



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

FRANCIANE MENDONÇA DOS SANTOS

**Caracterização do meio físico da Bacia do Córrego Caçula e processos de
degradação associados com vistas ao planejamento territorial**

Ilha Solteira
2014



FRANCIANE MENDONÇA DOS SANTOS

**Caracterização do meio físico da Bacia do Córrego Caçula e processos de
degradação associados com vistas ao planejamento territorial**

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais.

Prof. Dr. José Augusto de Lollo
Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237c Santos, Franciane Mendonça dos.
Caracterização do meio físico da Bacia do Córrego Caçula e processos de degradação associados com vistas ao planejamento territorial / Franciane Mendonça dos Santos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
123f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2014

Orientador: José Augusto de Lollo
Inclui bibliografia

1. Planejamento territorial. 2. escoamento superficial. 3. Ilha Solteira.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Caracterização do meio físico da Bacia do Córrego Caçula e processos de degradação associados com vistas ao planejamento territorial

AUTORA: FRANCIANE MENDONÇA DOS SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL , Área: RECURSOS HIDRICOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS, pela Comissão Examinadora;

Prof. Dr. JOSE AUGUSTO DE LOLLO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDSON PEREIRA TANGERINO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. REINALDO LORANDI
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Sao Carlos

Data da realização: 29 de janeiro de 2014.

DEDICO

A minha mãe (Josefa Mendonça dos Santos):
pessoa mais importante da minha vida, a quem
dedico todas as minhas vitórias, que são mais
dela do que minhas. Minha maior
incentivadora, exemplo de força, fé,
determinação e amor. Eu te amo mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, Nossa Senhora, São Judas Tadeu e São José que me guardam e sempre iluminam meus caminhos, que protegem a mim, a minha família e meus amigos, e que sempre me acompanham me dando força e coragem pra continuar, sempre atendendo meus pedidos.

Agradeço a minha mãe, por todo incentivo, por acreditar em mim, e por nunca me deixar desistir dos meus sonhos, agradeço todos os dias por existir e peço a Deus que um dia possa lhe recompensar, pelo menos uma parcela, de tudo que faz por nós. Mãe, a senhora é meu maior exemplo de vida, obrigada sempre será pouco por tudo que representa pra mim, obrigada, te amo.

A minha irmã que amo tanto, minha motivação, meu exemplo, minha melhor amiga, minha companheira de todas as horas, obrigada por ser essa pessoa maravilhosa e por estar sempre comigo, por acreditar muitas vezes mais em mim do que eu mesmo!

Ao meu pai agradeço pelo exemplo e incentivo para estudar e nunca desistir.

A minha madrinha pessoa muito especial que sempre está presente em todas as horas, obrigada pela força sempre!

Ao meu orientador Lollo, pessoa especial e cheia de luz, que me apoiou em todos os momentos da pesquisa, obrigada pela confiança depositada e espero ter atingido as expectativas.

A minha amiga Bianca, companheira de república, que me acolheu nessa cidade como parte da família, e a sua família Andrade cheia de pessoas muito queridas que quero sempre em minha vida. Obrigada!

Ao meu amor João que me acompanhou em todos os momentos desse trabalho, obrigada pela amizade, pelo carinho, pela paciência e pelo amor, estou muito feliz por ter você comigo, te amo.

Aos meus amigos queridos, Natália, Lucinete, Karime, Eddie, Danilo, Carla, Jorge, que muito me apoiaram nesta etapa de minha formação, obrigada por tudo!

Enfim agradeço ao CNPq pela bolsa de mestrado e à FAPESP pela aprovação do Processo 2013/06128-9 e pelos recursos do Processo 2012/07842-4.

“Não; não pares.
É graça divina começar bem.
Graça maior persistir na caminhada certa,
Manter o ritmo...
Mas a graça das graças é não desistir.
Podendo ou não podendo, caindo, embora
aos pedaços,
CHEGAR AO FIM...!”
(Dom Hélder Câmara)

RESUMO

A demanda por recursos naturais é crescente em nossa sociedade, tanto do ponto de vista quantitativo como do qualitativo. Muitos dos processos de degradação ambiental têm origem em processos de degradação física do solo, em particular a erosão, dificultando o uso das áreas. A caracterização do meio físico que permita a compreensão de tais processos requer muitas vezes estudos em escalas de detalhe que podem ser caros e demorados, o que faz com que a maioria das intervenções ocorra sem o apoio destes estudos ou a partir de estudos de caráter pontual. Este trabalho desenvolvido na bacia hidrográfica do Córrego Caçula localizado no município de Ilha Solteira (SP) com área de 484,8km² teve como finalidade desenvolver estudos de caracterização do meio físico com base em metodologias de cartografia apoiada em técnicas de tratamento digital de dados que permitiram baixo custo e rapidez no processo de análise. A abordagem se valeu de metodologias de cartografia para produção de cartas de escoamento superficial e infiltração potencial. Essas metodologias possibilitaram a discussão da eficiência das abordagens para avaliar o potencial de ocorrência de processos de degradação na área. As ferramentas do ArcHydro possibilitaram a elaboração da carta de fluxo acumulado que integrada com a carta pedológica da área de pesquisa resultou na carta de potencial de escoamento superficial preliminar. A metodologia proposta por Pejon e Zuquette (1993) permitiu a determinação de áreas com potencial de escoamento superficial baixo, médio e alto com base nas características naturais da área de estudo. A proposta de Soares et al. (2012) para determinação de áreas homólogas de infiltração obteve êxito na proposição de áreas com maior suscetibilidade a inundação e que devem ser analisadas com maior detalhamento. O método de Curva-Número desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS possibilitou elaborar as cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial sendo observada a contribuição da área urbanizada na potencialização destes processos. Para complementação destas análises foram elaboradas as cartas de suscetibilidade a erosão e limitações para o uso e ocupação com objetivo de identificar áreas mais suscetíveis a processos de degradação e estabelecer as potencialidades e limitações da área para planejamento territorial. A elaboração das cartas de uso e ocupação da terra da área de estudo dos anos de 2001 e 2009 possibilitou verificar o cenário de uso e ocupação passado e atual bem como as influencias dessa modificação nos processos de degradação.

Palavras Chaves: Planejamento territorial. Processos geodinâmicos superficiais. Escoamento superficial potencial. Infiltração potencial. Córrego Caçula. Ilha Solteira.

ABSTRACT

Natural resources use grows in human society in quantitative and qualitative ways. Environmental degradation processes usually becomes from soil degradation, particularly erosion. Managing its processes demands environmental knowledge and understanding the relationships between natural attributes, whose is a very difficult target. Environmental studies that allows these processes understanding demands very detailed studies, whose were expensive and slow. These Project intents to develop environmental studies in Córrego Caçula Basin based on digital cartography methods resulting low cost and agile surveys. Characterization of the physical environment of the watershed was based on the Pejon Zuquette (1993) methodology, the tools of ArcHydro, the curve-number method developed by the Soil Conservation Service -. SCS and methodology of Soares et al. (2012) for determination of the potential runoff and infiltration potencial with the attributes of the relief obtained from Topodata, and other attributes of the physical environment (CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL PARA O DESENVOLVIMENTO DA IRRIGAÇÃO NA REGIÃO DE URUBUPUNGÁ- CINDIRU-CINDIRU, 1995; LOLLO, 1998). These methodologies enabled the discussion of the effectiveness of approaches to evaluate the potential occurrence of degradation processes (erosion and sedimentation) in the area. To complement these analyzes was determined susceptibility to erosion and limitations for the use and occupation in order to identify areas most susceptible to degradation processes and establish the potential and limitations of territorial planning area. The use and occupation of land in the study area for the years 2001 and 2009, from satellite images, enabled us to verify the usage scenario and past and current occupation as well as the influence of this modification on the degradation processes. This characterization process expeditiously and cost resulted in an alternative to characterize the natural environment at an appropriate scale for planning activities and provide the appropriate basis for further detailing to solve local problems.

Keywords: Territorial planning. Processes demands environmental. Potential runoff. infiltration potential. Córrego Caçula Basin. Ilha Solteira.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Quadro dos grupos hidrológicos de solo – tipos de solo e condições de uso	33
Figura 2 –	Fluxo de operações para a obtenção da carta de escoamento superficial	39
Figura 3 –	Caracterização da bacia através de SIG	41
Figura 4 –	Componentes do ArcHydro	43
Figura 5 –	Declividade em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).	46
Figura 6 –	Orientação de vertentes em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).	47
Figura 7 –	Curvatura vertical em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).	48
Figura 8 –	Curvatura horizontal em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).	48
Figura 9 –	Localização da área de estudo	50
Figura 10 –	Posição da Bacia do Caçula em relação á área urbana de Ilha Solteira	52
Figura 11 –	Unidades geológicas presentes na área urbana de Ilha Solteira e seu entorno	54
Figura 12 –	Gráfico com as médias mensais de temperatura e precipitação do período de 1992 a 2012	57
Figura 13 –	Metodologia proposta para a pesquisa	59
Figura 14 –	(A) Esquema de um MDE; Figura 14: (B) Grade com as direções de fluxo	61
Figura 15 –	Sequência de processos para obtenção do CN	67
Figura 16 –	Integração dos atributos para geração da carta de potencial de infiltração	69
Figura 17 –	Cores e classes do uso e ocupação da terra	75
Figura 18 –	Carta de altimetria	79
Figura 19 –	Carta de declividade	81
Figura 20 –	Carta de direção de fluxo	82
Figura 21 –	Carta de fluxo acumulado	84
Figura 22 –	Carta de litologia	85
Figura 23 –	Carta de textura e gênese dos materiais inconsolidados	87
Figura 24 –	Carta de espessura dos materiais inconsolidados	89
Figura 25 –	Carta de permeabilidade	90
Figura 26 –	Carta de densidade de drenagem	91
Figura 27 –	Carta de unidades de terreno	93
Figura 28 –	Carta de potencial de escoamento superficial preliminar – ArcHydro	95
Figura 29 –	Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE,	96

1993)	
Figura 30 – Cartas de potencial de escoamento superficial e valores de CN	98
Figura 31 – Cartas de infiltração potencial	99
Figura 32 – Carta de potencial de infiltração (segundo a proposta de Soares et al., 2012)	100
Figura 33 – Carta de Suscetibilidade a erosão	101
Figura 34 – Cartas de uso e ocupação da terra – 2001	103
Figura 35 – Cartas de uso e ocupação da terra – 2009	104
Figura 36 – Carta de limitações para uso e ocupação	105
Figura 37 – Processos de degradação: Processos erosivos (A); Lançamento da drenagem urbana (B)	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Principais métodos para o cálculo do tempo de concentração	29
Tabela 2 –	Valores de C com base em superfícies	30
Tabela 3 –	Valores de C com base em tipos de solo e declividades	30
Tabela 4 –	Valores de C	31
Tabela 5 –	Estimativa dos valores de CN para áreas rurais	34
Tabela 6 –	Estimativa dos valores de CN para bacias urbanas e suburbanas	35
Tabela 7 –	Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente	36
Tabela 8 –	Descrição dos elementos de terreno com respectivo perfil de alteração de solo	56
Tabela 9 –	Pontuação dos atributos do meio físico para elaboração da carta de potencial de escoamento superficial de Pejon e Zuquette (1993)	64
Tabela 10 –	Pontuação dos atributos do meio físico para elaboração da carta de potencial de escoamento superficial adaptada para área de estudo	65
Tabela 11 –	Atribuição de pesos de potencial de escoamento para os atributos e classes	66
Tabela 12 –	Valores de CN para bacia hidrográfica do Córrego Caçula	68
Tabela 13 –	Características das unidades de terreno definidas por Lollo (1998)	70
Tabela 14 –	Contribuição de cada atributo no potencial de infiltração	71
Tabela 15 –	Valores de suscetibilidade a erosão para cada classe dos atributos	76
Tabela 16 –	Valores de limitação de uso e ocupação para cada classe das cartas	77

