele valor obtido pela soma de milhares de polígonos (segmentos de cada sub-bacia) devido à quantidade de arredondamentos durante o processo de cálculo. Entretanto, esta irregularidade não afeta o resultado final, uma vez as equações utilizadas para cálculo de CN e PP trabalham com médias ponderadas, ou seja, são divididas pela área total das sub-bacias.

Tabela 13 - Área de cada cobertura em cada uma das 12 sub-bacias do córrego do Gregório

Sub-bacia	Área de cada tipo de cobertura (m ²)								Área Total
	Arbórea	Rasteira	Telhados	Cinzas	Solos	Sombras	Perenes	Entulhos	
42	455.521,50	734.576,50	-	30.581,25	351.748,75	-	76.052,00	-	1.648.480,00
43	341.184,25	582.434,50	-	13.937,25	267.321,75	-	-	-	1.204.877,75
44	285.382,50	575.492,75	142.151,75	252.324,00	228.168,50	83.142,25	-	-	1.566.661,75
45	28.036,25	437.469,50	36.590,50	37.644,00	41.828,00	11.066,75	-	-	592.635,00
46	65.924,00	127.006,00	104.712,50	130.453,75	57.532,50	42.662,50	-	-	528.291,25
47	261.008,25	656.887,00	96.377,75	66.919,25	121.874,25	60.156,50	-	-	1.263.223,00
48	61.346,50	66.137,00	294.444,00	284.717,50	34.996,75	87.083,00	-	-	828.724,75
49	591.954,50	221.189,50	358.328,50	168.012,25	49.911,00	96.914,00	-	-	1.486.309,75
50	237.832,25	70.501,00	807.361,75	662.005,50	78.624,00	174.998,25	-	-	2.031.322,75
51	983.061,25	856.376,00	1.184.582,00	1.361.327,00	330.560,50	441.348,50	-	8.509,75	5.165.765,00
52	211.948,00	51.900,25	527.238,50	522.364,50	33.447,25	172.079,50	-	-	1.518.978,00
53	207.987,75	264.958,00	219.852,50	196.267,00	65.460,00	96.134,50	-	-	1.050.659,75

Nota-se que, em algumas sub-bacias, a sombra representou uma parcela significativa da cobertura da bacia, chegando a ocupar mais de 10% da área total (sub-bacias 48 e 52). Dentre os possíveis erros que podem ser cometidos durante a classificação, estima-se que a interferência das sombras nas imagens represente a maior fonte de erros. Apesar disso, desconsiderando-se estas sombras durante o cálculo de CN, espera-se minimizá-los o quanto possível, pois este método equivale à adoção de um CN para sombras igual ao CN médio da bacia. Esteves (2006), em seu trabalho sobre quantificação de superfícies impermeáveis, adotou a mesma solução, atribuindo à sombra um valor de impermeabilidade igual ao da média de impermeabilização da área de estudos. Apesar das sombras representarem uma interferência indesejada da imagem, Centeno e Pacheco (2011) destacam seu papel na fotointerpretação, na qual esta tem uma função cognitiva fundamental na sensação de tridimensionalidade das imagens, e ainda aponta a importância das sombras na identificação de objetos mais elevados. No entanto, o mesmo autor afirma que com o avanço das resoluções espaciais, as sombras passaram a prejudicar a interpretação de imagens, pois estas podem se sobrepor a objetos menores, escondendo objetos e diminuindo o potencial uso da imagem.

5.3.4 Obtenção dos parâmetros hidrológicos

Após o cálculo das áreas de cada cobertura foi possível obter o valor de CN para cada sub-bacia, assim como PP. No ambiente SIG, utilizando-se as técnicas descritas no capítulo 4.6.2, calculou-se também a área (A), declividades (S) e comprimento dos talwegues (L) das sub-bacias. Na **Tabela 14** estão apresentados todos os dados obtidos por sensoriamento remoto e SIG.

