

# ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS QUALI-QUANTITATIVOS NA BACIA DO CÓRREGO DO MINEIRINHO, SÃO CARLOS-SP

*Patrik de Oliveira Aprígio<sup>1</sup>; Gabriela Rahal de Rezende<sup>2</sup> & João Luiz Boccia Brandão<sup>3</sup>*

**RESUMO** – Esta pesquisa faz parte do projeto HIDROECO que é uma rede voltada para a quantificação de alterações no regime hidrológico decorrentes de atividades antrópicas em bacias hidrográficas localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. Um dos principais desafios do planejador é se antecipar e controlar os impactos antes que os mesmos se tornem realidade. Dentro deste contexto, é fundamental a realização de estudos que forneçam prognósticos, sobretudo em bacias em processo de urbanização, como é o caso da bacia do córrego do Mineirinho, São Carlos-SP. A pesquisa está sendo financiada pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), e tem como objetivo realizar análises quantitativas e qualitativas em função de diferentes cenários de uso do solo, através do uso de instrumentos de geoprocessamento e modelagem matemática. Este estudo observou a necessidade do monitoramento e da calibração específica para cada bacia hidrográfica e para cada modelo de poluição difusa, pois a carga gerada depende de muitas variáveis, como o padrão de uso do solo, as características hidrológicas e de topografia, a cobertura vegetal, a estação do ano, a limpeza das ruas e as práticas de gerenciamento de uso do solo.

**ABSTRACT** - This research is part of the HIDROECO research project which is a network dedicated to the quantification of changes in hydrological regime due to human activities in watersheds located in the southern, southeastern and northeastern Brazil. One of the main challenges of the planner is to anticipate and manage the impacts before they become reality. Within this context, it is critical to conduct studies that provide forecasts, especially in basins undergoing urbanization, such as the one of the Mineirinho stream, located in São Carlos. The research is being funded by FINEP (Financier of Studies and Projects), and aims to conduct quantitative and qualitative analyzes for different scenarios of land use, through the use of GIS tools and mathematical modeling. This study noted the need for monitoring and calibration to each basin and for each model type of diffuse pollution, because the charge generated depends on many variables, such as the pattern of land use, hydrological characteristics and topography, vegetation, seasonality, street cleaning and the management practices of land use.

**Palavras-chave:** bacias urbanas, poluição difusa, uso e ocupação do solo.

---

1) Mestre em Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - EESC-USP. Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13566-590, Telefone: (16) 3373 9571, Fax: (16) 3373 9550. papapatrik@hotmail.com

2) Mestranda em Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - EESC-USP. Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13566-590, Telefone: (16) 3373 9571, Fax: (16) 3373 9550. gabrielarahal@gmail.com

3) Professor Doutor da. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo EESC-USP. Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13566-590, Telefone: (16) 3373 8609, Fax: (16) 3373 9550. jlbb@sc.usp.br

# 1 INTRODUÇÃO

O Homem tira da natureza os recursos para sua sobrevivência e desenvolvimento desde os primórdios da humanidade. Com o aumento populacional juntamente com os níveis de consumo, os recursos naturais foram explorados de forma intensa e inconsequente nos últimos anos. A formação das cidades foi feita sem planejamento, causando muitos desequilíbrios ao ambiente.

Durante toda história da humanidade, a água foi e ainda é utilizada para diluir e afastar poluentes, pois o desenvolvimento urbano está frequentemente associado com a substituição de ambientes naturais ou seminaturais (solo, vegetação, recursos hídricos) por ambientes construídos. Neste cenário, as águas pluviais e os esgotos são direcionados para os corpos d'água adjacentes aos canais de drenagem (Haughton & Hunter, 1994, apud Benini et al. 2004).

Para possibilitar a sobrevivência da cidade, é necessária uma grande área de abastecimento de energia e matéria - o seu entorno - que também absorve a entropia e a poluição gerada por ela. Com o crescimento da cidade, intensificam-se os problemas mais básicos, como falta de água potável, energia, capacidade de transporte, áreas de percolação de águas de chuvas intensas (Janducci,2008).

De acordo com Campana & Tucci (2001) apud Benini (2004) há uma grande diferença entre controlar os impactos antes do desenvolvimento da bacia e após a sua urbanização, sendo que a maioria dos municípios não tem condições econômicas para controlar o processo neste último estágio. Os mesmos autores ressaltam que um dos principais desafios do planejador é de se antecipar e controlar os impactos antes que os mesmos se tornem realidade.

Dentro deste contexto, é fundamental a realização de estudos que forneçam prognósticos, sobretudo em bacias em processo de urbanização, como é o caso da bacia do córrego do Mineirinho em São Carlos-SP (Benini et al., 2004).

Hoje, com o desenvolvimento e a facilidade de acesso a tecnologias de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento, torna-se viável a execução da classificação do uso e ocupação do solo, que pode servir de base para o planejamento e a gestão da cidade, com a finalidade de minimizar e prevenir os impactos ambientais causados pelo adensamento urbano.

A classificação do uso e ocupação do solo pode, por exemplo, ser utilizada na associação com diferentes potenciais de infiltração da água pluvial no solo, refletindo na dinâmica das águas superficiais e subterrâneas tanto do ponto de vista quantitativo - relacionado à produtividade agrícola e eventos de chuva intensa (inundações) - quanto à qualidade das águas escoadas e infiltradas, estas que podem ser consideradas potenciais mananciais ou, se contaminadas, serem a causa de problemas sanitários (Janducci,2008).

A bacia do Mineirinho em São Carlos está no vetor de crescimento da cidade, e nota-se grande degradação ao longo de seu curso d'água principal. Sua ocupação iniciou ao longo das décadas de 50 e 70 de maneira lenta, e foi fortemente acelerada na década de 90, com a ocupação de algumas margens do córrego. As consequências desse processo foram: perda de equilíbrio da fauna e da flora, degradação das suas nascentes, assoreamento e erosão dos córregos, má qualidade da água, enchentes (Jacob, 2010).