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ASCE	American Society of Civil Engineers
CBERS	China-Brazil Earth Resources Satellite
CCD	Câmara Imageadora de Alta Resolução
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Datasus	Banco de Dados do Sistema Único de Saúde
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FEHIDRO	Fundo Estadual de Recursos Hídricos
HRS	Câmara Pancromática de Alta Resolução
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellit
MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
PIB	Produto Interno Bruto
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de informações geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USDA	United States Department of agriculture
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS 1984	World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	EMBASAMENTO TEÓRICO	18
3.1	Uso de atributos hidrológicos e geomorfológicos em bacias hidrográficas	18
3.2	Processos Erosivos	20
3.3	Considerações sobre escoamento superficial	22
3.4	Técnicas para estimar o potencial de escoamento superficial a partir de modelos hidrológicos tradicionais	25
3.4.1	<i>Método Racional</i>	26
3.4.2	<i>Método de Curva Número - CN (SCS-USDA)</i>	32
3.5	Técnicas para estimar o potencial de escoamento superficial a partir de características físicas da bacia	36
3.6	Sistema de Informações Geográficas – SIG e Modelagem hidrológica – ArcHydro	40
3.7	Projeto TOPODATA – Representação das condições do relevo	45
4	CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CAÇULA	50
4.1	Localização da bacia hidrográfica	50
4.2	Caracterização socioeconômica	52
4.3	Caracterização do meio físico	53
4.3.1	<i>Geologia</i>	53
4.3.2	<i>Pedologia</i>	54
4.3.3	<i>Relevo</i>	55
4.3.4	<i>Clima</i>	56
4.3.5	<i>Vegetação e Hidrografia</i>	57
5	METODOLOGIA	58
5.1	Topodata – atributos geomorfológicos	59
5.2	ArcHydro – atributos hidrológico	60
5.2.1	<i>Direção do Fluxo</i>	60

5.2.2	<i>Fluxo acumulado</i>	61
5.2.3	<i>Extração da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica</i>	62
5.3	Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)	62
5.4	Cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial (Soil Conservation Service – SCS)	66
5.5	Carta de potencial de infiltração (Soares et al., 2012)	70
5.6	Cartas de uso e ocupação da terra	71
5.6.1	<i>Georreferenciamento da carta topográfica</i>	72
5.6.2	<i>Processamento das imagens: realce e registro de imagens</i>	73
5.6.2.1	<i>Realce</i>	73
5.6.2.2	<i>Registro de imagens</i>	73
5.6.3	<i>Processamento digital de imagens: classificação supervisionada</i>	73
5.6.4	<i>Elaboração do layout do mapa temático</i>	74
5.7	Carta de suscetibilidade a erosão	75
5.8	Carta de limitações para uso e ocupação	76
6	RESULTADOS	78
6.1	Cartas de atributos	78
6.1.1	<i>Altimetria</i>	78
6.1.2	<i>Declividade</i>	80
6.1.3	<i>Direção de fluxo</i>	81
6.1.4	<i>Fluxo acumulado</i>	83
6.1.5	<i>Litologia</i>	84
6.1.6	<i>Textura e Gênese dos materiais inconsolidados</i>	86
6.1.7	<i>Espessura dos materiais inconsolidados</i>	88
6.1.8	<i>Permeabilidade</i>	89
6.1.9	<i>Densidade de drenagem</i>	91
6.1.10	<i>Unidades de terreno</i>	92
6.2	Cartas derivadas	94
6.2.1	<i>Carta de potencial de escoamento superficial preliminar – ArcHydro</i>	94
6.2.2	<i>Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)</i>	95
6.2.3	<i>Cartas do CN de escoamento superficial, potencial de escoamento superficial e infiltração potencial baseada no método de Soil Conservation</i>	97

	<i>Service – SCS</i>	
6.2.4	<i>Carta de potencial de infiltração (SOARES et al., 2012)</i>	99
6.2.5	<i>Carta de Suscetibilidade a erosão</i>	100
6.3	Cartas de uso e ocupação da terra	102
6.4	Carta de limitações para uso e ocupação	104
7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	106
7.1	<i>Uso e ocupação da terra</i>	106
7.2	<i>Carta de potencial de escoamento superficial preliminar – ArcHydro</i>	107
7.3	<i>Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)</i>	108
7.4	<i>Cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial (Soil Conservation Service – SCS)</i>	109
7.5	<i>Carta de potencial de infiltração (SOARES et al., 2012)</i>	110
7.6	<i>Carta de Suscetibilidade a erosão</i>	111
7.7	<i>Carta de limitação para uso e ocupação</i>	111
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113
	REFERÊNCIAS	116

INTRODUÇÃO

De acordo com Mota (1995), o planejamento territorial de uma bacia hidrográfica com base em suas características do meio físico constitui o melhor método para evitar a degradação de seus recursos naturais. Além disso, as medidas de controle do escoamento das águas superficiais, de proteção da vegetação, de disciplinamento da ocupação do solo, e de controle da erosão, têm reflexos na proteção dos recursos hídricos, tanto quantitativa como qualitativamente (DIBIESO, 2007).

Dentre os processos de degradação, destaca-se a urbanização que gera impactos diversos no meio ambiente, como a impermeabilização da superfície, remoção da vegetação ciliar, aumento de lançamento de resíduos, dentre outros fatores que afetam a qualidade ambiental como um todo e, em particular, dos recursos hídricos comprometendo o abastecimento público.

Em relação à modificação da vegetação em áreas urbanizadas, e muitas vezes sua remoção total, Mota (1995) destaca que a diminuição da vegetação reduz o potencial de infiltração de água do solo e ocasiona o maior escoamento superficial potencializando os processos erosivos e conseqüente carregamento de materiais para os cursos d'água, o que possibilita o assoreamento e alteração na capacidade de armazenamento dos mananciais.

Nessas situações, o conhecimento dos atributos do meio físico que controlam os processos dinâmicos das bacias hidrográficas pode permitir a adoção de instrumentos de gestão eficazes não só na proteção dos recursos naturais como no planejamento urbano e regional com boas condições de reduzir danos ao ambiente natural e construído.

Dada à relação da bacia hidrográfica com a ação antrópica, é importante ressaltar que a proteção dos recursos hídricos demanda conhecimentos além daqueles do próprio corpo d'água, incluindo-se aí os componentes naturais e humanos de toda a bacia (MOTA, 1995).

A importância das ações humanas na dinâmica da bacia é usualmente avaliada (com boa eficiência) com base na caracterização de uso e ocupação do solo, tarefa facilitada nos últimos tempos com a adoção de técnicas de processamento digital de imagens em sistemas de informações geográficas a partir de imagens disponibilizadas de forma gratuita (GONZAGA, 2012).

Com tal abordagem, se pode considerar que o mapeamento de uso e ocupação da terra possui técnicas viáveis para sua realização de forma rápida e fidedigna, restando solucionar a adoção / desenvolvimento de técnicas de baixo custo para caracterizar os condicionantes naturais essenciais da bacia hidrográfica.

Neste trabalho, para a caracterização física da bacia hidrográfica do Córrego Caçula, a utilização dos dados digitais do projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008; VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010) é a alternativa de representação das condições do relevo, uma vez que este banco de dados disponibiliza de forma gratuita, variáveis geomorfométricas obtidas de dados Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM.

Para a complementação do banco de dados da bacia hidrográfica foram utilizadas informações pré-existentes e outros dados de trabalhos anteriores que tiveram como área de abrangência a bacia hidrográfica (CINDIRU, 1995; LOLLO, 1998).

A operação de tais atributos foi realizada a partir do Sistema de Informações Geográficas ARCGIS 10.0 com o apoio dos conjuntos de ferramentas 3D Analyst, Spatial Analyst, Geostatistical Analyst, e ArcHydro.

Além da caracterização dos condicionantes naturais, segundo uma visão de diagnóstico do meio, a partir da análise dos resultados é possível verificar seu aproveitamento para gerar interpretações de processos de dinâmica superficial, com ênfase no cálculo de infiltração potencial e escoamento superficial, permitindo assim a previsão de processos geodinâmicos que implicam degradação do meio.

Desta forma, as cartas de infiltração potencial e de escoamento superficial foram elaboradas segundo as metodologias de Pejon e Zuquette (1993), o uso do toolbox ArcHydro (ESRI, 2009), o método de Curva-Número desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS e metodologia proposta por Soares et al. (2012) para identificar áreas mais suscetíveis a processos de degradação e estabelecer as potencialidades e limitações da área visando o planejamento territorial.

Por isso, destaca-se a importância deste trabalho que visa apresentar alternativas de caracterização expedita e de baixo custo para caracterizar o meio natural em escala apropriada para atividades de planejamento e fornecer as bases adequadas para detalhamentos posteriores para solução de problemas locais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral caracterizar o meio físico da bacia hidrográfica com base na metodologia de Pejon e Zuquette (1993), na utilização de ferramentas do ArcHydro, método de Curva-Número desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS e metodologia proposta por Soares et al.(2012) para identificar áreas mais suscetíveis a processos de degradação e estabelecer as potencialidades e limitações da área visando o planejamento territorial.

2.2 Objetivos específicos

- Obter e representar cartograficamente os atributos geomorfológicos e hidrológicos da Bacia do Córrego Caçula.
- Caracterizar as condições de dinâmica superficial da Bacia Hidrográfica do Córrego Caçula com base nos atributos obtidos e identificar os processos de degradação existentes na bacia.
- Relacionar os processos de degradação encontrados com os atributos obtidos.
- Elaborar e propor sistemática de uso das técnicas e processos citados para caracterização preliminar de bacias hidrográficas com vistas ao uso das informações para o planejamento territorial;
- Elaborar carta de uso e ocupação da terra atualizada da área de estudo;
- Consolidar uma base de informações atualizadas para a bacia.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 Uso de atributos hidrológicos e geomorfológicos em bacias hidrográficas

De acordo Conoscenti et al. (2008) a erosão hídrica é um problema de grande importância devido ao seu impacto social e econômico. É, de fato, responsável tanto por danos diretos, em solos e rochas, e por danos indiretos, pois podem conduzir a deslizamentos superficiais ou reativá-los, devido, por exemplo, ao aumento local do grau de inclinação das encostas. Assim o poder erosivo das águas de escoamento depende dos atributos climáticos (ou seja, erosividade da chuva) e topográficos (declividade, comprimento de declive, curvatura).

Para Pejon e Silveira (2007), a erodibilidade do solo, incluindo o resultante da atividade antrópica, representa um grave problema ambiental. Os principais fatores que influenciam a erosão do solo são o tipo de solo e sua origem, as características do relevo, o nível de águas subterrâneas e a ausência de planejamento ambiental. Nesse sentido, o autor apresenta que quanto maior for a capacidade de um solo de absorver água, menor será o escoamento superficial e a possibilidade de erosão. No entanto, para o mesmo tipo de solo, quanto maior for o teor de umidade natural, mais cedo um estado de saturação total do solo é atingida, e desta forma maior o escoamento superficial.