Tabela 14 - Resultados obtidos após processamento de dados em ambiente SIG

	Área	CN	PP	L (km)	S (m/m)
Bacia 42	1.643.027,94	65,29	0,77	1.889,57	0,03134
Bacia 43	1.204.894,41	64,39	0,77	1.737,30	0,03486
Bacia 44	1.566.738,23	72,91	0,55	1.560,03	0,01495
Bacia 45	592.875,24	66,94	0,79	933,00	0,05867
Bacia 46	528.378,76	82,68	0,37	391,84	0,02557
Bacia 47	1.263.240,50	71,22	0,73	2.144,28	0,03037
Bacia 48	828.847,01	91,10	0,15	852,83	0,03768
Bacia 49	1.486.322,25	74,49	0,55	2.073,80	0,03362
Bacia 50	2.031.731,98	90,71	0,15	1.334,64	0,01294
Bacia 51	5.166.229,07	82,65	0,36	2.687,00	0,01674
Bacia 52	1.525.900,99	89,72	0,17	1.173,59	0,00852
Bacia 53	1.051.023,24	79,48	0,45	1.384,76	0,01074

A **Figura 38** apresenta o resultado do CN de forma gráfica, facilitando a compreensão das sub-bacias mais críticas em relação à geração de escoamento superficial.

Figura 38 - Resultado do cálculo de CN nas sub-bacias hidrográficas do córrego do Gregório

5.4 ATUALIZAÇÃO DO MODELO EESC

A atualização do modelo EESC foi uma etapa bastante simples, onde os novos valores foram inseridos nos arquivos de dados do modelo. Além dos dados apresentados na **Tabela 14**, foram inseridos no arquivo de dados TREDAD os valores de α e β obtidos por Lira (2003) a partir de levantamentos em campo, apresentados na **Tabela 15**.

Tabela 15 - Valores de α e β obtidos por Lira (2003)		
Trecho	α	β
6.2.1	1,00	0,70
6.3.1	0,59	0,79
6.4.1	0,80	0,78
6.5.1	0,61	0,75
6.6.1	0,78	0,71
6.7.1	0,81	0,71

Após a inserção, nos arquivos de dados do modelo EESC, dos valores apresentados na **Tabela 14** e **Tabela 15**, fez-se uma comparação entre os valores originais e aqueles obtidos neste trabalho, além de uma comparação dos resultados de simulações.

5.4.1 Comparação entre o modelo EESC original e o atualizado

A **Tabela 16** compara os valores dos 5 parâmetros (A, CN, PP, L e S) obtidos por sensoriamento remoto com os valores presentes no modelo EESC original.

Tabela 16 - Comparação entre parâmetros do modelo original e os parâmetros atualizados

	Área Original (m²)	Área Atualizada (m²)	CN Original	CN Atualizado	PP original	PP atualizado	L original (m)	L atualizado (m)	S original (m/m)	S Atualizado (m/m)
Bacia 42	1.499.000,00	1.643.027,94	65	65,29	0,50	0,77	2.600,00	1.889,57	0,04438	0,03134
Bacia 43	1.429.000,00	1.204.894,41	65	64,39	0,50	0,77	2.000,00	1.737,30	0,02154	0,03486
Bacia 44	1.582.000,00	1.566.738,23	65	72,91	0,50	0,55	1.510,00	1.560,03	0,07692	0,01495
Bacia 45	644.000,00	592.875,24	65	66,94	0,50	0,79	900,00	933,00	0,04939	0,05867
Bacia 46	560.000,00	528.378,76	85	82,68	0,50	0,37	735,00	391,84	0,06396	0,02557
Bacia 47	1.225.000,00	1.263.240,50	75	71,22	0,50	0,73	2.350,00	2.144,28	0,02553	0,03037
Bacia 48	667.000,00	828.847,01	95	91,10	0,10	0,15	600,00	852,83	0,07628	0,03768
Bacia 49	1.632.000,00	1.486.322,25	90	74,49	0,25	0,55	2.300,00	2.073,80	0,02542	0,03362
Bacia 50	2.098.000,00	2.031.731,98	95	90,71	0,10	0,15	1.040,00	1.334,64	0,0598	0,01294
Bacia 51	3.555.000,00	5.166.229,07	90	82,65	0,15	0,36	4.000,00	2.687,00	0,0260	0,01674
Bacia 52	1.282.000,00	1.525.900,99	95	89,72	0,10	0,17	1.115,00	1.173,59	0,06178	0,00852
Bacia 53	1.393.000,00	1.051.023,24	90	79,48	0,10	0,45	870,00	1.384,76	0,07399	0,01074
Bacia do Gregório	17.566.000,00	18.889.209,62	81,97	78,87	0,30	0,45	10.600,00	9.889,50	0,045516	0,019915