## **2 O PROJETO HIDROECO**

O HIDROECO é um projeto em rede, financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), voltado para a quantificação de alterações no regime hidrológico decorrentes de atividades antrópicas em bacias hidrográficas localizadas nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. Esta rede é formada por seis subprojetos, três sobre Vazão Ecológica e três sobre Hidrologia Urbana, cada um coordenado por uma instituição de pesquisa, três da região Sudeste, duas da região Nordeste e uma da região Sul, os projetos são os seguintes:

- UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) - Metodologia para determinação de vazões ambientais na região serrana do Rio de Janeiro integrando aspectos hidrometeorológicos, ecológicos e socioeconômicos;
- UFSM (Universidade Federal de Santa Maria) - Estratégia metodológica de monitoramento quali-quantitativo com vistas à gestão do hidrograma de vazão ecológica;
- UFBA (Universidade Federal da Bahia) - Avaliação dos impactos hidrológicos da implantação do hidrograma ambiental, do baixo trecho do rio São Francisco;
- EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo) - Determinação de parâmetros hidrológicos em bacias urbanas e peri-urbanas.
- UFAL (Universidade de Alagoas) - Indicadores de eficiência quali-quantitativos de drenagem em bacias urbanas e peri-urbanas.
- UNESP (Universidade Estadual Paulista – Ilha Solteira) - Modelagem de cheias urbanas com a utilização de informações distribuídas de uso e ocupação do solo.

### **2.1 Objetivo**

O subprojeto coordenado pela EESC/USP tem como objetivo realizar uma análise quantitativa e qualitativa das águas do córrego do Mineirinho São Carlos- SP, frente às diferentes formas de uso do solo da bacia hidrográfica, através do uso de instrumentos computacionais e

matemáticos. O projeto visa desta maneira, dar subsídio à avaliação de cenários possíveis, tendo em vista a determinação da capacidade de suporte dos cursos d'água, em função da sua classe de manejo.

Na presente fase do estudo, foi realizada uma pesquisa que envolveu a classificação dos usos e ocupação do solo para diversos cenários e a modelagem quali-quantitativa do escoamento superficial.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do córrego do Mineirinho localiza-se na cidade de São Carlos (figura 1), e está inserida na bacia do ribeirão do Monjolinho, o qual é tributário do rio Jacaré-Guaçu. A bacia abrange os bairros de Santa Felícia e Santa Angelina e suas imediações. Suas características básicas são: bacia hidrográfica de pequena extensão (6 km<sup>2</sup>); uso e ocupação do solo diversificado; recente e crescente urbanização.

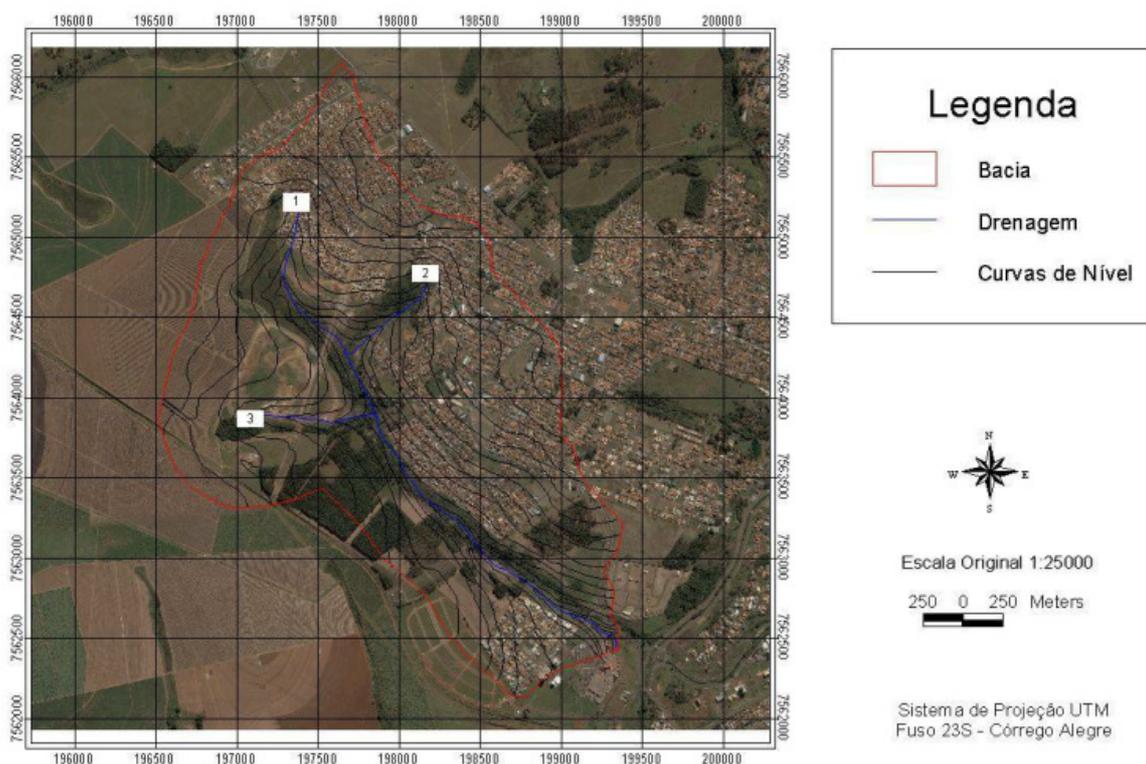


Figura 1 - Bacia do Mineirinho, São Carlos – SP, indicação da área da bacia, a drenagem, as curvas de nível e as principais nascentes.

Fonte: JACOB (2010)

### 3.1 Características ambientais da bacia hidrográfica

A seguir são listadas algumas das características estudadas do córrego do Mineirinho nos últimos anos:

- **Nascentes:**
  - I. Nascente principal – bairro Santa Angelina
  - II. Afluente margem direita – nascente do córrego Santa Fé, Rua Francisco Possa.
  - III. Afluente margem esquerda – nasce nas imediações do campus 2 da USP (Santa Angelina)
- **Qualidade da água:** a qualidade das águas do córrego em questão é inferior à recomendada para os corpos d'água Classe 2 (CONAMA 357/05), classe na qual o córrego está legalmente inserido.
- **Solos:** a formação geológica do Mineirinho é a Serra Geral, o que condiciona aos terrenos uma boa capacidade de suporte quanto aos usos e ocupações urbanos, apesar de existirem áreas de acentuado declive (maior de 20%) que são mais propícias para movimentos de massa como erosão. Nos interflúvios são encontrados latossolos vermelho amarelo, profundos e distróficos. Já no interior dos vales de drenagem, o solo é hidromórfico, dos tipos gleissolo e organossolo, saturados permanente ou intermitente. (Benini et al., 2004).
- **Clima:** o clima é tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos secos. As temperaturas médias anuais são de 27° C e a mínimas de 16° C ; a precipitação média anual é de 1500 mm (Sé,1992).
- **Vegetação:** a vegetação que acompanha os cursos d'água do Mineirinho são remanescentes florestais de mata ribeirinha, com trechos com floresta paludosa e áreas alagadas com vegetação de pequeno porte (campo úmido).