Nesta perspectiva, o processo de infiltração e o escoamento superficial de acordo com Soares et al. (2012) transformam as bacias hidrográficas em um reservatório dinâmico do sistema hídrico, porque através deles é garantido o armazenamento subterrâneo, bem como fluxo de base de um rio durante períodos de seca. O processo de infiltração é muito importante na dinâmica ambiental de bacias, e sua função é relacionada com um grande número de fatores interligados, como o clima, meio físico e elementos de uso da terra.

A mudança no equilíbrio desses fatores acaba por provocar a degradação ambiental de bacias hidrográficas, uma vez que ocorrem desmatamentos desordenados, compactação e erosão de solos, ocupação urbana desordenada dentre outros processos que afetam não só o potencial de evapotranspiração e infiltração, como também provocam escoamentos superficiais excessivos, que carregam sedimentos e dejetos, os quais irão depositar-se no leito dos cursos d'água, tendo como resultado o assoreamento e a poluição ambiental (SANTANA, 2003).

Para Guerra e Cunha (2000) o relevo da bacia é um importante contribuinte para degradação de bacias hidrográficas, através da rugosidade topográfica e da presença de

declives acentuados, instáveis. Tem um papel relevante no equilíbrio das encostas, sendo um dos fatores da erosão potencial e do movimento de massa.

Nesse sentido, Santana (2003) complementa que o reconhecimento, a localização e a quantificação dos fluxos d'água nas encostas são de fundamental importância no entendimento dos processos geomorfológicos que governam as transformações do relevo, sob as mais diversas condições climáticas e geológicas.

As rotas preferenciais dos fluxos superficiais ou subsuperficiais definem os mecanismos erosivos deposicionais preponderantes e resultam da interação dos diversos fatores bióticos, abióticos e antrópicos que compõem o respectivo ambiente de drenagem. Alterações na composição desses fatores podem induzir modificações significativas na dinâmica, espaço-temporal dos processos hidrológicos atuantes nas encostas e, conseqüentemente, na dinâmica geomorfológica.

Como apresentado, o conhecimento dos atributos geomorfológicos de bacias hidrográficas é essencial para o estudo dos processos de degradação do meio físico, uma vez que através desses parâmetros é possível avaliar a sua relação com as características hidrológicas tais como precipitação e escoamento.

Para Griffiths e Stokes (2008) a introdução de dados de geomorfologia para a interpretação das condições do solo em projetos de engenharia civil é essencial, pois, além da interferência humana e processos geológicos, esse atributo é a causa mais provável de mudanças das condições do solo ao longo do tempo. Nessa abordagem, a história geral da geomorfologia da área deve ser estabelecida, e as áreas classificadas em suscetíveis a processos vulcânicos, intempéries, erosivos ou deposicionais. Dessa forma, torna-se possível estabelecer os fatores geomorfológicos que teriam influência sobre as decisões a serem tomadas.

Já em relação ao planejamento territorial, Mendes e Lorandi (2010) realizaram uma análise espacial dos principais atributos do território físico da área central urbana de São José do Rio Preto com objetivo de minimizar ou reparar os problemas atuais de ocupação urbana irregular. De acordo com os autores através de um banco de dados e cartas interpretativas poder-se-á orientar investigações locais, permitindo, em determinadas circunstâncias, diminuir os custos, o tempo e o número de situações a serem estudadas e investigadas.

Analogamente Martin-Duque et al. (2003) realizaram o estudo de caso da aplicação de mapas fisiográficos em uma área periurbana (Segóvia, Espanha), com a finalidade de ordenamento territorial, os autores apresentam como as informações desses mapas podem auxiliar na definição de uso e ocupação do solo para área. Eles afirmam que a classificação do

relevo tem sido usada mais comumente como técnicas de reconhecimento para a integração de informações de uma ampla variedade de fontes e para grandes áreas geográficas onde informações ambientais são inexistentes ou deficientes.

Nesse contexto, em relação ao planejamento territorial, de acordo com Mota (1995) a utilização de bacias hidrográficas com base em princípios ambientais constitui o melhor método para evitar a degradação, principalmente de seus recursos hídricos. Para Guerra e Cunha (2000), as bacias hidrográficas integram uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nelas desenvolvidas uma vez que, os efeitos hidrológicos e geomorfológicos de processos naturais ou antrópicos vão se refletir num determinado ponto de saída de uma bacia, e pode se propagar a jusante, por meio de bacias de drenagem adjacentes.

Desta forma, a bacia hidrográfica define-se como uma unidade conveniente ao entendimento da ação dos processos hidrológicos e geomorfológicos e das ligações espaciais entre áreas distintas, que podem afetar tanto o planejamento local como o planejamento regional (SANTANA, 2003).

Para estudar tais processos, que implicam na degradação da bacia, são necessários estudos e levantamentos detalhados que garantam confiabilidade na caracterização do meio físico, porém usualmente representam altos custos e demandam tempo para sua realização.

Para Culshaw e Price (2011) os benefícios da abordagem baseada no conhecimento do meio físico para o desenvolvimento, recuperação, e conservação das bacias hidrográficas, destacando que os benefícios de tal abordagem não têm sido claramente demonstrados em termos de redução de custos e melhorias ambientais com vista à sustentabilidade.

Como solução apresenta-se a aplicação do Sistema de Informações Geográficas - SIG, que contribui para a redução considerável de custos, aumenta a eficiência de análise e simplifica os resultados. Assim, o SIG tem um papel importante na análise de informações espaciais. A Hidrologia e Geomorfologia, enquanto disciplinas de análises de informações espaciais, não são exceções, podendo mesmo afirmar-se que, atualmente, o SIG é uma ferramenta indispensável nos estudos no âmbito hidrológico e geomorfológico.

3.2 Processos Erosivos

Os processos erosivos de acordo com Mota (1995) são fenômenos naturais que ocorrem paulatinamente, sem causar maiores problemas ao meio. Estes fenômenos dependem de vários fatores como quantidade e intensidade das chuvas, propriedades do solo, declividade

do terreno e extensão do declive, existência de cobertura vegetal e tipo de uso e ocupação da terra.

No entanto, o autor complementa que a potencialização desses processos devido à ação antrópica ocasiona diversos desequilíbrios ao meio ambiente. As principais causas dessa aceleração seriam: a alteração no escoamento natural das águas; o desmatamento; a movimentação de terras (aterros, escavações); a impermeabilização de terrenos, as práticas agrícolas inadequadas, e; ocupações incorretas de áreas de encostas, margens de recursos hídricos e terrenos suscetíveis à erosão.

Um dos fatores que potencializa os processos erosivos é o escoamento superficial. Uma vez que ocorrem alterações no sistema natural de escoamento de águas, a drenagem deixa de ser respeitada e os caminhos naturais são modificados (MOTA, 1995). Além disso, o escoamento proporciona o carreamento de sedimentos para os corpos d'água ocasionando o assoreamento e diminuição da qualidade e quantidade do recurso. De acordo com Costa (2004), a mudança do regime de escoamento superficial é consequência, principalmente, da ausência de cobertura vegetal e das diversas formas de uso do solo, e pode ser apontada como a causa mais expressiva dos processos erosivos.

O desmatamento é outro fator que contribui com os processos erosivos, pois a ausência de vegetação expõe o solo e permite que suas partículas sejam removidas devido ao impacto das chuvas. A cobertura vegetal, quando existente, diminui a velocidade do escoamento superficial, e evita o impacto direto das chuvas no solo. Para Guerra (1999), a cobertura vegetal protege os solos do impacto direto das gotas de chuva, além do que a presença do húmus, produzido pelas plantas e animais, proporciona maior estabilidade dos agregados, sob essas condições, evitando os efeitos da erosão acelerada. Dessa forma, à medida que grandes extensões de terra são desmatadas para a agricultura, ou pecuária, as taxas de erosão começam a aumentar quase que imediatamente.

Em relação à movimentação de terras, como em escavações e aterros, ocorre o desprendimento de partículas do solo que com impactos da chuva são removidas e levadas, acelerando os processos erosivos.

A impermeabilização do terreno, também aumenta a velocidade e quantidade de escoamento superficial e diminui conseqüentemente a infiltração da água no solo. Desta forma, as partículas do solo são removidas e carregadas com maior facilidade acelerando-se os processos erosivos.

O manejo do solo, segundo Brooks et al. (1991), quando realizado em condições adequadas, normalmente não aumenta a quantidade de sedimentos nos corpos d'água após

chuvas intensas; mas o manejo inadequado, em terrenos inclinados e solos frágeis, pode causar sérios problemas erosivos. Além disso, a utilização de diversos pesticidas e fertilizantes na agricultura libera substâncias no solo que são levadas através de infiltração e escoamento superficial para áreas de mananciais, e podem provocar assim problemas na qualidade da água.

A ocupação de áreas de risco, como encostas e margens de rios, além da remoção da vegetação tem como fatores agravantes a declividade do terreno e a proximidade com os corpos d'água que aceleram a remoção de partículas do solo devido às chuvas, e possibilitam as erosões, tendo como consequências deslizamentos e desmoronamentos de terras, enchentes, bem como, impactos sociais, pelas perdas de bens materiais e principalmente perdas de vidas. Analogamente, Amorim e Cordeiro (2004) relatam que nesse processo de ocupação antrópica inadequada, nessas áreas ocorre uma série de impactos ambientais, que incluem a impermeabilização do solo, alterações na topografia, erosão das margens e assoreamento dos cursos d'água, perda das matas ciliares, diminuição da biodiversidade, aumento do escoamento superficial, e outros.

Enfim, independente de qual for o agente causador, diversas são as consequências negativas decorrentes do processo de erosão do solo e de sua aceleração, segundo Mota (1995), dentre elas estão às alterações no meio ambiente aquático, elencadas a seguir:

- Assoreamento e obstrução dos cursos d'água, contribuindo para ocorrência de cheias;
- Redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios devido ao assoreamento prejudicando o abastecimento público e industrial além de outros usos;
- Diminuição a qualidade da água, alterando principalmente a turbidez e cor, e elevando consequentemente o custo de seu tratamento, e;
- Surgimento de problemas ecológicos ao meio ambiente aquático, uma vez que, eleva-se a deposição de sedimentos nos leitos dos cursos d'água e reservatórios;

O controle da erosão é fundamental para a preservação e equilíbrio do meio ambiente, tendo em vista a degradação e consequências negativas da ausência de gerenciamento adequado.

3.3 Considerações sobre escoamento superficial

Por definição, o escoamento superficial é a parcela da precipitação que trata do deslocamento da água na superfície terrestre. A parcela restante da precipitação é evaporada

diretamente para a atmosfera, infiltra-se no solo (e, eventualmente, volta à superfície onde é evaporada) ou ainda participa do metabolismo das plantas e é evaporada através de suas folhas, em um processo denominado transpiração (BONETTI; MIRANDA, 1997).

Tucci (2001) complementa que a geração do escoamento superficial é determinada por inúmeras variáveis e atributos físicos, destacando-se as características da precipitação e a capacidade de infiltração de água no solo. Nesse sentido, o escoamento superficial tem início, quando a intensidade de precipitação torna-se maior do que a velocidade de infiltração da água no solo, ou quando a capacidade de retenção de água pela superfície do terreno tiver sido ultrapassada, sendo, considerado o principal responsável pelo rápido aumento da vazão após a ocorrência de uma precipitação. Associado ao escoamento, ocorre o transporte de partículas do solo, que sofrem deposição somente quando sua velocidade for reduzida (GRIEBELER et al., 2001).