Pelas médias dos valores apresentados para a bacia hidrográfica do córrego do Gregório como um todo, nota-se que alguns parâmetros como área, número de deflúvio e comprimento de talvegue apresentaram poucas diferenças entre o modelo original e o atualizado. Entretanto, se comparados individualmente por sub-bacia, pode-se notar diferenças consideráveis em alguns deles como, por exemplo, CN na sub-bacia 49. Dentre todos os parâmetros, a declividade dos talvegues apresentou as maiores diferenças entre os dois modelos. A declividade média no modelo original é maior do que o dobro daquela obtida por sensoriamento remoto, uma diferença muito maior do que se esperava encontrar e que pode ter grande influencia no tempo de concentração das bacias.

A maioria das diferenças verificadas entre as áreas das sub-bacias do modelo original e o atualizado são consequências da utilização de diferentes materiais cartográficos na determinação de seus divisores de águas. A maior diferença neste sentido ocorreu na sub-bacia 51, que teve sua área aumentada de 3,5km² para 5,1km². Grande parte desta diferença

pode ser atribuída ao aumento dos limites da bacia do próprio córrego do Gregório, que foi estendida na direção sul, especialmente na região da sub-bacia 51. As diferenças nos traçados das sub-bacias e a expansão dos limites da bacia do córrego do Gregório podem ser notadas comparando-se a **Figura 25** e a **Figura 27**.

Para melhor compreensão destas diferenças em termos práticos, comparou-se os resultados de hidrogramas gerados para situações semelhantes nos dois modelos, o original e o atualizado. Para isso, foram simulados hidrogramas de cheia em alguns pontos da rede de macrodrenagem, mais especificamente os tramos 6.3, 6.5 e 6.7, escolhidos por estarem localizados na cabeceira, centro e exutório da bacia, respectivamente. As simulações foram feitas para 3 diferentes precipitações, com tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos, todas com duração de 1 hora (**Figura 39**).

Figura 39 - Comparação de hidrogramas entre o modelo EESC original e o atualizado (*continua*)

Figura 39 - Comparação de hidrogramas entre o modelo EESC original e o atualizado (*conclusão*)

A atualização do modelo EESC, na maioria das simulações, diminuiu e suavizou o formato do hidrograma de cheia da bacia do Gregório, principalmente em seu exutório (tramo 6.7). O pico inicial nos hidrogramas do modelo original gerados para os tramos 6.5 e 6.7 foi verificado como resultado do hidrograma da sub-bacia 50. No modelo atualizado, esta bacia teve seu CN reduzido – o que diminuiu o volume escoado – e PP e comprimento de talvegue aumentados – o que aumentou o tempo de concentração. De modo geral as maiores alterações ocorreram na ascensão do hidrograma, onde houve uma redução significativa no tempo de pico, aproximando este tempo total de precipitação (1 hora). A **Tabela 17** mostra a variação entre o modelo original e o atualizado para os parâmetros vazão de pico, tempo de pico e volume total escoado para os hidrogramas apresentados na **Figura 39**.

Tabela 17 - Variação nos resultados do modelo original para o modelo atualizado

TRAMO	Tr = 10			Tr = 50			Tr = 100		
	6.3	6.5	6.7	6.3	6.5	6.7	6.3	6.5	6.7
Qp	10,99%	-26,58%	-33,96%	10,22%	-8,52%	-21,03%	10,21%	-1,63%	-15,75%
tp	-5,00%	77,78%	60,00%	-5,56%	77,78%	50,00%	-5,88%	66,67%	40,00%
V total	5,83%	-26,16%	-29,86%	5,75%	-13,29%	-17,75%	5,42%	-8,84%	-13,44%

Pela **Tabela 17** nota-se que há uma grande diferença entre os resultados do modelo original e o atualizado. Todos os parâmetros variaram de forma positiva e negativa para todos os tempos de retorno, mas de forma geral apresentaram uma tendência bastante clara. Os hidrogramas para o tramo 6.3 variaram de forma positiva para Qp e Volume total e negativa para tp em todas as simulações, enquanto que os tramos 6.5 e 6.7 apresentaram uma tendência contrária,

ou seja, variaram de forma negativa para Qp e Volume total e positiva para tp. Isso indica que o hidrograma de cheia da cabeceira da bacia foi um pouco maior no modelo atualizado (variação máxima de 10,99% para Qp e 5,72% para Volume total). Já no centro e exutório da bacia, houve uma redução geral considerável do hidrograma (máxima de 29,86% para volume total e 33,96% para Qp).