Para melhor representação das características físicas da bacia, foi conveniente dividi-la em sub-bacias. Para delimitação automática destas feições hidrológicas, determinou-se, com auxílio do software de geoprocessamento ARCGIS, a direção do fluxo em cada célula do MDT, ou o caminho mais íngreme em relação às 8 células adjacentes. Com essa malha, foi gerada outra, a de acúmulo de fluxo, contendo o número de células vizinhas que drenam para uma célula determinada. Finalmente, foi criado um *layer* de pontos com objetivo de indicar ao programa os exutórios das sub-bacias. Na Figura 4 mostra-se esta delimitação, que foi utilizada em ambos os modelos utilizados neste estudo: L-THIA e SWMM. Porém, no caso do SWMM, a delimitação serviu também para se estimar outros dois parâmetros, além da área das sub-bacias, a largura do

escoamento superficial e a declividade média das vertentes. O L-THIA, por outro lado, que funciona de modo distribuído, exigiu apenas a delimitação das sub-bacias, a distribuição dos usos do solo, e o tipo hidrológico do solo.

### **3.2 Características de uso e ocupação**

Pode-se observar acelerado processo de urbanização em determinadas áreas da bacia, isso ocorre em partes devido à instalação do campus universitário 2 da USP, e também porque a área é considerada um vetor de crescimento da cidade previsto pelo Plano Diretor da cidade e tem 66,3% de sua área urbanizada (PONS, 2006 apud MARQUES, 2008).

A implementação do campus 2 da USP acarretou especulação imobiliária no local, o que tem gerado alguns impactos antrópicos, incluindo degradação das Áreas de Preservação Permanentes (APPs) do Córrego do Mineirinho. Segundo o CONDEMA de São Carlos, 18,4% dos 91,15 ha do campus está impermeabilizado (16,8ha) (CONDEMA, 2003 apud JACOB, 2010).

As ocupações ao longo da bacia são contrastantes e diversificadas, como condomínios de alto padrão, moradias de baixa renda, o campus universitário e um shopping center. Existe ainda uma voçorora (processo erosivo) junto às nascentes no bairro Santa Angelina, com uma área aproximadamente 0,1 ha. Neste local, há a presença de grande aporte de resíduos sólidos, material de construção e lixo doméstico. (CONDEMA – Pref. São Carlos apud JACOB, 2010).

O processo de urbanização tem trazido graves consequências à qualidade e quantidade da água do córrego do Mineirinho. Segundo Jacob (2010), no ano 2000, com apenas 18,6% de urbanização, a bacia já apresentava qualidade hídrica inferior à recomendada para sua classe. Os dejetos produzidos nas margens juntamente com as áreas de solo exposto causam assoreamento e poluição a jusante, isto é potencializado pela falta de vegetação ciliar, que permite que o lixo seja carregado para o corpo d'água.

### **3.3 Mapas de uso e ocupação: atual, base e futuro.**

A definição das classes de uso e ocupação do solo dependem primeiramente da qualidade e da resolução espacial da imagem de satélite e também dos modelos matemáticos que irão utilizar essas classificações e de suas limitações.

O presente projeto gerou os mapas mostrados na Figura 2. A imagem de satélite utilizada foi obtida a partir do satélite WordView02, na data de 2 de Junho de 2011, sendo composta por uma banda pancromática e mais 4 multiespectrais (RGB e infravermelho). A resolução espacial da banda pancromática é de 0,50 m.

Baseado nos elementos de interpretação de imagens e no reconhecimento de campo

definiram-se ao todo nove classes, a saber: mata, gramínea, área de lazer, agricultura, institucional, solo exposto, residencial, terreno baldio e via de tráfego.

Com isto determinou-se um cenário base, com a hipótese que a bacia do córrego do Mineirinho seria ocupada apenas pela classe ‘mata’. Este cenário de base foi construído para servir de referência aos outros dois, o atual e o futuro.

O cenário futuro teve como objetivo fornecer uma representação esquemática de um porvir plausível para bacia do córrego do Mineirinho, no que tange a ocupação do solo. A elaboração do cenário fundamentou-se na reflexão sobre os condicionantes da realidade atual capazes de indicar tendências de futuro. Os condicionantes considerados de relevância foram: o histórico da urbanização da bacia e as diferentes lógicas de ocupação no decorrer do tempo; o Plano Diretor, por ser um importante documento de ordenação do uso do solo; a implantação do campus 2 da USP, como um forte indutor de crescimento e a implantação de condomínios fechados, visto que, em boa parte das áreas não loteadas da bacia, está prevista a construção desse tipo de empreendimento. O cenário atual e futuro podem ser observados na Figura 2, a seguir:

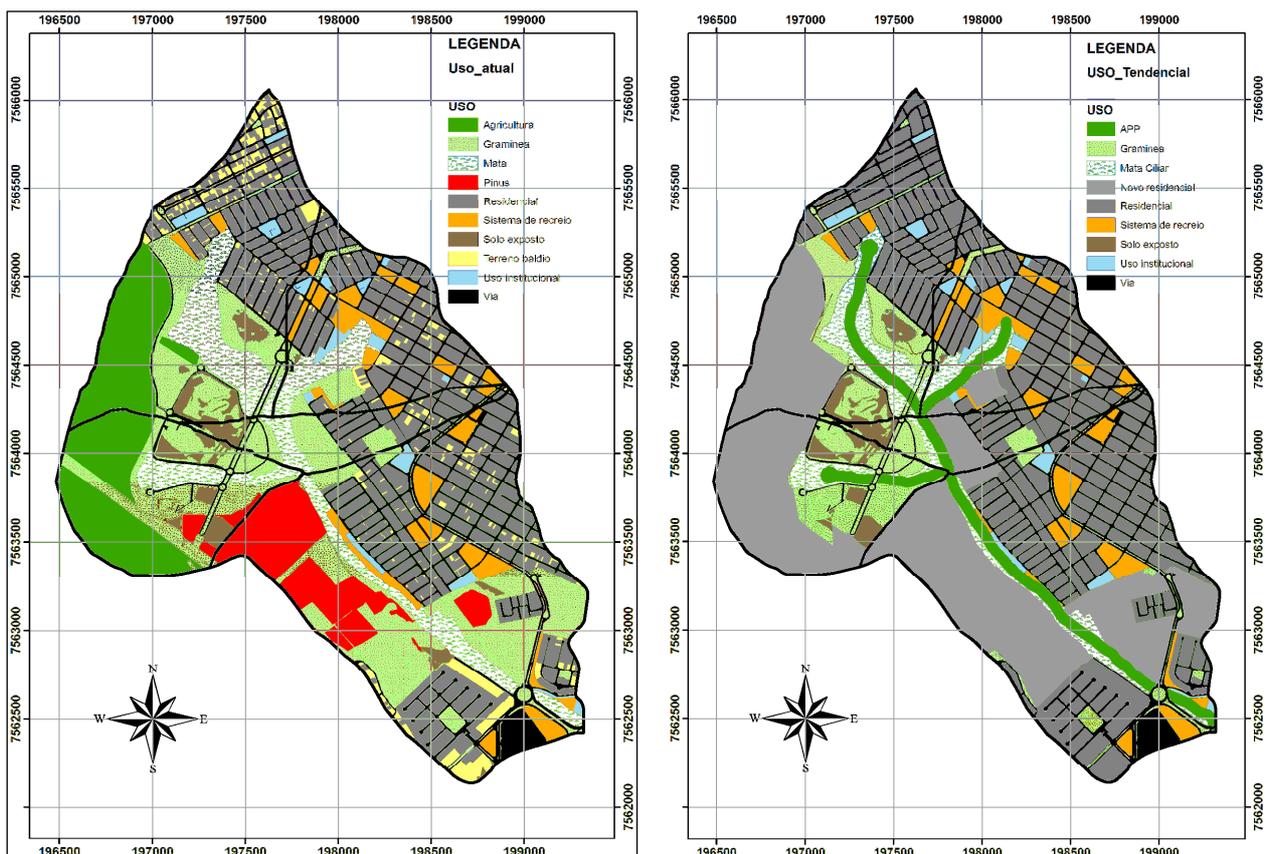


Figura 2 - Mapa de uso e ocupação do solo – Cenário atual e Cenário futuro

Fonte: Aprígio (2012)

### 3.3.1 Alterações no padrão de uso e ocupação do solo

Na tabela 1 apresentam-se as porcentagens referentes às classes de uso e ocupação do solo da bacia do córrego do Mineirinho, para os três cenários considerados. As seguintes classes de uso e ocupação do solo ‘mata’, ‘sistema de recreio’, ‘institucional’, ‘residencial’ e ‘via’, sofreram aumento percentual entre os cenários atual e futuro.

Tabela 1 – Percentual das classes de uso e ocupação do solo da bacia do Córrego do Mineirinho em cada cenário.

Uso	Base (%)	Atual (%)	Futuro (%)
Mata	100,00	9,88	12,89
Gramínea	-	20,70	9,66
Sistema de recreio	-	4,93	7,23
Terreno baldio	-	4,01	-
Institucional	-	1,64	3,74
Agricultura	-	17,97	-
Solo exposto	-	2,82	2,51
Residencial	-	27,86	49,61
Via	-	10,19	14,36

O acréscimo observado na categoria ‘via’ deveu-se aos novos loteamentos, onde foi considerada implantação de infraestrutura e de equipamentos urbanos. O Plano Diretor Municipal prevê que 16% da área do loteamento sejam destinadas às vias de tráfego. Raciocínio semelhante foi aplicado às classes ‘sistema de recreio’ e ‘institucional’, às quais o referido Plano prevê que sejam destinados 10% e 8% da área total do empreendimento, respectivamente.

O aumento da classe ‘residencial’ resultou da conversão de áreas relativamente extensas e inseridas na malha urbana, mencionadas acima, ocupadas por gramíneas ou solo exposto, as quais deverão ser acompanhadas de mudanças infraestruturais cabíveis. O acréscimo desta classe também foi consequência de se ter considerado o preenchimento total dos lotes devolutos existentes, já que se procedeu a delimitação de todos os terrenos ociosos. Outro fator considerado, e que incorreu em acréscimo nessa classe foi a conversão das áreas agrícolas da Zona 4B do Plano Diretor Municipal de São Carlos.

A categoria ‘mata’ teve aumento devido à consideração de 30 metros de vegetação marginal ao longo dos corpos hídricos, dos 50 metros nas nascentes, e também da recomposição de Reserva Legal da Zona 4B, quando da conversão dessas áreas. A redução percentual das outras classes de uso e ocupação do solo, a saber, ‘gramínea’, ‘terreno baldio’, ‘agricultura’ e ‘solo exposto’, foi devida à transformação em áreas residenciais, e em seus equipamentos urbanos intrínsecos.

### 3.3.2 Cálculo dos valores de CN

Concomitantemente à classificação de uso e ocupação, cada feição foi relacionada a um valor de CN, determinado por meio de tabelas obtidas em USDA (1986), apresentadas na Tabela 2. Esses valores tiveram a função de subsidiar os cálculos para quantificação do escoamento superficial

Tabela 2 - Mapa de uso e ocupação do solo – Cenário atual

Classe	CN	Observado	Relação com USDA (1986)
Mata	60	Vegetação ripária e algumas poucas manchas esparsas de vegetação secundária	Mata em condição hidrológica razoável
Gramínea	69	Campos contíguos e/ou entremeados às áreas urbanizadas da bacia.	Espaços abertos, com condição hidrológica razoável.
Agricultura	74	Cana-de-açúcar e silvicultura de Pinus*	Cultivos em linhas, seguindo as curvas de nível do terreno, de acordo com a referência supracitada
Solo Exposto	86	Solo sem cobertura vegetal, seja por variação climática anual ou por movimentação de terra na fase inicial de processos de conversão do uso do solo.	Áreas urbanas, em processo de loteamento, ou áreas agrícolas em pousio, sem nenhum tipo de cobertura
Residencial** – lotes entre 125 e 200 m <sup>2</sup>	96	Loteamento Social Santa Angelina e os Conjuntos Habitacionais Arnon de Mello e Dr. Lourival Maricondi (São Carlos IV) .	Assumiu-se 95% de áreas impermeáveis.
Residencial** – lotes entre 200 e 300 m <sup>2</sup>	96	Conjunto Habitacional São Carlos III, Residencial Monsenhor Romeu Tortorelli, Parque Jardim Santa Felícia e Jardim Ipanema.	Também se atribuiu 95% de áreas impermeáveis,.
Residencial** – Lotes maiores que 600 m <sup>2</sup>	92	Parque Faber I e II.	Foi atribuído 85% de áreas impermeáveis.
Via de Tráfego	98	Parcelas do território destinadas ao trânsito de veículos, constituídas, em maior parte, por pavimento asfáltico.	Ruas e estradas pavimentadas.
Terreno baldio – Recobertos com gramíneas	69	Lotes ociosos existentes na malha urbana recobertos com gramíneas.	O mesmo da classe 'gramíneas'.
Terreno baldio– terrenos Recobertos de solo exposto	86	Terrenos ociosos recobertos de solo exposto.	Áreas permeáveis recém parceladas, sem vegetação.
Institucional edificações implantadas	~	Equipamentos públicos comunitários, como escolas, creches, centros comunitários e outros edifícios públicos.	Variação de acordo com o uso misto do entorno.