Assim, o escoamento superficial está relacionado com as características climáticas e físicas da área. Dentre os fatores climáticos destacam-se a intensidade e duração da precipitação, pois, quanto maior a intensidade, mais rápido o solo atinge a sua capacidade de infiltração provocando um excesso de precipitação que escoará superficialmente. A duração também é diretamente proporcional ao escoamento, pois para chuvas de intensidade constante, haverá maior oportunidade de escoamento quanto maior for sua duração. Dentre as características físicas pode-se destacar o tipo de solo, a declividade do terreno, cobertura vegetal e uso e ocupação da terra. A topografia da área além de influenciar na velocidade de escoamento de água no solo, interfere também no armazenamento de água, sendo as áreas de maior declive geralmente com menor capacidade de armazenamento superficial do que as mais planas (PRUSKI et al., 2001). Em relação à cobertura vegetal, esta possui influência na interceptação da precipitação, assim, quanto maior for a cobertura vegetal menor será a velocidade do escoamento superficial, favorecendo a absorção da precipitação.

As mudanças no padrão de uso da terra devido à rápida urbanização, afeta negativamente os processos hidrológicos em uma bacia (SURIYA; MUDGA, 2012). Portanto, estas variáveis são modificadas através da remoção da cobertura vegetal, compactação dos solos, manejo inadequado, impermeabilização dos solos, causando efeitos negativos como o aumento na desagregação desses solos, diminuição na capacidade de infiltração da água e consequente aumento do escoamento superficial, e favorece desta forma, condições para processos erosivos, assoreamento de cursos d'água e consequente diminuição da qualidade da água. Nesse contexto, a determinação do escoamento superficial mostra-se importante, pois possibilita apontar os possíveis impactos que ocorrem ou podem ocorrer na bacia

hidrográfica, e, além disso, dá suporte ao dimensionamento de obras hidráulicas, como barragens, terraços e outros.

Segundo Oliveira et al. (2005), para o planejamento adequado e manejo integrado de bacias hidrográficas, existem variáveis associadas ao escoamento superficial de grande importância, denominadas coeficiente de escoamento superficial (C), vazão (Q), tempo de concentração (tc) e período de retorno (T).

A vazão (Q), ou volume escoado por unidade de tempo, é a principal grandeza que caracteriza o escoamento, definida como o volume de água que atravessa a seção transversal considerada por unidade de tempo, expressa em metros cúbicos por segundo (m³/s) ou litros por segundo (L/s). O tempo de concentração (tc) é o intervalo de tempo da duração da chuva necessário para que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir para a vazão na seção de drenagem, ou seja, o tempo de percurso, até a seção de drenagem, de uma porção da chuva caída no ponto mais distante da bacia. O tempo de concentração depende de diversas características fisiográficas na bacia hidrográfica, como comprimento e a declividade do talvegue principal (SILVA; CERQUEIRA, 2010). O período de retorno (T) é o período em que uma dada chuva pode ocorrer ou ser superada (ano/vez). Por fim, o coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de deflúvio ou coeficiente de *runoff* “C” é a relação entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado (equação 1).

$$C = \frac{\text{Volume de água escoado superficialmente}}{\text{Volume Precipitado}} \quad (1)$$

Para Tucci (2000), o coeficiente de escoamento deve variar com a magnitude da precipitação já que, à medida que aumenta-se a precipitação e a atinge-se a capacidade de infiltração, o escoamento superficial aumenta o que resulta num maior coeficiente de escoamento. A determinação deste coeficiente é de suma importância para o cálculo do escoamento superficial total em uma bacia hidrográfica, tendo em vista que o conhecimento do escoamento superficial em bacias hidrográficas possui importância significativa para a elaboração de projetos de engenharia que visem o aproveitamento de água, a proteção e prevenção dos fenômenos decorrentes do seu deslocamento sobre a superfície do solo além de permitir analisar o impacto das áreas impermeáveis no gerenciamento do espaço urbano.

3.4 Técnicas para estimar o potencial de escoamento superficial a partir de modelos hidrológicos tradicionais

O modelo hidrológico é uma das ferramentas desenvolvidas pela ciência para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela diversidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem proporcionado o aumento no número de modelos (TUCCI, 1998).

Conforme Blackie e Eeles (1995) apud Griebeler et al. (2001), para bacias hidrográficas, que são, como supracitado, sistemas complexos os modelos hidrológicos têm como objetivo simplificar a complexidade das diversas variáveis do ciclo hidrológico através do uso apenas de aspectos de maior importância envolvidos nos processos hidrológicos.

A determinação dos parâmetros a serem utilizados, segundo Singh (1995), depende dos dados de entrada dos diferentes tipos de modelos disponíveis, que, por sua vez, foram desenvolvidos para diferentes finalidades. De forma geral, os modelos podem ser classificados de acordo com critérios que podem abranger a descrição do processo, escalas e técnicas de solução.

Nesse âmbito, de acordo com Souza (2008), alguns modelos hidrológicos permitem reconstituir séries hidrológicas, simular condições críticas e estudar o comportamento dos sistemas hidrológicos. Estas funcionalidades são essenciais para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente quando o tomador de decisão necessita avaliar processos quantitativos em diferentes fases ou até mesmo segundo diferentes cenários.

Os modelos utilizados no gerenciamento de recursos hídricos podem ser ordenados, segundo Barth et al. (1997) com base no seguinte:

- Modelos de otimização para partes do sistema: esses modelos possuem preocupação com melhores soluções em nível de projeto de um sistema específico.
- Modelos de planejamento: simulam as condições globais do sistema, por exemplo, o planejamento e gestão regional do tratamento de águas e esgotos.
- Modelos que representam o comportamento de uma parte do sistema: enquadram-se neste caso os *modelos do tipo hidrológico*, que simulam a transformação de chuva em vazão. Este tipo de metodologia pode servir de base para simular os efeitos das modificações do sistema e estender deterministicamente ou estocasticamente séries históricas, fazer previsões e tempo real, etc.

Para Tucci (1995), os modelos hidrológicos que procuram descrever o processo de transformação de precipitação em vazão de escoamento têm como parâmetros a taxa de áreas impermeáveis e a eficiência do escoamento superficial. As estruturas básicas desses modelos são: algoritmo de perdas por depressão e impermeabilização, perda por infiltração, escoamento superficial de toda a bacia e escoamento a superfície livre em canais.

Deste modo, existem diversos modelos chuva-vazão disponíveis para estimar o escoamento superficial, como por exemplo, o hidrograma unitário sintético, análise estatística, o método racional e o método curva-número.

O método do hidrograma unitário é recomendado para o dimensionamento de pontos de despejo e grandes galerias principais, bem como para o projeto de canais, quando a área de drenagem excede 1 km². É também aplicável, para áreas que possivelmente sofrerão com significativa urbanização no futuro. A análise estatística pode ser utilizada, ao invés de outros métodos, se houver disponibilidade de dados, para cursos d'água de grande porte que passam, através de áreas urbanas, e para pequenos cursos d'água que drenam uma área de 25 km² ou mais, desde que suas características não venham a ser afetadas pela urbanização (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA- DAEE; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 1979).

O método racional é aplicável para avaliação do escoamento superficial direto, tanto para a chuva inicial quanto para a chuva máxima de projeto, para bacias pequenas. Por fim, o método curva-número – CN desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) é um método empírico baseado em um conjunto de relações entre precipitação e condições de superfícies de solo para se estimar o escoamento superficial.

A seguir, serão relacionados dois modelos hidrológicos de suma importância para as análises deste trabalho, pois possuem em sua metodologia parâmetros pertinentes a serem utilizadas tendo em vista as características da bacia hidrográfica em estudo. São eles: método racional e método curva-número.

3.4.1 Método Racional

A estimativa do escoamento superficial pode ser obtida através de diferentes métodos, no entanto, um método que é amplamente empregado em diversas aplicações, recomendado para pequenas bacias hidrográficas, é o método Racional. Esta metodologia tem como

benefício suprir a ausência de séries históricas de dados hidrológicos representativos, que ocorre, em pequenas bacias.

Segundo Tucci (1995) os princípios básicos dessa metodologia são:

- A duração da precipitação máxima de projeto é igual ao tempo e concentração. Admite-se que a bacia é pequena para que essa condição aconteça, pois a duração é inversamente proporcional à intensidade;
- Adota-se um coeficiente único de perdas, denominado C, estimado com base nas características da bacia;
- Não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões.

Uma razão para que esse método seja limitado a pequenas áreas de drenagem é que a boa prática requer, quando se trata de grandes bacias, a obtenção dos hidrogramas de cheias e a análise de uma possível atenuação das descargas de pico dos mesmos, para que os projetos sejam econômicos (DAEE; CETESB, 1979).

De acordo com Tucci (1995), o conceito de *bacias pequenas* é relativo, assim é necessária uma definição em função de suas características hidrológicas. As seguintes propriedades descrevem segundo o autor uma bacia pequena em relação a precipitações e a outras características do escoamento que produzem as vazões de pico:

- A chuva pode ser considerada uniformemente distribuída no tempo e no espaço;
- A duração da chuva, normalmente, excede o tempo de concentração da bacia;
- O escoamento superficial é devido, principalmente, ao escoamento sobre superfícies, e;
- O processo de amortecimento nos canais é desprezível.

De maneira geral, bacias pequenas, podem ser classificadas como aquelas menores que 3 km², ou que tenham tempo de concentração menor que 1 hora (TUCCI, 1995) esse valor difere de acordo com autores em média em 1 km.

Como dito anteriormente, esse método utiliza informações da intensidade máxima, média de precipitação da área e um único coeficiente de escoamento superficial estimado com base nas características da bacia, assim a fórmula do modelo é dada pela equação 2:

$$Q = 0,278.C.I.A \quad (2)$$

Onde, Q representa a vazão de escoamento superficial em m³/s; C = coeficiente adimensional, relacionado com a parcela da chuva total que transforma em chuva excedente e com os efeitos

de armazenamento sejam desprezados, o coeficiente C é chamado de coeficiente de escoamento superficial (coeficiente de *runoff*) e exprime apenas a parcela da chuva total que se transforma em chuva excedente; I = intensidade média da chuva em mm/hora, considerada constante durante sua duração; A = área da bacia em km².

Nas aplicações práticas, a intensidade da precipitação é obtida das curvas ou equações de intensidade-duração-frequência, válidas para a região em estudo. Normalmente, estas equações se expressam através de modelos da forma (equação 3):

$$i = \frac{k \cdot T^m}{([tc + td]^n)} \quad (3)$$

Sendo T o período de retorno e k, m, c e n coeficientes que dependem do local. A duração da chuva (td) deve ser a duração da chuva crítica de projeto que, no caso, deve ser feita igual ao tempo de concentração (tc), para o qual existem várias formulações empíricas.

A Tabela 1 apresenta os principais métodos para o cálculo do tempo de concentração apresentados por Canholi (2005), Tomaz (2002), Tucci (2001) e Welsh (1989) apud Santim (2010), onde são apresentadas as descrições, recomendações e restrições.

O coeficiente de escoamento superficial é a variável do método racional menos susceptível de determinações mais precisas e requer uma seleção minuciosa. Seu uso na equação implica numa relação fixa para qualquer área de drenagem, porém na realidade isso não acontece, pois, o coeficiente engloba os efeitos de infiltração, armazenamento por detenção, evaporação, retenção, dentre outros efeitos que afetam a distribuição cronológica e a magnitude da vazão de escoamento superficial (DAEE - CETESB, 1979).