Uma vez que a ocupação urbana da cidade já está bastante consolidada, sabe-se que, embora a diferença idade entre os dados estimados originalmente e aqueles obtidos por sensoriamento remoto seja de quase 20 anos, a parcela urbana apresenta uma limitada possibilidade de mudança em sua cobertura e ocupação e, caso ocorressem mudanças, essas tenderiam ao avanço da urbanização, aumentando os valores de CN e diminuindo os de PP. Entretanto, os valores destes parâmetros obtidos neste trabalho foram em maioria menores que os estimados em 1993, contrariando a tendência mais plausível. Desta forma, acredita-se que, para a área urbana da bacia do Gregório, os valores de CN e PP no modelo original foram ligeiramente superestimados.

Para a parcela rural, os valores de CN e PP obtidos por sensoriamento remoto refletem um ambiente um pouco mais urbanizado do que aquele encontrado no modelo, mas mesmo assim o grau de vegetação desta parcela foi superior ao estimado no passado. Devido à grande diferença entre os métodos de obtenção dos parâmetros hidrológicos, seria pouco apropriado atribuir as diferenças de valores a supostas mudanças na bacia hidrográfica. Estima-se que grande parte das diferenças pode ser atribuída ao material disponível a cada profissional, tanto em ferramentas de apoio quanto em material cartográfico.

Para uma melhor compreensão da magnitude das mudanças ocorridas pela atualização do modelo, optou-se por comparar o modelo original com o atualizado sem que se alterasse o valor de área original do modelo EESC (ente modelo sem a atualização de área foi chamado de “atualizado parcialmente”), ou seja, foram alterados apenas os parâmetros CN, L, S, e os parâmetros de canais α e β obtidos por Lira (2003). O resultado é apresentado na **Figura 40**.

Figura 40 - Comparação de hidrogramas entre o modelo EESC original e o atualizado parcialmente (apenas os parâmetros CN, PP, L e S)

A **Tabela 18** mostra a variação entre o modelo original e o atualizado parcialmente para os parâmetros vazão de pico, tempo de pico e volume total escoado para os hidrogramas apresentados na **Figura 40**.

Tabela 18 - Variação nos resultados do modelo original para o modelo atualizado parcialmente (apenas os parâmetros CN, PP, L e S)

	Tr = 10			Tr = 50			Tr = 100		
TRAMO	6.3	6.5	6.7	6.3	6.5	6.7	6.3	6.5	6.7
Qp	12,09%	-29,54%	-35,56%	10,41%	-15,07%	-23,84%	10,24%	-9,38%	-19,11%
TP	-10,00%	44,44%	50,00%	-5,56%	44,44%	40,00%	-5,88%	44,44%	40,00%
V total	6,93%	-31,61%	-34,56%	6,17%	-20,65%	-23,72%	5,65%	-16,83%	-19,84%

Como a área do modelo EESC original era menor do que a área do modelo EESC atualizado e, de forma geral, a atualização do modelo reduziu o hidrograma de cheia da bacia, era de se esperar que uma comparação na qual fossem mantidas as áreas originais resultasse em uma redução ainda maior dos hidrogramas, uma vez que o parâmetro área é diretamente proporcional ao volume de escoamento de uma bacia. Entretanto, a magnitude desta variação é que torna a comparação interessante. Para o exutório da bacia (tramo 6.7), houve uma redução de 35,96% na vazão de pico dos hidrogramas do modelo original para o atualizado parcialmente. Se comparada a variação de Qp entre o modelo atualizado e o atualizado parcialmente, nota-se que a atualização do parâmetro área é responsável por 1,40% do total de variação. Para o parâmetro volume total, para o mesmo tramo 6.7, a atualização da área foi responsável por uma variação de 4,70% (de -29,86 para -34,56). Ambas as variações foram pequenas, porém, considerando que a variação entre a área original e a área atualizada foi de apenas 1,07%, estas então tornam-se significativas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo a utilização de sensoriamento remoto para a obtenção dos parâmetros hidrológicos CN, PP, A, L e S da bacia hidrográfica do córrego do Gregório. Analisando o resultado, conclui-se que este objetivo foi cumprido e que a utilização de imagens de satélite aliada a técnicas de processamento digital de imagens e SIG apresenta-se como uma ferramenta poderosa e bastante adequada para trabalhos de hidrologia urbana. O cálculo de variáveis hidrológicas em ambiente SIG é apropriado e melhores serão os resultados quanto melhores forem os materiais cartográficos disponíveis, bem como a imagem de satélite, a experiência do operador e o seu grau de conhecimento da área estudada.