Institucional edificações ainda não implantadas	60, 69, 86.	Áreas onde a construção de edifícios é apenas previsto	Variou em função da cobertura do solo observada, ou seja, 60 para áreas com vegetação arbórea, 69 para áreas com gramíneas, 86 para as áreas com solo exposto.
---	-------------	--	--

\*Essas duas culturas foram agregadas para que não se aumentasse a quantidade de classes, pois o modelo L-THIA admite apenas 8 classes de uso e ocupação.

\*\*Reuniram-se áreas de uso misto com padrões habitacionais bem distintos, por isso três valores de CN foram estabelecidos, de acordo com a porcentagem de áreas impermeáveis dos lotes, que foi embasada na análise da imagem de satélite e em Garotti et al. (2007),

### 3.4 Base cartográfica, Modelo Digital do Terreno (MDT) e delimitação das sub-bacias

A base cartográfica utilizada no trabalho foi produzida pelo CDCC (Centro de Divulgação Científica e Cultural), ligado à Universidade de São Paulo. Este órgão compôs um banco de dados com mapas digitalizados, contendo curvas de nível de 5 em 5 metros, hidrografia, linha de cumeeada e pontos cotados, para todas as bacias urbanas do município.

O Modelo Digital do Terreno (MDT), que consta na Figura 3, foi gerado em ambiente de SIG, pela interpolação de dados vetoriais (curvas de nível e pontos cotados). O talvegue foi aprimorado por interpolação linear, atribuindo valores de elevação à drenagem. O MDT serviu para extração da declividade média das sub-bacias, um dos parâmetros de entrada na modelação.

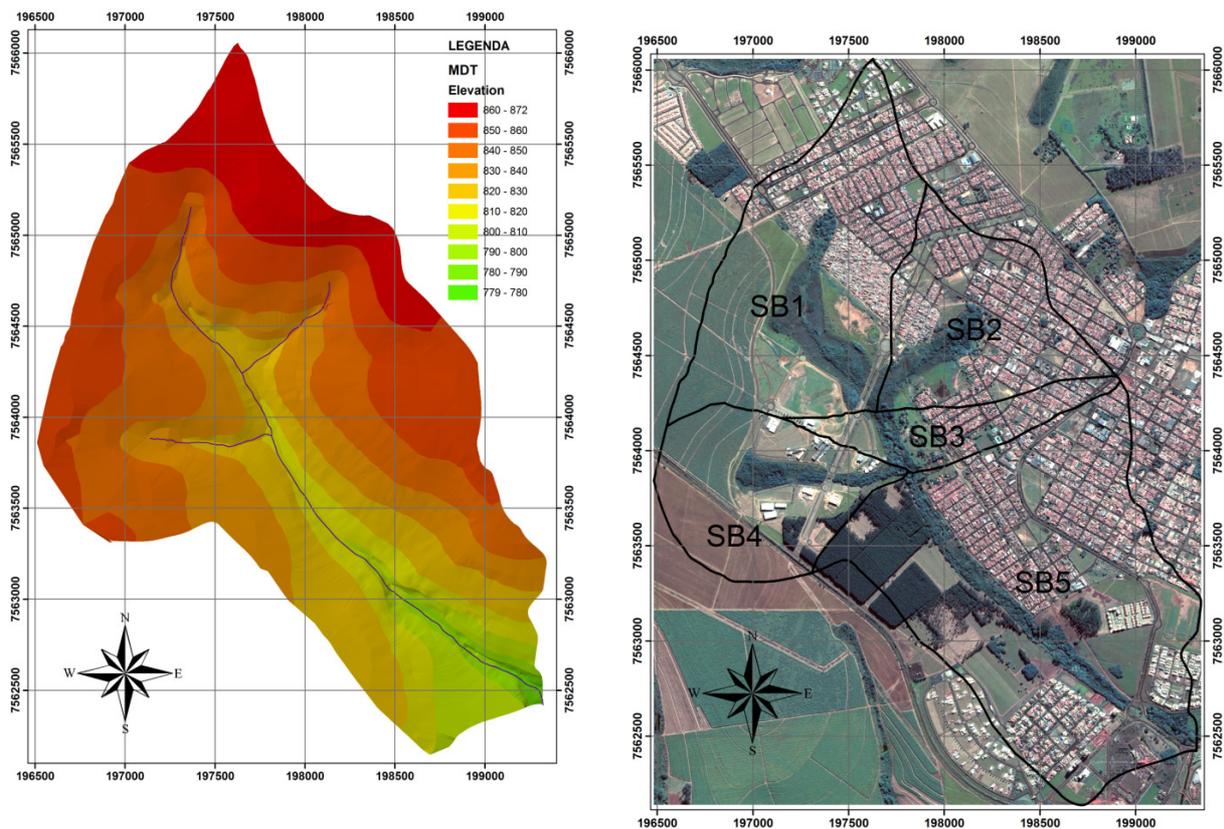


Figura 3 – Modelo Digital de Elevação da bacia do Córrego do Mineirinho e delimitação das sub-bacias do Córrego do Mineirinho

Para melhor representação das características físicas da bacia, foi conveniente dividi-la em sub-bacias. Para delimitação automática destas feições hidrológicas, determinou-se, com auxílio do software de geoprocessamento ARCGIS, a direção do fluxo em cada célula do MDT, ou o caminho mais íngreme em relação às 8 células adjacentes; com essa malha, foi gerada outra, a de acúmulo de fluxo, contendo o número de células vizinhas que drenam para uma célula determinada; finalmente, foi criado um *layer* de pontos com objetivo de indicar ao programa os exutórios das sub-bacias. A Figura 4 mostra esta delimitação, que foi utilizada nos modelos de poluição difusa.