Sua determinação é normalmente obtida de tabelas elaboradas com base nas características da bacia hidrográfica (ou da área de drenagem), que incluem o tipo de solo, cobertura, tipo de ocupação, tempo de retorno, e intensidade da precipitação.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores recomendados pela American Society of Civil Engineers – ASCE e citados por Tucci (1995) e a Tabela 4, com os valores adotados pela prefeitura do município de São Paulo.

Tabela 1 – Principais métodos para o cálculo do tempo de concentração

Método	Descrição, restrições e recomendações	Parâmetros e variáveis necessárias
Kirpich	A fórmula de Kirpich foi o resultado do estudo de seis pequenas bacias rurais. É muito utilizada na aplicação do método racional para áreas rurais com no máximo 0,5 km ² de área, declividade entre três e 10%, não sendo indicada para bacias alongadas por subestimar o tempo de concentração.	Comprimento do talvegue e declividade do talvegue.
<i>California Culverts Practices</i>	Possui como grande vantagem a fácil obtenção dos dados. É uma simplificação da fórmula de Kirpich, sendo indicada para bacias hidrográficas de pequeno porte (0,5 km ²) e com pouca complexidade nas características de uso e ocupação da terra.	Comprimento do talvegue e diferença entre a cota do ponto mais alto da bacia e a cota de saída da bacia.
Onda Cinemática	Essa equação é adequada para pequenas bacias onde o método racional pode ser aplicado. Ela foi deduzida a partir das equações da onda cinemática aplicada a superfícies, baseando-se na hipótese de precipitação constante igual ao tempo de concentração e na equação de Manning. Nesta equação está incluso o impacto das gotas de água, os obstáculos dos escoamentos como o lixo, a vegetação, as pedras e o transporte de sedimentos.	Rugosidade de Manning, intensidade da precipitação, comprimento do talvegue e declividade.
SCS Lag	Indicada para bacias rurais com áreas de até 8 km ² . Para aplicações em bacias urbanas o SCS sugere procedimentos para ajuste em função da área impermeável e da parcela de canais que sofreram modificações. Essa fórmula superestima o valor do tc em comparação com os resultados da fórmula de Kirpich.	Comprimento do talvegue, número da curva CN e a declividade da bacia.
SCS – método cinemático	Considera o tempo de concentração como o somatório dos tempos de percurso dos diversos trechos que compõe o comprimento do talvegue. Para as áreas não urbanas existe tabela que fornece valores de velocidade, já para as áreas urbanas é indicado o uso da fórmula de Manning.	Comprimento do talvegue e velocidade média no trecho.

Fonte: (CANHOLI; TOMAZ; TUCCI; WELESH, 2005, 2002, 2001, 1989 apud SANTIM, 2002).

Tabela 2 – Valores de C com base em superfícies

Superfície	C	
	Intervalo	Valor esperado
Pavimento		
Asfalto	0,70 - 0,95	0,83
Concreto	0,80 - 0,95	0,88
Calçadas	0,75 - 0,85	0,80
Telhado	0,75 - 0,95	0,85
Cobertura: grama solo arenoso		
Pequena declividade (2%)	0,05 - 0,10	0,08
Declividade média (2 a 7%)	0,10 - 0,15	0,13
Forte declividade (7%)	0,15 - 0,20	0,18
Gramma, solo pesado		
Pequena declividade (2%)	0,13 - 0,17	0,15
Declividade média (2 a 7%)	0,18 - 0,22	0,20
Forte declividade (7%)	0,25 - 0,35	0,30

Fonte: ASCE (1969) apud Tucci (1995).

Tabela 3 – Valores de C com base em tipos de solo e declividades

Declividade (%)	Solos arenosos	Solos francos	Solos argilosos
	Florestas		
0 – 5	0,10	0,30	0,40
5 – 10	0,25	0,35	0,50
10 – 30	0,30	0,50	0,60
	Pastagem		
0 – 5	0,10	0,30	0,40
5 – 10	0,15	0,35	0,55
10 – 30	0,20	0,40	0,60
	Terras cultivadas		
0 – 5	0,30	0,50	0,60
5 – 10	0,40	0,60	0,70
10 – 30	0,50	0,70	0,80

Fonte: ASCE (1969) apud Tucci (1995).

Tabela 4 – Valores de C

Zonas	C
Edificação muito densa: Partes centrais densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 - 0,95
Edificação não muito densa: Partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 - 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: Partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas.	0,50 - 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: Partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,25 - 0,50
Subúrbios com alguma edificação: Partes de arrabaldes e subúrbios com pequena densidade de construção.	0,10 - 0,25
Matas, parques e campos de esporte: Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação.	0,05 - 0,20

Fonte: Prefeitura de São Paulo apud Tucci (1995).

Quando a área de drenagem é heterogênea com ocupação diferenciada, atribui-se a cada sub-região um valor para o coeficiente de escoamento superficial. O coeficiente médio para toda a área de drenagem é dado pela média ponderada em relação às áreas das sub-regiões. Assim, se a área de drenagem A é caracterizada por n sub-regiões, cada uma com área A_i , $i = 1, 2, \dots, n$, e tendo cada sub-região um valor específico correspondente para o coeficiente de *runoff*, C_i , então o coeficiente médio da área de drenagem será determinado pela equação 4:

$$C = \frac{1}{A(C_1 + C_2 + \dots + C_n A_n)} \quad (4)$$

Segundo DAEE - CETESB (1979), o método possui algumas limitações, e é muito criticado pelo fato de que as respostas obtidas através de sua aplicação representam apenas aproximações. A grande desvantagem deste método é que, normalmente fornece somente um ponto do hidrograma, por outro lado, quando a bacia torna-se complexa, com várias sub-bacias, tende a superestimar as descargas, resultando em obras de drenagem superdimensionadas.

3.4.2 Método de Curva Número - CN (SCS-USDA)

Elaborado pelo USDA-SCS (1972), o método curva-número permite a partir do parâmetro curva - número, identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial nas diferentes superfícies (PICKBRENNER et al., 2005). Segundo Tucci (1998), é o método de separação do escoamento mais conhecido e empregado em todo o mundo, devido a sua fácil utilização e reduzido número de parâmetros, além disso, outro fator preponderante para sua escolha é a relação direta entre os parâmetros e as características da bacia. O modelo foi proposto para uma pequena bacia rural, e quando for necessário subdividi-la em sub-bacias, poderá ser utilizado em conjunto com o modelo de Muskingum, que simula o escoamento em rios.

Ao propor a análise do uso e cobertura da terra, juntamente com as características de solo, este modelo permite a produção de informações sobre o escoamento superficial, sendo estas capazes de suprir a carência de dados hidrológicos existente em grande parte dos municípios brasileiros.

Para Tucci (1995) este método se aplica especialmente quando não se dispõem de dados hidrológicos. Existe uma adaptação do método para os solos de São Paulo, suficientemente abrangente para ser aplicado a solos de outros estados brasileiros.

A fórmula proposta pelo SCS é representada pela equação 5:

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (5)$$

Em que: Q = escoamento superficial direto (mm);
P = precipitação total acumulada (mm);
S = Capacidade máxima de armazenamento no solo (mm)

O valor de S depende do tipo de ocupação do solo e pode ser determinado, facilmente, por tabelas próprias. A quantidade de 0,2S é uma estimativa de perdas iniciais (A_i), devidas à interceptação e retenção em depressões. Por essa razão impõe-se a condição $P > 0,2S$.

Por meio da análise de mais de 3 mil tipos de solos com suas respectivas coberturas vegetais e plantações pode-se estabelecer uma relação empírica entre a capacidade de armazenamento da bacia (S) e o índice Curva Número (CN), (CANHOLI, 2005 apud

SOUZA, 2008). Desta forma a seguinte mudança de variável é feita para facilitar a solução da equação 6.

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (6)$$

Em que: S = Capacidade máxima de armazenamento no solo (mm)
CN = Curva Número

Segundo Tucci (1998), essa expressão representa as condições de cobertura do solo, variando desde uma cobertura muito permeável até uma cobertura completamente impermeável e de um solo com grande capacidade de infiltração para um de baixa infiltração.

A figura 1 apresenta o quadro com os grupos hidrológicos de solo com a sua descrição em relação aos tipos de solo e condições de uso, divididos em quatro (4) grupos: A, B, C, D.

Figura 1 – Quadro dos grupos hidrológicos de solo – tipos de solo e condições de uso

Grupos	Tipos de solo e condições de uso
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas, e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo não atingindo 1%.
B	Solos arenosos menos profundos que o Grupo A e com menos teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é, quase sempre, presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe de condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como o Grupo B, mas com a camada argilosa quase impermeável, ou horizontes de seixos rolados.

Fonte: Tucci (1995).

As tabelas 5 permite a estimativa do parâmetro CN para áreas rurais (TUCCI 1995) e a tabela 6 permite a estimativa dos valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (TUCCI 1998), para cada um dos quatro grupos hidrológicos de solos.

Tabela 5 – Estimativa dos valores de CN para áreas rurais

Uso do solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	Em curvas de níveis	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de níveis	62	74	82	85
	Terraceamento em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de níveis	60	72	81	84
	Terraceamento em nível	57	70	78	89
	Pobres	68	79	86	89
	Normais	49	69	79	94
Pastagem em curvas de nível	Boas	39	61	74	80
	Pobres	47	67	81	88
	Normais	25	59	75	83
Campos permanentes	Boas	6	35	70	79
	Normais	30	58	71	78
	Esparsas, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Densas, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras estradas de terra	Normais	56	75	86	91
	Ruim	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Floresta	Muito esparsa, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsas	46	68	78	84
	Densas, alta transpiração	26	52	62	69
	Normais	36	60	70	76

Fonte: Tucci (1998).

Tabela 6 – Estimativa dos valores de CN para bacias urbanas e suburbanas

Descrição do uso do solo		Tipo de solo			
		A	B	C	D
Espaços abertos					
• Matos ou gramas cobre 75% ou mais da área		39	61	74	80
• Matos cobrem 50% a 75% da área		49	69	79	77
Áreas comerciais (85% impermeáveis)		89	92	94	95
Distritos industriais (72% impermeáveis)		81	88	91	93
Áreas residenciais					
Tamanho do lote (m ²)	Área impermeável (%)				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques e estacionamentos, telhados, viadutos		98	98	98	98
Arruamentos e estradas:					
• Asfaltadas e com drenagem pluvial		98	98	98	98
• Paralelepípedos		76	85	89	91
• Terra		72	82	87	89

Fonte: Tucci (1998).

Os valores de CN nas tabelas são referentes às condições médias (condição II) de umidade antecedente. Para outras condições são realizadas correções aos valores tabelados (Tabela 7), as três condições de umidade antecedente do solo são:

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

Tabela 7 – Correção dos valores de CN de acordo com a umidade antecedente

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

Fonte: Tucci (1998).

3.5. Técnicas para estimar o potencial de escoamento superficial a partir de características físicas da bacia

A estimativa do potencial de escoamento superficial a partir de modelos hidrológicos apresenta algumas limitações, apesar de sua simplicidade no que diz respeito a parâmetros utilizados nos métodos supramencionados, facilidade de manipulação das equações, e rapidez na obtenção dos resultados.

De acordo com Tucci (1998), os modelos exigem um bom treinamento do usuário no entendimento do modelo escolhido, para que não crie tendenciosidade no seu uso. Além disso, os modelos que apresentam resultados mais próximos da realidade ficam limitados para os que trabalham com bacias pequenas uma vez que, a medida que se subdivide a bacia, devido as características físicas e de variação da precipitação, o número de parâmetros aumenta.