Pela análise de sensibilidade, conclui-se que o parâmetro CN é o de maior influência aos hidrogramas do modelo EESC, enquanto PP mostrou-se o menos influente. Os parâmetros hidráulicos α e β são bastante representativos ao formato do hidrograma, no sentido de que quanto maiores os seus valores, menores os valores de vazão e tempo de pico dos hidrogramas.

A classificação de áreas urbanas pelo método da Análise Orientada a Objetos apresentou bons resultados e estes são uma importante fonte de dados para estudos na bacia hidrográfica do córrego do Gregório. A imagem de satélite de alta resolução de área urbana, bem como o resultado deste trabalho, pode ainda ser utilizada em muitas outras áreas do conhecimento além de hidrologia urbana como, por exemplo, em engenharia de transportes, arquitetura e urbanismo, estudos de caráter social e de gerenciamento urbano.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e as ferramentas de geoprocessamento, em trabalhos de uso e ocupação de solos urbanos, podem resultar em economia de tempo e de recursos financeiros, dependendo do material de apoio já disponível sobre o local e da infraestrutura da qual dispõem os profissionais.

Durante os trabalhos de classificação, em algumas regiões da imagem houve confusão espectral na distinção de telhados de cerâmica escura e asfalto, devido às semelhanças entre assinaturas espectrais destes materiais. Porém, em estudos hidrológicos, ambos os materiais representam superfícies impermeáveis e, portanto, tem as mesmas características (CN=98). Desta forma este tipo de erro não alterou o resultado dos parâmetros hidrológicos nem o resultado final do trabalho.

Este trabalho representa um passo importante em estudos de hidrologia urbana por unir esta área à crescente e já consolidada ciência das geotecnologias e sensoriamento remoto, ampliando as possibilidades de trabalho de profissionais de ambas as áreas e aperfeiçoando de forma progressiva o resultado de seus trabalhos.

7 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que, para trabalhos futuros, sejam levantados dados de campo para averiguação da confiabilidade do modelo EESC na previsão de vazões, possibilitando assim a calibração do modelo. Para melhores resultados de simulação no modelo EESC recomenda-se também a aplicação da metodologia deste trabalho para toda a área urbana da cidade de São Carlos. Se possível, recomenda-se a instalação de uma estação fluviométrica em algum ponto próximo ao exutório da bacia hidrográfica do córrego do Gregório, bem como o levantamento de uma curva chave, preferencialmente próxima ao SESC São Carlos, onde a seção do córrego foi reformada, ou na Rua Comendador Alfredo Maffei, onde a seção é bem definida e não natural. Desta forma, será possível a construção de uma série histórica de dados fluviométricos, aumentando valiosamente o conhecimento existente sobre a bacia hidrográfica do córrego do Gregório.

É de fundamental importância para a continuidade desta linha de pesquisa a aquisição, por parte da instituição, do *software* **Definiens** utilizado nesta pesquisa, para que se possa prosseguir com os trabalhos de sensoriamento remoto, além de se poder aproveitar de forma plena o potencial da imagem de satélite disponível no Departamento de Hidráulica e Saneamento da USP, São Carlos. Recomenda-se ainda que, à medida que surgirem novas técnicas de processamento digital de imagens e avançarem a qualidade dos produtos de sensoriamento remoto, novas tecnologias e processos sejam aplicados nesta mesma área de estudo, permitindo assim a comparação resultados e o monitoramento das modificações no uso e ocupação do solo em meio à expansão urbana.