## 4 MODELAÇÃO MATEMÁTICA

Foram selecionados dois modelos matemáticos adequados à avaliação quali-quantitativa em bacias urbanas ou em processo de urbanização. Os modelos utilizados foram o L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) desenvolvido pela Universidade de Purdue, em Indiana, Estados Unidos e o SWMM (Storm Water Management Model) desenvolvido pela USEPA (United States Environmental Protection Agency).

A finalidade de utilizar os modelos foi estimar a produção média anual de escoamento superficial e as cargas de poluição difusa. A escolha destas ferramentas residiu na gratuidade de ambas, e no fato de trabalharem com complexidades distintas. Optou-se pelo SWMM devido a sua grande popularidade, e o L-THIA foi escolhido por sua simplicidade, apesar da pouca notabilidade no meio acadêmico.

O SWMM não possui acoplamento com Sistema de Informação Geográfica (exceto o AGSWMM, que se acopla ao ARCGIS, e não é gratuito). Desse modo, os diversos parâmetros de entrada foram estimados por meio de geoprocessamento. Já o L-THIA acopla-se ao ArcView®3.x como uma extensão. Não há atualizações desse software para versões mais recentes do ARCGIS.

### 4.1 SWMM (Storm Water Management Model)

Como o trabalho teve objetivo a simulação das médias anuais de escoamento superficial e de cargas difusas de poluição hídrica, não houve preocupação em modelar a propagação da onda de cheia.

Os parâmetros de entrada exigidos pelo bloco Runoff, que é o bloco responsável pela transformação da chuva em vazão, relacionam-se à geometria – área ( $A$ ), largura do escoamento superficial ( $W$ ) e declividade ( $S$ ). E há aqueles que se relacionam às características da superfície das sub-bacias – porcentagem de área impermeável (%IMP), coeficientes de Manning para áreas permeáveis e impermeáveis (NIMP e NPERV), profundidade do armazenamento em superfícies

permeáveis e impermeáveis (DIMP e DPERV), valor médio de CN para áreas permeáveis (CNPERV), e o tempo para o solo totalmente saturado tornar-se seco.

Todos os parâmetros, com exceção dos coeficientes de Manning, das capacidades de armazenamento e do tempo de secagem do solo, foram estimados em ambiente de SIG.

As áreas das sub-bacias foram consideradas como as áreas dos vetores gerados na delimitação automática destas. A declividade média (S) de cada sub-bacia foi obtida a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT). Já a largura do escoamento superficial foi calculada de acordo com Huber et al. (1992) apud Aprígio (2012). Este método permite estimar a largura de bacias com forma irregular por meio de um coeficiente de distorção.

Os coeficientes de Manning para escoamento sobre áreas extensas não são tão bem conhecidos quanto para escoamento em canal, devido à variabilidade de usos do solo, e à pequena profundidade do escoamento. No presente trabalho, os coeficientes de rugosidade e as profundidades de armazenamento utilizadas foram os obtidos através de calibração por Collodel (2009) apud Aprígio (2012), mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes de rugosidade de Manning e Profundidades de Armazenamento em depressão, para áreas permeáveis e impermeáveis.

$N_{IMP}$	$N_{PERV}$	$D_{IMP}$	$D_{PERV}$
0,02	0,124	1,47	3,13

O método de cálculo do escoamento superficial utilizado foi o do SCS (Soil Conservation Service). Os parâmetros de entrada desse método foram o valor de CN para áreas permeáveis, a porcentagem de área impermeável (%IMP) e o tempo que o solo saturado leva para ficar completamente seco. O CN das áreas permeáveis foi obtido pela média ponderada dos valores definidos no mapa de uso e ocupação. Para a secagem do solo, arbitrou-se tempo de 1 dia.

As porcentagens de área impermeável e os valores médios de CN para áreas permeáveis são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Porcentagem de área impermeável e CN médio das áreas permeáveis, para as cinco sub-bacias

	% $A_{IMP}$			$CN_{PERV}$		
	Base	Atual	Futuro	Base	Atual	Futuro
SB1	0	33,5	53,7	60	70	66
SB2	0	58,7	68,9	60	66,4	65
SB3	0	35,6	66	60	69	67,9
SB4	0	2,6	34,7	60	71,8	67,4
SB5	0	41,8	73	60	69	64,5
Bacia do Mineirinho	0	36,6	62	60	69,2	64,5

Percebe-se que, em todas as sub-bacias, houve aumento do número de CN para as áreas permeáveis, entre os cenários, atual e de base; e, entre os cenários futuro e atual, ocorreu um decréscimo neste valor. No primeiro caso, isto foi devido à conversão da cobertura nativa (categoria ‘mata’) em categorias de uso e ocupação que existem na bacia atualmente, como ‘agricultura’, ‘solo exposto’, ‘gramínea’ aos quais se atribuiu valores maiores de CN, em comparação à categoria ‘mata’. A redução no valor de CN, por sua vez, aconteceu graças à redução destas parcelas permeáveis com valor elevado de CN, pela conversão, principalmente, em áreas impermeáveis, que não fizeram parte do cômputo destes valores de CN.

Em relação ao cálculo das cargas difusas de poluição, o método adotado foi o da concentração média no evento, por constar em ambos os modelos. Os poluentes estimados foram os seguintes: nitrogênio e fósforo totais, sólidos suspensos e dissolvidos, chumbo, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio. As concentrações destes poluentes foram obtidas através de Baird et. al. (1996) apud Aprígio (2012), e encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 – Concentração média no evento para diferentes poluentes e tipos de uso e ocupação.

Poluentes	Uso e ocupação do solo				
	Residencial	Pastagens	Agricultura	Vias	Espaços abertos pouco desenvolvidos
Nitrogênio total (mg/l)	1,82	0,7	4,4	1,86	1,5
Fósforo total (mg/l)	0,57	0,01	1,3	0,22	0,12
Sólidos suspensos (mg/l)	41	1	107	73,5	70
Sólidos dissolvidos (mg/l)	134	245	1225	194	0
Pb (µg/l)	9	5	1,5	11	1,52
DBO (mg/l)	25,5	0,5	4	6,4	0
DQO (mg/l)	49,5	0	0	59	40

#### 4.2 L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment)

A modelagem foi realizada em ambiente de SIG, pois o L-THIA funciona como uma extensão do programa ArcView 3.x.