Outro problema é que com o aumento dos impactos antrópicos na bacia, e, com a preocupação nas mudanças climáticas e a necessidade de quantificar esses aspectos, cresceu a busca pelo estabelecimento de relações entre as características físicas e os parâmetros dos modelos, o que esbarra no problema de qual a escala dos processos hidrológicos que deve-se trabalhar, o que diminui a veracidade dos resultados (TUCCI, 1998).

Um método, conhecido como método de Cook, permite através de uma abordagem diferente estimar as vazões máximas decorrentes do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica. Ele considera quatro categorias de características da bacia: relevo, infiltração, cobertura vegetal e armazenamento na superfície, cujos valores numéricos são fornecidos por uma tabela, a ser desenvolvida pelo pesquisador.

O método consiste em somar tais valores para as características da bacia em estudo. O total resultante, denominado $\sum W$, é aplicado a um gráfico especialmente construído para fornecer as estimativas da vazão.

Desta forma a elaboração de mapas de potencial de escoamento superficial com base em características físicas da área de estudo pode solucionar esta dificuldade. De acordo a metodologia proposta por Pejon e Zuquette (1993), e fundamentada no método de Cook, o mapa de escoamento superficial é baseado na atribuição de pesos aos atributos do meio físico, diretamente relacionados com os processos de escoamento superficial e infiltração.

Para Zuquette e Gandolfi (2004), essas informações são muito importantes na obtenção de coeficientes de escoamento (*runoff*) mais realistas (e não baseados em tabelas), aplicados tanto para a instalação de obras de engenharia quanto para áreas urbanas ou para definição de áreas potenciais de erosão ou, ainda, na identificação das áreas com maior potencial para infiltração.

Barreto-Neto e Souza Filho (2003) complementam que a obtenção do potencial de escoamento superficial a partir dessas características pode contribuir para o auxílio ao planejamento e gerenciamento de bacias de drenagem carentes de dados hidrológicos e sujeitas a constantes mudanças no uso do solo.

Desta forma, no que diz respeito à elaboração das cartas de escoamento superficial e infiltração, devem retratar, para chuvas em que a sua intensidade é superior à capacidade de infiltração, as diferentes porcentagens de escoamento e infiltração para as áreas, em função das características do meio físico (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

Segundo o mesmo autor é necessário, para elaboração de cartas com essas características, informações básicas listadas a seguir:

- Registro de pluviosidade e intensidade;
- Medidas de vazões;
- Ocupação antrópica e;
- Características do meio físico.

Dentre as características do meio físico, os atributos que devem ser considerados incluem declividade e tipo de superfície, litologia, materiais inconsolidados (textura, gênese, espessura e permeabilidade), densidade de drenagem e feições de armazenamento superficial. Os pesos que devem ser atribuídos a cada atributo devem ter valores maiores quanto maior for a sua relação com o potencial de escoamento superficial.

A declividade representa o grau de inclinação do terreno, e no estudo de Zuquette e Gandolfi (2004) foi considerada como atributo mais importante no processo de escoamento superficial.

Segundo Mota (1981), a declividade do terreno contribui para o escoamento das águas. Quanto maior for o trecho em declive, maior será o escoamento da água pela superfície, carreando solo (através da erosão) e outros materiais para os recursos hídricos superficiais, influenciando, portanto na qualidade de água dos mesmos. Áreas baixas estão mais sujeitas a inundações do que terrenos elevados, mostrando que há também, um inter-relacionamento entre a topografia e fatores hidrológicos.

Analogamente, Camarinha (2011) descreve que em terrenos mais íngremes, quando ocorre a precipitação e a água toca o solo a tendência é que ela escoe mais rapidamente pela superfície, diminuindo o tempo de contato de água com a superfície do terreno e conseqüentemente a disponibilidade de infiltração. Entretanto, em terrenos com baixas declividades (planos) ou que possuem pequenas ondulações, há um menor escoamento superficial, propiciando condições para maior infiltração.

A litologia, ou seja, estrutura geológica e formação superficial dos elementos que compõem a superfície terrestre condicionam a maior ou menor permeabilidade do terreno, tal como os materiais inconsolidados, que são classificados em relação a sua textura, gênese, espessura e permeabilidade.

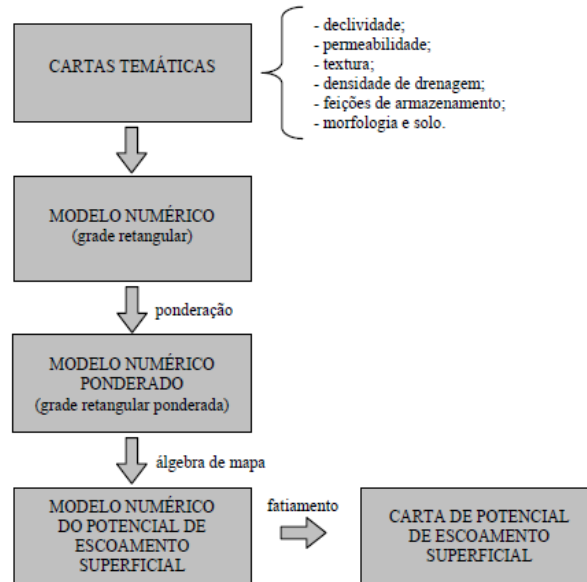
A densidade de drenagem é definida como o número de canais de drenagem por quilometro linear, ou seja, é a relação entre o comprimento total dos cursos d'água e a área de drenagem. A determinação desse número de canais no processo de escoamento superficial é importante, segundo Mendonça e Lorandi (2006), elevada densidade de drenagem indica um

baixo índice de infiltração, resultando em uma rápida concentração do escoamento superficial e um alto potencial de fluxo, ao passo que áreas de baixa densidade de drenagem apresentam alto índice de infiltração e escoamento superficial laminar generalizado.

As feições de armazenamento superficial são representadas pela presença na área de estudo de pequenas lagoas ou lagos que retenham a água por determinado tempo, favorecendo a infiltração ou a evaporação, tendem a diminuir o escoamento superficial. Conforme Zuquette e Gandolfi (2004), o número dessas feições que seria necessário para uma redução considerável do escoamento é de difícil quantificação.

Nesse contexto é importante ressaltar que, segundo esta metodologia, a determinação dos pesos para cada um desses fatores, embora seja subjetivo e dependente da experiência do analista, apresenta resultados positivos e verídicos, uma vez que não são definidas porcentagens de escoamento, mas sim permite uma divisão da área em regiões que apresentem maior ou menor potencial de escoamento superficial. A Figura 2 apresenta o fluxo de operações resumidas para a obtenção da carta de escoamento superficial.

Figura 2 – Fluxo de operações para a obtenção da carta de escoamento superficial



Fonte: Mendonça e Lorandi (2006).

Deste modo, Mendonça e Lorandi (2006) explicam que as seis cartas temáticas obtidas em formato matricial, foram convertidas em modelos numéricos no formato de grade retangular e submetidas a um processamento algébrico, resultando assim em uma grade retangular representando a pontuação final. A mesma rotina divide a grade numérica final em

faixas, ou classes, e retorna uma carta temática no formato matricial, a carta de potencial de escoamento superficial.

3.6 Sistema de Informações Geográficas – SIG e Modelagem hidrológica – ArcHydro

Os instrumentos computacionais de geoprocessamento, chamados de SIG permitem a realização de análises complexas, quando integram dados de diversas fontes, criam banco de dados georreferenciados e ainda tornam possível a produção de documentos cartográficos (FONSECA, 2006).

O SIG pode ser considerado em uma definição simples conforme Burrough (1986 apud PAIVA, 2000, p.19), como um “conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real”. Segundo Camargo (1997), para estudar questões que envolvem diversas variáveis, como é o caso do estudo de bacias hidrográficas, o SIG apresenta-se como um moderno instrumento para o planejamento, controle e supervisão. Afinal, a qualidade da água é afetada por diversos fatores naturais e antropogênicos, que incluem fatores hidrológicos, climáticos, geológicos, dentre outros. Esses dados são provenientes de diferentes fontes como imagens de satélite, trabalhos de campo, mapas convencionais e, além disso, possuem unidades de medida particular.

Nesse sentido segundo Ferraz et al. (1999), o SIG oferece mecanismos para combinar essas várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, para consultar, recuperar e visualizar o conteúdo da base de dados e gerar mapas temáticos.

Assim, o SIG tem um papel importante na análise de informações espaciais e a hidrologia, enquanto disciplina de análise de informação espacial, não é exceção, podendo mesmo afirmar-se que, atualmente, o SIG é uma ferramenta indispensável nos estudos no âmbito hidrológico (FERNANDEZ, 2004 apud SANTOS et al., 2008).

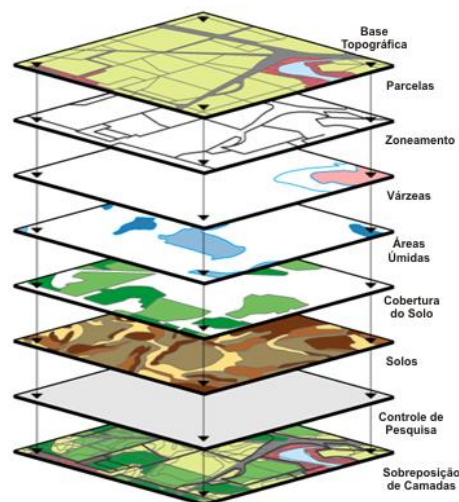
Analogamente, segundo Ferraz et al. (1999) nos últimos anos o SIG tem se destacado como a maior tendência mundial em aplicações de modelagem hidrológica, e seu objetivo principal é a determinação de parâmetros hidrológicos pela análise da topografia do terreno, a partir de um Modelo Digital de Elevações e das características da cobertura do solo. Alguns desses modelos podem ser executados totalmente dentro de um SIG, em casos em que a variabilidade temporal não seja necessária ou nos quais sejam consideradas as médias anuais.

Deste modo, para representar as características físicas e hidrológicas de uma bacia, um modelo hidrológico requer diversas informações. Para se acoplar o SIG a um modelo hidrológico é necessário efetuar os seguintes passos:

- Construção de uma base de dados espacial;
- Determinação dos parâmetros requeridos pelo modelo;
- Desenvolvimento de uma interface de comunicação entre o modelo e o SIG.

O primeiro passo é o mais extenso e demorado, em termos gerais, é necessário digitalizar (topografia, geologia, tipo de solo, etc.) para convertê-la em formato digital. Para existir uma interface entre o modelo e o SIG, é necessário existir correspondência entre os dois. O modelo a utilizar depende da problemática hidrológica a estudar. O SIG, por sua vez, deve apresentar funcionalidades que permitam obter, editar e analisar a informação que o modelo requer. (SANTOS et al., 2008). A Figura 3 apresenta a caracterização da bacia através de SIG.

Figura 3 – Caracterização da bacia através de SIG



Fonte: Korte (2001).

Para Faria (2012), a integração do modelo a um SIG com o uso de recursos específicos disponíveis, tais como modelos de chuva – vazão, identificação automática de bacias e sub-bacias do modelo digital de elevação dentre outros, é mais uma possibilidade promissora.

O ArcGis é citado como o sistema geográfico muito utilizado atualmente, construído em torno de uma base de dados geográficos, que usa uma abordagem de banco de dados objeto – relacional para arquivar dados espaciais.