Por fim recomenda-se que seja criado um grupo de pesquisas voltado às geotecnologias e sensoriamento remoto na instituição onde foi realizado este trabalho, visto que estas são ciências muito promissoras e que cada vez mais darão suporte às mais diversas áreas da engenharia. Desta forma, recomenda-se ainda a inclusão de outras áreas do conhecimento neste grupo, como por exemplo engenharia de transportes ou engenharia ambiental. Desta

forma, com a criação do grupo, espera-se que haja uma massa crítica multidisciplinar nesta linha de pesquisa, unindo os melhores recursos materiais e intelectuais de cada ciência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDOH, R. Y. G. Urban drainage and wastewater treatment for 21st century. In: PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 9., 2002, Portland: ASCE, 2002. Disponível em: <<http://www.hydro-international.biz/us/library/general/Andoh-2002-9ICUD.pdf>> Acesso em: 22 jul. 2011

ANTUNES, A. F. B.; CORTESE, S. C. Determinação de áreas de ocupação irregulares por meio de Análise Orientada a Objetos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p.481-487.

AZEVEDO NETO, J. M.; VILLELA, S. M. **Manual de hidráulica**. 5. ed. São Paulo: Blücher, 1969. v. 3.

BAIO, J. A. F. **Avaliação da contaminação nos principais corpos d'água do município de São Carlos/SP**. 2009. 111f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre drenagem pluvial na cidade de São Carlos, SP**. 1991. 328f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 1991.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Maranguape/PB**. 2006. 116f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O. Aspectos institucionais e de financiamento dos sistemas de drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre. v.7, n.1, p.29-49, 2002.

BAPTISTA M. M.; QUEIROZ, C. M. Potencialidades espectrais e radiométricas. **Revista MundoGEO**, 2011. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2011/06/09/potencialidades-espectrais-e-radiometricas/>> Acesso em: 7 jan. de 2012.

BELTRAME, A. M. K. **Mapeamento da cobertura do solo ao longo da faixa de domínio de trem metropolitano: linha f em São Paulo**. 2008. 104f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2005. 471p.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling, The Primer**. Chichester: Wiley. 2001. 359p.

BLASCHKE, T.; LANG, S. **Object based image analysis for automated information extraction – A synthesis**. MESURING THE EARTH, 2., San Antonio: MAPPS/ASPRS, 2006.

BRASIL - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Resolução da presidência nº 5**. 30 de março de 1993. Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos. 27f. Brasília. 1993.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: Unicamp, 1996. 197 p.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 302p.

CDCC - CENTRO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA E CULTURAL. **Roteiro visita sub-bacia hidrográfica do córrego do Gregório**. Universidade de São Paulo, São Carlos: USP, 2007.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Unicamp. 1998. 169p.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Cálculo das Vazões Máximas, Médias e Mínimas nas Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo**. São Paulo: 1994.

DEFESA CILVIL DE SÃO BERNARDO DO CAMPO – SCS. **Enchente, inundação ou alagamento?** Blog da Defesa Civil de SCS 2011. Disponível em:

<<http://dcsbcsb.blogspot.com/2011/06/enchente-inundacao-ou-alagamento.html>> Acesso em: 15 out. de 2011.

DEFINIENS. eCognition, **User's guide 4.0**. Disponível em:

<<http://www.gis.unbc.ca/help/software/ecognition4/ELuserguide.pdf>> Acesso em: 21 de jan. 2011.

DIGITAL GLOBE. **QuickBird imagery products**, Product Guide, Colorado, 2004, 38p. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com/index.php/6/DigitalGlobe+Products>> Acesso em: 25 de jan. 2011.

DLUGOSZ, F. L.; ROSOT, N. C.; ROSOT, M. A. D.; OLIVEIRA Y. M. M. Índice para avaliação de segmentação de imagens. **Revista Floresta**, Curitiba, v.39, n.1, p.131-143, 2009.

DURIEUX, L.; LAGABRIELLE, E.; NELSON, A. A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of spot 5 images and existing GIS data. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Pequim, v.63, n.4, p.399-408, 2008.