Os dados de entrada, bem menos numerosos que os do SWMM, foram, a distribuição do uso e ocupação na sub-bacia, e do tipo hidrológico do solo, e dados diários de precipitação. A partir dessas informações o modelo foi capaz de fornecer o volume médio anual escoado superficialmente sobre a bacia, bem como cargas de poluição difusa de diversos poluentes: nitrogênio e fósforo totais, sólidos suspensos e dissolvidos, chumbo, cobre, DBO e DQO.

O L-THIA trabalha a superfície das sub-bacias distribuídamente. Os planos de informação contendo a delimitação de uso e ocupação e do tipo hidrológico do solo foram transformados em uma malha, na qual foi definido um valor de CN a cada pixel.

Os dados de precipitação utilizados foram os mesmos utilizados no SWMM. Porém, a modelagem com o L-THIA exige que os dados sejam acumulados diários. Esses dados foram usados para gerar uma malha com a lâmina do escoamento médio anual. Esta malha permitiu o cálculo do volume médio anual de escoamento sobre a superfície das sub-bacias, que por sua vez, possibilitou calcular a carga média anual dos poluentes, por meio das concentrações, mostradas na Tabela 5.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Variação das cargas difusas de poluição na bacia do Córrego do Mineirinho

Na tabela 6, apresentam-se as variações das cargas dos poluentes entre os cenários nos dois modelos. Observou-se que a modelagem com o SWMM incorreu em alterações de cargas mais expressivas do que a efetuada por meio do L-THIA. Neste último, o aumento de carga de nitrogênio total entre os cenários de base e atual foi em torno de 125 vezes. O fósforo total e os sólidos suspensos sofreram alteração semelhante entre si, cerca de 2185 e 2470 vezes, respectivamente. Os sólidos dissolvidos, por sua vez, foi o parâmetro que menos variou na modelagem realizada mediante o L-THIA, 36 vezes maior do que no cenário de base. O aumento da carga de chumbo foi próxima ao do nitrogênio total, cerca de 92; e o aumento de carga de DBO situou-se na mesma ordem de grandeza do fósforo e dos sólidos suspensos, 1645.

Tabela 6 – Variação das cargas de poluição difusa para a bacia do Córrego do Mineirinho entre os cenários.

Alterações entre os cenários →	L-THIA	SWMM
	Atual – Base (n° de vezes)	Atual – Base (n° de vezes)
<b>Nitrogênio total</b>	125	180
<b>Fóforo total</b>	2185	2535
<b>Sólidos Suspensos</b>	2470	2961
<b>Sólidos Dissolvidos</b>	36	97
<b>Chumbo</b>	92	85
<b>DBO</b>	1645	1486
<b>DQO</b>	—	—

Pelo SWMM, o aumento na carga de nitrogênio para a bacia como um todo foi de 180 vezes. Como se observou no outro modelo, fósforo total e sólidos suspensos foram os parâmetros que perceberam aumento mais próximos entre si, cerca de 2535 e 2961, respectivamente. O aumento de carga de sólidos dissolvidos dado pelo SWMM foi mais que o dobro do L-THIA, em torno de 97 vezes.

Pelo SWMM, o aumento na carga de nitrogênio para a bacia como um todo foi de 180 vezes. Como se observou no outro modelo, fósforo total e sólidos suspensos foram os parâmetros que perceberam aumento mais próximos entre si, cerca de 2535 e 2961, respectivamente. O aumento de carga de sólidos dissolvidos dado pelo SWMM foi mais que o dobro do L-THIA, em torno de 97 vezes. As parcelas impermeáveis foram as responsáveis pela discrepância entre os modelos, as sub-bacias com maior porcentagem de área impermeável foram as que resultaram em cargas de sólidos dissolvidos em desacordo mais expressivo. A carga de chumbo sofreu alteração de 85 vezes, enquanto a carga de DBO sofreu aumento de 1486 vezes.

## 5.2 Escoamento superficial anual médio na bacia do córrego do Mineirinho

Para se avaliar a alteração em longo prazo do escoamento superficial, é interessante dispor de uma longa série histórica de precipitação (pelo menos trinta anos), pois, quanto maior a série, menor será a influência de anos atípicos sobre a média.

O uso de dados de pluviométricos de apenas três anos (2004, 2005 e 2006) foi uma das limitações deste trabalho. Existem séries mais extensas tomadas por postos próximos à bacia, entretanto, os valores são acumulados diários, e, para modelagem com SWMM recomenda-se discretização, no mínimo, horária dos dados de chuva.

A tabela 7 exhibe o volume médio anual de escoamento superficial para as cinco sub-bacias do Córrego do Mineirinho para os cenários: base, atual e futuro.

Tabela 7 – Volume médio anual de escoamento superficial ( $10^3 \text{ m}^3$ ) por sub-bacias.

Cenário→	L-THIA			SWMM		
	Base	Atual	Futuro	Base	Atual	Futuro
SB1	4,27	190,72	250,49	3,72	227,26	374,76
SB2	2,60	185,59	205,51	2,10	235,79	289,17
SB3	0,88	41,27	54,49	0,63	49,28	93,69
SB4	2,39	27,84	84,28	1,86	14,73	137,50
SB5	7,18	366,64	546,14	5,90	470,30	843,85
Total	17,32	812,06	1140,91	14,21	991,21	1738,97

Para a bacia em estudo, a modelagem mediante o L-THIA, incorreu em um aumento de 47 vezes no volume de escoamento superficial entre os cenários de base e atual. Entre os cenários atual e futuro, o aumento foi de 40,5%. Pelo SWMM, o volume de escoamento superficial no cenário

atual foi 70 vezes maior do que no cenário de base, enquanto que, entre os cenários atual e futuro, o aumento correspondente foi de 75,4%.

Analisando-se as discrepâncias entre as simulações de cada modelo dentro de um mesmo cenário e para todo o sistema, o escoamento superficial simulado pelo SWMM no cenário de base mostrou-se 18% menor em comparação ao calculado pelo L-THIA. No cenário atual, a situação inverteu-se, sendo que o L-THIA resultou em escoamento 18,1% menor do que o SWMM. No cenário futuro, a simulação com o L-THIA gerou escoamento superficial 34,4 % menor que o SWMM.

O que dominou estas divergências entre os resultados dos modelos foi, primordialmente, a porcentagem de área impermeável. Conforme este parâmetro foi se elevando (de 0%, no cenário de base, a 36,6% no cenário atual e 62% no cenário futuro), o escoamento superficial dado pelo SWMM sofreu aumento mais acentuado que o dado pelo L-THIA, tanto, que no cenário de base, o L-THIA resultou em escoamento mais elevado que o SWMM, situação que se inverte já no cenário de base.