Pode-se ressaltar um sistema de informação geográfico para recursos hídricos, que opera dentro do ArcGis chamado de ArcHydro, uma vez que representa dados de hidrografia

e hidrologia, criando uma base para obter um entendimento mais profundo de sistemas hídricos superficiais.

O ArcHydro pode ser entendido tanto como um conjunto de ferramentas, quanto como uma estrutura de dados projetada para armazenar e relacionar entre si conjuntos de dados geográficos utilizados na área de recursos hídricos. A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (MAIDMENT, 2002).

Desta forma o *toolbox* ArcHydro pode ser definido como um conjunto de rotinas e comandos orientados para a criação, manipulação e apresentação de feições hidrológicas no Sistema de Informações Geográficas ArcGis. As ferramentas incluem funcionalidades de tratamento de dados vetoriais, matriciais e séries temporais (UTEXAS, 2012).

Para Whiteaker (2012), o ArcHydro é um modelo de dados hidrológicos que propicia estrutura de armazenamento para dados geoespaciais e temporais e permite o uso de tais dados com modelos de hidrológicos, além disso, estas informações de acordo com Maidment (2002) podem ser armazenadas em vários níveis, são eles:

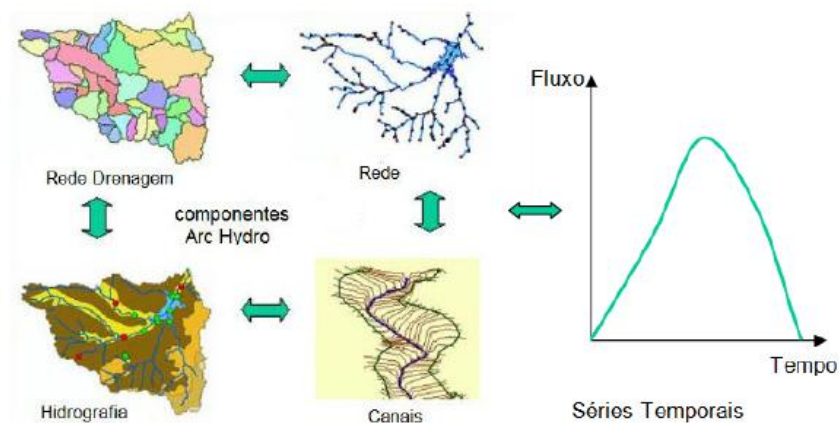
- Base de Dados Geográficos (Geodatabase);
- Conjunto de dados (Feature data set);
- Rede geométrica (Geometric Network);
- Classes de feições (Feature class);
- Relações (Relationship)

Em relação às ferramentas do ArcHydro, estas são utilizadas para derivar diversos dados que coletivamente descrevem as condições de drenagem de uma bacia hidrográfica. A análise dos dados matriciais é realizada para gerar dados da direção de fluxo de água, fluxo acumulado, definição da drenagem, segmentação da drenagem e delimitação de bacias. Esses dados são então utilizados para desenvolver uma representação vetorial de uma bacia hidrográfica e suas condições de drenagem a partir de um ponto selecionado.

A utilidade das ferramentas do ArcHydro é demonstrada pela aplicação de funções para desenvolver atributos que podem ser úteis na modelagem hidrológica. Para atingir esses objetivos, o usuário é exposto a importantes características e funcionalidades das ferramentas, ambas para versão matricial ou vetorial.

Nesse contexto, o ArcHydro quando associado a um modelo tem um conjunto de ferramentas que permite a definição geral das características das várias componentes, a forma como estas estão interconectadas bem como funcionalidades que permitem preencher uma base de dados com parâmetros utilizados por um número significativo de modelos hidrológicos. A Figura 4 apresenta os componentes do ArcHydro.

Figura 4 – Componentes do ArcHydro



Fonte: Soares et al. (2012).

A fase de pré-processamento do terreno utiliza o Modelo Digital de Elevação – MDE (ou Modelo Numérico de Terreno – MNT) para identificar a superfície de drenagem. Uma vez processado, o MDE e os seus derivados podem ser utilizados para caracterização do relevo, delimitação de bacias hidrográficas, definição da rede de drenagem, e obtenção de atributos hidrológicos.

De acordo com Soares et al. (2012), duas componentes são fundamentais no pré-processamento:

- **Direção do Fluxo:** define o movimento da água entre células do terreno. A direção do fluxo no ArcHydro é baseada exclusivamente na topografia, ou seja, no declive definido pelo terreno (não há consideração do efeito dos potenciais hidráulicos), e;
- **Sistema de Drenagem estabelecido:** definição as áreas de drenagem e a sua conectividade.

O mesmo autor considera quatro elementos chave no pré-processamento do terreno:

a) Depressões ou afundamentos – *Sinks*: são as áreas em que a água flui, mas não se verifica a saída de fluxo à superfície, no MDE a maioria das depressões são artificiais e estão relacionadas com a construção do modelo, entretanto, existem depressões reais. Para condições de escoamento lento, alguns sumidouros vão capturar a água que nunca sairá dessa depressão pelo que não irá contribuir para jusante, enquanto, sob elevadas vazões, estes sumidouros vão encher e transbordar e eventualmente haverá contribuição de água para jusante;

b) Fluxos conhecidos: representam padrões de drenagem observados;

c) Lagos conhecidos e;

d) Limites da área de drenagem conhecidos: são os limites da área de drenagem que representam os limites capturados como camadas de polígonos vetoriais.

Assim, a criação primordial da base de dados possibilitará um estudo das características hidrológicas da bacia. O próximo procedimento a ser realizado é o *Terrain Morphology* (morfologia do terreno), que permite a caracterização de áreas e volumes de drenagem bem como traçar o perfil de fronteiras de drenagem usando a elevação descrita no MDE ou criar uma conectividade de rede para áreas de drenagem não dendríticas (áreas com poços ou sumidouros). Esta ferramenta possui funções principais de acordo com os estudos de Djokic (2008) apud Soares et al. (2012), elencadas a seguir:

- Gestão dos dados de morfologia do terreno;
- Caracterização da área de drenagem;
- Definição das fronteiras de drenagem;
- Caracterização das fronteiras de drenagem;
- Caracterização da rede de conexão de drenagem.
-

A função *Watershed Processing* (processamento de bacias hidrográficas) é o próximo passo e permite uma delimitação das sub-bacias, seja uma seleção automática em que as sub-bacias serão definidas pela rede de drenagem fornecida ou uma delimitação das sub-bacias segundo fronteiras políticas, lagos ou áreas de estudo. Esta ferramenta delimita também o maior percurso de escoamento para bacias como um todo, ou para as sub-bacias definidas isoladamente.

A ferramenta *Network Tools* com menos funcionalidades que anteriores permite, sobretudo criar uma rede hidrológica associando as várias ações anteriormente realizadas. Possibilita a criação de um esquema Node/Link, em que os vários nós estão associados e interligados por toda a bacia, podendo ao seleccionar-se um segmento da rede saber qual o nó a montante e a jusante.

Por fim, a ferramenta de atributos *Attribute Tools*, permite criar uma identificação (ArcHydro ID) para cada uma das partes constituintes da rede de água, podendo a partir daí identificar a linha a jusante ou a montante mais próxima de qualquer uma das linhas na rede hidrológica. Além disso, outra funcionalidade importante é a possibilidade de introdução de séries de dados temporais.

Enfim, a partir desse banco de dados elaborado é possível o estudo das características hidrológicas da bacia hidrográfica. Segundo Soares et al. (2012), um ponto positivo de se escolher utilizar o modelo ArcHydro é o fato de ser um modelo de dados uniforme, com uma grande extensão de manipuladores e que pode ser testado, corrigido e melhorado a qualquer momento durante o trabalho. Faria (2012), vem ao encontro do autor quando enfatiza que o ArcHydro representa os dados disponíveis de recursos hídricos de maneira organizada e abre o caminho para a construção de sistemas de informação hidrológicos que sintetizem dados de recursos hídricos geoespaciais e temporais, garantindo uma boa análise e modelagem hidrológica.

3.7 Projeto TOPODATA – Representação das condições do relevo

Desde a disponibilização de dados Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM para a América do Sul, em meados de 2003, existe uma grande expectativa com relação à ampliação de conhecimentos sobre nosso território, justificada pela carência geral de dados topográficos em escalas adequadas e para áreas desprovidas de mapeamento topográfico.

A utilização dos dados digitais do projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008; VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010) é uma alternativa de representação das condições do relevo. O projeto TOPODATA disponibiliza variáveis geomorfométricas obtidas de dados SRTM produzidos originalmente na resolução espacial de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30) por krigagem, onde, em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo de variáveis.

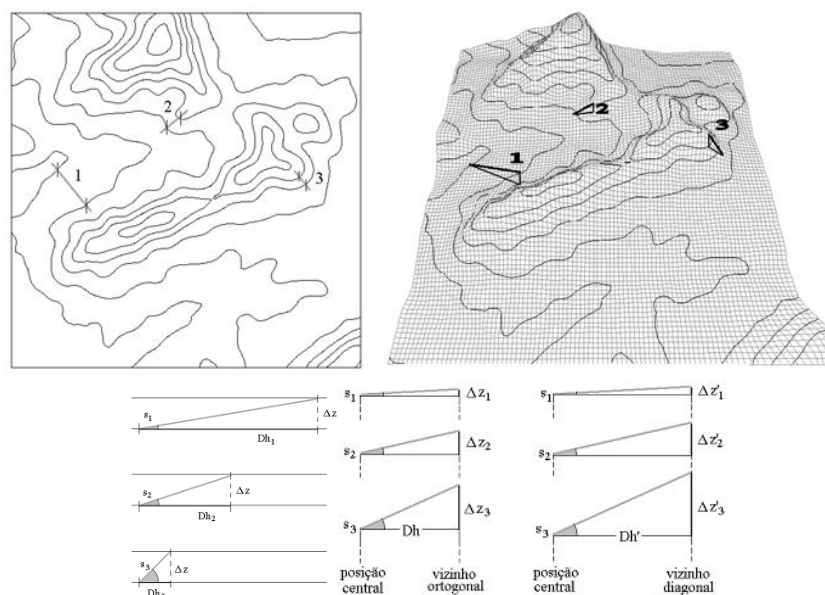
De acordo com Muñoz et al. (2011), o banco de dados TOPODATA tem como um de seus objetivos possibilitar o aprimoramento do conhecimento das relações solo-relevo e,

consequentemente, contribuir ao desenvolvimento de metodologias para o mapeamento sistemático de solos no Brasil.

A iniciativa TOPODATA propõe que derivações básicas da informação topográfica estejam prontamente à disposição da comunidade para seu uso. Desta forma, através destes dados digitais disponíveis é possível utilizar o TOPODATA para identificar os atributos geomorfológicos da bacia hidrográfica: declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical além de insumos para o delineamento da estrutura de drenagem. Tais variáveis correspondem aos elementos básicos sobre os quais se fundamentam as técnicas de interpretação e análise do relevo, podendo ser usadas para entendimento da dinâmica da superfície, e servindo de base para elaboração de mapas, sendo disponibilizadas para uso no sítio online do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>.

Em relação à declividade do terreno (Figura 5), devido à sua estreita associação com processos de transporte gravitacional (escoamento, erosão, deslizamento), é uma variável básica para ao estudo geomorfológico. É definida como o ângulo de inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal. Seus valores podem variar de 0 a 90°, embora seja mais comumente expressa em porcentagem (VALERIANO, 2008). A inclinação pode ser obtida diretamente em campo com devida instrumentação ou indiretamente, tratando-se de Modelos Digitais de Elevação, por análise dos desníveis de *pixels* vizinhos (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010).