FERNANDES, S. C. **Avaliação de imagens de satélite de alta e muito alta resolução espacial para a discriminação de classes de uso e ocupação do solo: aplicação ao caso da sub-bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal**. 2005. 106f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v.14, p.45-56, 1999.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. 1. ed, São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97p.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de bacias de retenção das águas pluviais com base no método racional**. 2004, 131f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FRAUMAN, F.; WOLFF, E. Change detection in urban areas using very high spatial resolution satellite images - Case study in Brussels: locating main changes in order to update the Urban Information System. **AM/FM-GIS Belux**, n. 32, p. 9-14. Bruxelas, 2005.

GENOVEZ, A. M. **Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias rurais do estado de São Paulo**. 1991. 149f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. Tradução de Roberto Marcondes César Junior e Luciano da Fontoura Costa. São Paulo: Blücher. 2000. 509p.

HALL, M. J. **Urban hidrology**. Londres: ELSEVIER. 1984. 310p.

HAY, G. J.; CASTILLA, G. Object-based Image Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT). **International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, v. 36, n. 4, 2006.

HEROLD, M.; GARDNER, M.; HADLEY, B.; ROBERTS, D. The spectral dimension in urban land cover mapping from high-resolution optical remote sensing data. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF URBAN AREAS, 3., Istanbul, 2002. **Anais...** Istanbul: ISPRS, 2002.

HUNT, I. **Química Orgânica: Spectroscopy**. Departamento de Química, Universidade de Calgary. 2006. Disponível em: <<http://www.chem.ucalgary.ca/courses/350/Carey5th/Ch13/ch13-1.html>> Acesso em: 14 jan. 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**, Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/> Acesso em: 12 jan. 2011.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Atendimento ao usuário: O satélite LANDSAT**. Divisão de Geração de Imagens. 2004.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sistema de processamento de imagens georreferenciadas**. SPRING 4.3.2: Geoprocessamento ao alcance de todos. 2007. 1 CDROM.

INTERIMAGE - **Home**. Disponível em: <<http://www.lvc.ele.puc-rio.br/projects/interimage/>> Acesso em: 24 jan. 2011

IWUGO, K. O.; ANDOH, R. Y. G.; FEEST, A. F. Cost-effective integrated drainage and wastewater treatment system. **Journal of Chartered Institution of Water and Environmental Management**, v. 16, n. 1, p. 53-57, 2002.

JACQUIN, A.; MISAKOVA, L.; GAY, M. A hybrid object-based classification approach for mapping urban sprawl in periurban environment. **Landscape and Urban Planning**, v. 84, n. 2, p. 152-165, Amsterdam: ELSEVIER, 2008.

JAMBERSI, B. P. **A escola normal e a formação da elite intelectual da cidade de São Carlos (1911 - 1930): um estudo dos valores republicanos da época**. 2008. 75f. Monografia (Trabalho de conclusão de curso, Pedagogia) - Centro de Educação e Ciências Humanas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

KUTNER, A. S.; CONTE, A. E.; NITTA, T. Análise geológica e caracterização dos solos para avaliação do coeficiente de escoamento superficial na bacia do Alto Tietê. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracajú. **Anais...** Aracajú: ABRH, 2001.

LAZARO, T. R. **Urban Hydrology: A multidisciplinary perspective**. Michigan: Technomic Publishing Co., 1990. 249p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley and Sons, 1994. 117 p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 5ed. New York: John Wiley and Sons. 2004. 763p.

LIRA, A. M. **Avaliação das condições do sistema de macrodrenagem da cidade de São Carlos - SP**. 2003. 188f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908p.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1989, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, p. 99-124, 1989,

MAIDMENT, D. R. **GIS and hydrology modeling**. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. *Environmental Modeling with GIS*. New York: Oxford University Press, 1993. p.147-167.

MARTINS, J. R. **Obras de macrodrenagem**. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. *Drenagem urbana*. Porto Alegre: UFRGS, 1998.

MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. Chichester: John Wiley and Sons, 1999. 292 p.

MEINEL, G.; NEUBERT, M.; REDER, J. The potencial use of very high resolution satellite data for urban areas first experiences with ikonos data, their classification and application in urban planning and environmental monitoring. In: REMOTE SENSING OF URBAN AREAS INTERNACIONAL SYMPOSIUM, 2., 2001, Regensburg. **Anais...** Regensburg: ISPRS, 2001, p.196-205.

MELO, D. H. C. T. B. **Uso de dados IKONOS ii na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. 2002. 146f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Especiais, Ministério da Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2002.