## 6 CONTINUIDADE DO PROJETO

O projeto HIDROECO estará em desenvolvimento até o ano de 2014, durante este período está previsto a compra dos seguintes equipamentos de monitoramento de qualidade e quantidade da água e medição de chuva:

Tabela 8 – Equipamentos em processo de aquisição pelo projeto HIDROECO, subprojeto EESC.

PRODUTO	MODELO	EMPRESA
Sonda de qualidade	6920 V2	YSI
Medidor de Vazão	IQ Plus	SONTEK
Medidor de Nível (Linígrafos)	3001 LT Levellogger, 3001 LT Barologger	SOLINST
Pluviógrafos	basculante com minidatalogger e bateria de longa duração, modelo TB4 + MiniLogger1 (ML1)	Campbell

Durante a instalação dos equipamentos haverá também a interação com a comunidade moradora da bacia, pois dois pluviógrafos serão instalados em áreas institucionais, um na Escola Estadual Bento da Silva César e outro dentro da própria Universidade de São Paulo (campus 2).

A escola se comprometeu com a segurança do equipamento, em contrapartida a equipe do projeto HIDROECO irá realizar palestras didáticas na escola, para explicações sobre a utilidade do

equipamento juntamente com atividades de sensibilização sobre a importância da qualidade e quantidade da água na bacia em estudo.

Outra ação do projeto será a utilização do programa Definiens Developer, *software* utilizado para classificação da imagem de satélite de forma automática. Este *software* foi escolhido com base no estudo de MARTINS (2011), que definiu uma série de parâmetros para avaliar a melhor ferramenta de classificação de imagem de satélite no mercado. Nesta etapa, serão integrados no projeto outros pesquisadores, alunos de iniciação científica e outros projetos do grupo de Hidrologia de EESC – São Carlos.

## 7 CONCLUSÕES

A metodologia utilizada, apesar das limitações relativas à disponibilidade de dados observados, foi satisfatória à comparação dos modelos quanto à simulação do escoamento superficial e das cargas difusas de poluição.

Cabe ressaltar a diferença no modo como o L-THIA e o SWMM interagem com o SIG. Este último não se acopla ao SIG, de modo que as informações obtidas mediante o geoprocessamento tiveram de ser inseridas manualmente. O L-THIA, por outro lado, embute-se ao SIG, o que tornou mais fácil e rápida a integração dos dados.

As diferenças na correspondência entre os modelos deram-se devido às características de cada modelo no tratamento da superfície das sub-bacias.

Ambos os modelos podem servir como ferramentas ao planejamento dos impactos hidrológicos. O L-THIA é mais indicado aos casos de bacias sem monitoramento, por possuir estrutura mais amigável, baixa exigência de dados de entrada e requerer menor tempo de produção, coleta e operação destes dados.

O SWMM, por outro lado, realiza cálculos de escoamento mais sofisticados, à custa, porém, de uma quantidade maior de parâmetros de entrada, que requer maior tempo de coleta, preparação e formatação. No caso de bacias sem disponibilidade de dados, há então que os produzir para proceder à modelagem matemática da poluição difusa.

Recomenda-se a implantação e operação de um sistema de monitoramento da precipitação, da quantidade e da qualidade da água, que possibilite a obtenção de dados para serem usados na calibração dos modelos.

Portanto, esta será a próxima etapa do projeto HIDROECO: a aquisição dos equipamentos para a realização do monitoramento de qualidade e quantidade da água e aferição dos dados de

chuva da bacia. E também, será feita a aplicação do software Definiens Developer, para a caracterização automática dos diferentes classes de uso do solo da bacia do Mineirinho.

O projeto visa contribuir para criação de uma metodologia que possa relacionar os diferentes usos e ocupação da bacia com a qualidade e quantidade da água, e assim servir de base para outros projetos na área de Hidrologia Urbana.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível superior) e à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) pelo apoio financeiro à esta pesquisa.

## BIBLIOGRAFIA

APRÍGIO P. O. (2012). *Avaliação de Modelos de Simulação de Cargas Difusas em Bacias Urbanas*. EESC / USP São Carlos (SP). Dissertação de Mestrado. EESC / USP São Carlos (SP).

APRÍGIO P. O. (2009). *Avaliação preliminar dos impactos do desenvolvimento de uma bacia hidrográfica sobre cargas difusas de poluição pela aplicação do modelo L-THIA (Long-Term Hydrologic Impact Assessment) na bacia do córrego do Mineirinho – São Carlos*. Trabalho de Conclusão de Curso. EESC / USP São Carlos (SP).

BENINI, R. M.; MARTIOLI C.; MENDIONDO E. M. (2004). *Uso do SIG associado ao método racional para previsão de vazões na bacia do Mineirinho – São Carlos (SP)*. Artigo para o III SRH. EESC / USP São Carlos (SP).

BRASIL (2005). *Resolução CONAMA n.º 357, DE 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Brasília-DF

CONDEMA (2003). *Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente, Prefeitura Municipal de São Carlos. Parecer COMDEMA nº 001/03*. São Carlos (SP).

JACOB M. S. (2010). *Análise do uso e ocupação das APPs na área urbana da bacia do Córrego do Mineirinho e projeto de recuperação das suas nascentes*. Relatório final de Iniciação Científica. EESC / USP São Carlos (SP).

JANDUCCI J. P. Z. (2008). *Aplicações de técnicas de geoprocessamento para classificação do uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas em processo de urbanização*. Relatório final: Programa Ensinar com Pesquisa. EESC / USP - São Carlos (SP).

MARQUES, M. M. S. (2008). *Aplicação da metodologia de “ACV” na análise de impactos no meio hídrico*. EESC / USP São Carlos (SP).

MARTINS, L. G. B. (2011) *Escolha do software de classificação da imagem de satélite*. EESC USP / São Carlos (SP).

SÉ, J. A. S. (1992). *O Rio do Monjolinho e sua bacia hidrográfica como integradores de sistemas ecológico*. Dissertação de Mestrado. EESC/USP – São Carlos-SP.

USP (2012). *Site oficial da Universidade de São Paulo, campus de São Carlos*. Disponível em <<http://www.saocarlos.usp.br/calouros/sobre-a-cidade.php>>. Acessado em 4 de Junho de 2012.