MENDES, H. C. **Urbanização e impactos ambientais**: Histórico de Inundações e Alagamentos na Bacia do Gregório, São Carlos - SP. 2005. 149f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MENDES, H. C; MENDIONDO, E. M. Histórico da expansão urbana e incidência de inundações: o caso da bacia do Gregório, São Carlos - SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n.1, p. 17-27, 2007.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 3ed. São Paulo: Blücher, 2008. 363p.

PARANHOS FILHO, A. C.; LASTORIA, G., TORRES, T. G. **Sensoriamento remoto ambiental aplicado**: Introdução às geotecnologias. Campo Grande: UFMS. 2008. 198p.

PEKKARINEN, A. A method for the segmentation of very high spatial resolution images of forested landscapes. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, n. 14, p. 2817-2836, 2002..

DAEE – Departamento de águas e energia elétrica. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**: 2004 / 2007 Resumo. São Paulo: DAEE, 2006. 92p.

PINHO, C. M. D.; KUX, H.; ALMEIDA, C. M. Elaboração de rede semântica para classificação de cobertura do solo de ambientes intra-urbanos: o caso de São José dos Campos - SP, Brasil. 2007. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p.637-644.

PONCE, V. M., HAWKINS, R. H. Runoff curve number: has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19. 1996.

PORTO, R. L. L. **Escoamento superficial direto**. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. Drenagem urbana. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.

PORTO, R. L. L. **Drenagem urbana**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS. 2004.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: EESC-USP, 4. ed, 2006.

RIBEIRO, B. M. G.; KUX, H. J. H. Classificação orientada a objeto para mapeamento do uso do solo – Métodos de análise de expansão urbana. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2007, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p.7893-7900.

RIGHETO, A. M.; PORTO, R. M.; VILLELA, S. M. **Hidráulica computacional aplicada a problemas de Drenagem Urbana**. 1994. 23f. Seminário. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1994.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. 161f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; 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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5-18. 2005.

SCHOWENGERDT, R. **Remote sensing models and methods for image processing**. San Diego: Academic Press, 1997.

SCHRADER, H. T.; POUNCEY, R. **Erdas field guide**. 4. ed, Atlanta: Erdas Inc., 1997. 656p.

SCS - SOIL CONSERVATION SERVICE. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Release - Washington: United States Department Agricultural, n. 55, 1975.

SETZER, J.; PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo**. v. 2, n. 2, p. 81-104. São Paulo: DAEE, 1979.

SHS - CONSULTORIA E PROJETOS DE ENGENHARIA LTDA. **Plano diretor de drenagem urbana ambientalmente sustentável do município de São Carlos**. Relatório Síntese, n. 1, 2011.

SILVA, G. B. L. **Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas**. 2006, 180f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SOUZA, I. M.; PEREIRA, M. N.; GARCIA, L. M. F.; KURKDJIAN, M. L. N. O. Mapeamento do uso do solo urbano através da classificação por regiões baseada em medidas texturais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed, Porto Alegre: ABRH, 2006. 678p.

TUCCI, C. E. M. **Escoamento superficial**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e aplicação. 3. ed, Porto Alegre: UFRGS, 2002. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. **Avaliação e controle da drenagem urbana** 2. ed, Porto Alegre: UFRGS. 2001.

WILKEN, P. S. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: CETESB. 1978. 478p.

WRIGHT, L. T.; HEANEY, J. P. **Design of distributed stormwater control and reuse systems**. In: MAYS, L. W. Storm Collection Systems Design Handbook. New York: McGraw-Hill. 2001. 166p.

XAVIER-DA-SILVA, J. O que é geoprocessamento? **Revista do Crea RJ** n. 79, Rio de Janeiro: CREA-RJ, p. 42-44, 2009.

ZHANG, Y. J., Evaluation and comparison of different segmentation algorithms. **Pattern Recognition Letters**, v.18, n.10, Amsterdam: ELSEVIER. p.963-974.1997.

ANEXO A – Tabelas do método do SCS

APÊNDICE A - Hidrogramas da análise de sensibilidade

APÊNDICE B - Resultados para solo do tipo hidrológico A

APÊNDICE C - Resultado da classificação da bacia hidrográfica do córrego do Gregório

APÊNDICE D - Imagem detalhada da bacia hidrográfica do córrego do Gregório