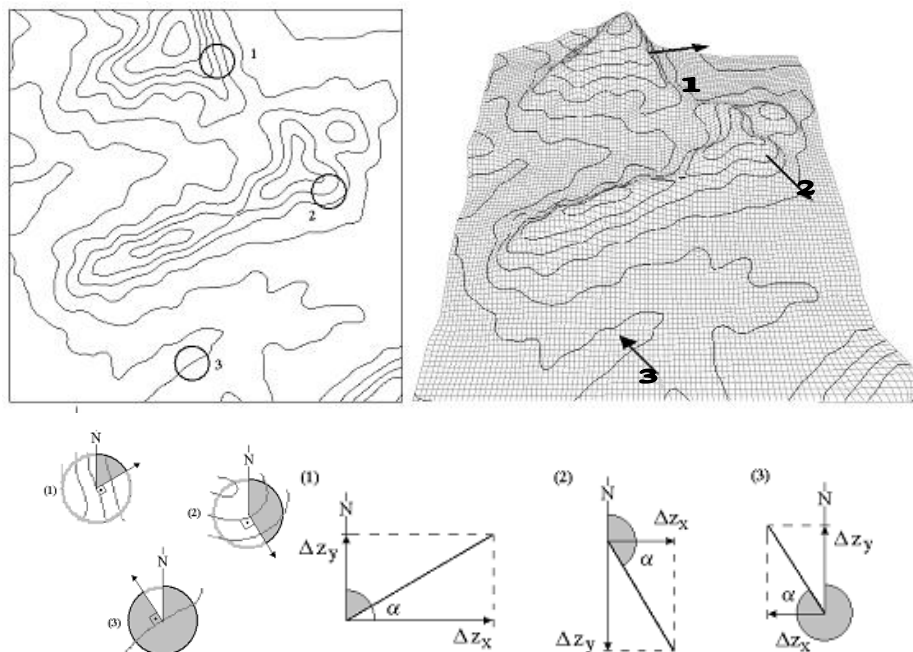
Figura 5 – Declividade em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).



Fonte: Valeriano (2008).

A orientação de vertentes (também chamada de exposição ou direção) é definida como o ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente. É expressa em graus, de 0° a 360° (Figura 6). Em campo é determinada pelo uso da leitura da bússola visada morro abaixo, ou seja, no sentido presumido do escoamento, diferentemente em mapas topográficos onde é obtida pela direção transversal à isolinha local e no sentido descendente. Seu conhecimento pode auxiliar muito na definição de direções preferenciais de escoamento superficial (VALERIANO, 2008).

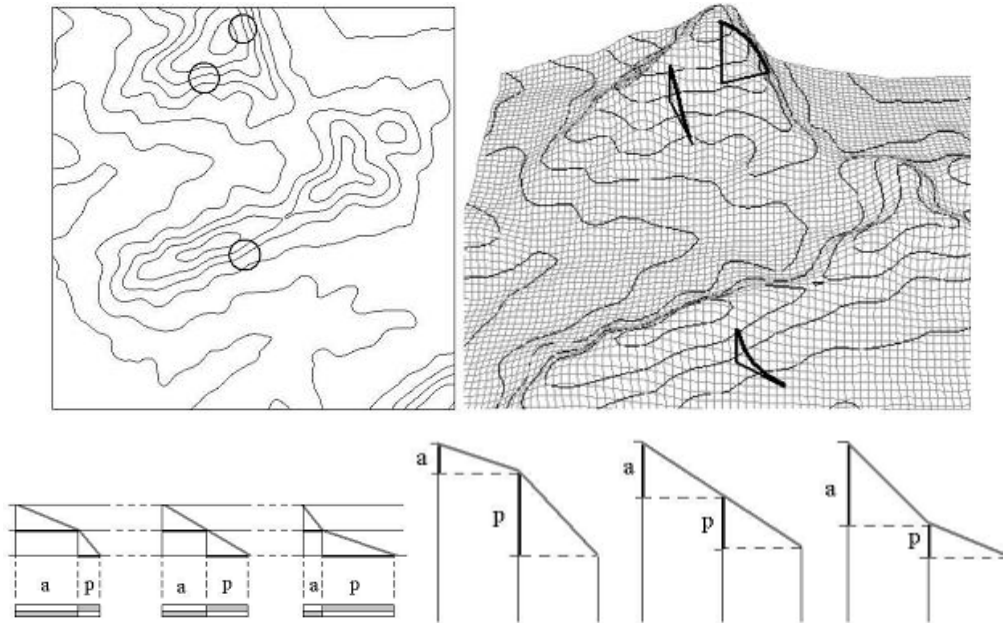
Figura 6 – Orientação de vertentes em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).



Fonte: Valeriano (2008).

A curvatura vertical (Figura 7) expressa o formato da vertente quando observada de perfil. É a variação da declividade ao longo de uma determinada distância, ou seja, refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em perfil e é expressa em diferença de ângulo dividida por distância horizontal.

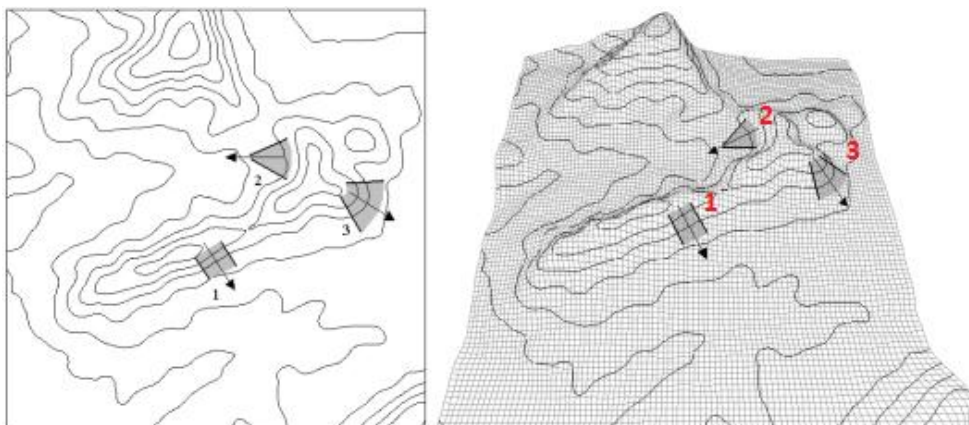
Figura 7 – Curvatura vertical em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).



Fonte: Valeriano (2008).

Por sua vez, a curvatura horizontal (Figura 8) expressa o formato da vertente quando observada em projeção horizontal. Em analogia, à relação entre a curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal pode ser descrita como a variação da orientação de vertentes ao longo de uma determinada distância, ou seja, refere-se ao caráter de divergência ou convergência das linhas de fluxo (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010).

Figura 8 – Curvatura horizontal em isolinhas (esq.) e em MDE (dir.).



Fonte: Valeriano (2008).

A determinação de feições de drenagem oferecida em módulos funcionais de SIG é baseada no cálculo da área de captação – ou fluxo acumulado - que, quando atinge valores acima de níveis críticos (limiares), indica canais de drenagem. O único condicionante

permitido ao usuário, mediante um processo de interação empírica, é o estabelecimento do limiar de fluxo acumulado acima do qual se caracteriza a drenagem. Tais metodologias têm como pressuposto a uniformidade do regime hídrico no sistema solo-atmosfera, que permitiria estabelecer a uma relação entre área de captação, volume infiltrado, volume escoado e, portanto, a possibilidade de fluxo canalizado.

Essas variáveis, segundo Valeriano (2008), devido a sua natureza local podem ser calculadas em ambiente de SIG e apresenta qualidade relativamente aceitável tal como ganhos operacionais absolutos, sobretudo de velocidade e padronização. Dessa forma, o TOPODATA possibilita uma série de desenvolvimentos em busca de metodologias e algoritmos de derivação geomorfométrica, e tem como resultado a geração de um extenso banco de dados estruturado na forma de planos de informação, em cobertura nacional, para livre uso pela comunidade científica.

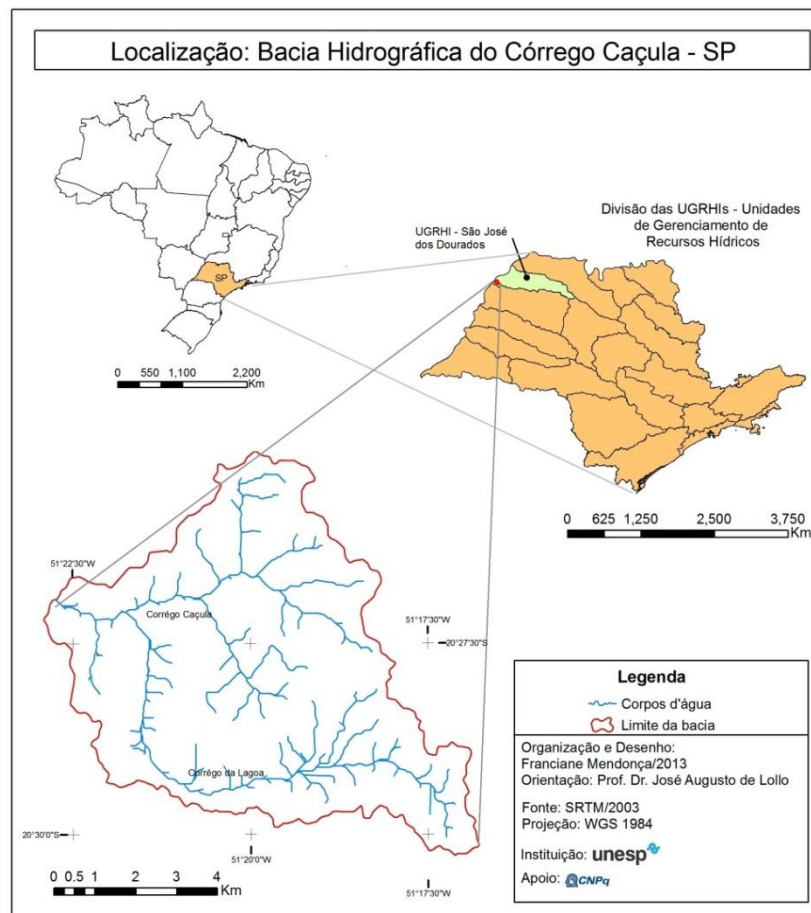
4 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CAÇULA

4.1 Localização da bacia hidrográfica

A Bacia Hidrográfica do Córrego Caçula situa-se no município de Ilha Solteira/SP que pertence a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 18 – São José dos Dourados, na região noroeste do Estado de São Paulo (Figura 9). A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 18, possui área territorial de 6.783,2 km² (IPT/2004), abrangendo a área de 41 municípios, sendo 25 com sede na UGRHI, e 16 com sede em outras UGRHIs (SIGRH, 2012).

O município de Ilha Solteira localiza-se entre os meridianos 51°00' e 51°30'W e os paralelos 20°15' e 20°45'S e apresenta uma população de 25.064 habitantes, sendo 23.520 na área urbana e uma área de unidade territorial de 656,225 km² (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2012).

Figura 9 – Localização da área de estudo



Fonte: Dados do próprio autor.

O crescimento populacional e a expansão da ocupação urbano no município exigiram investimentos em infraestrutura para atender a população o que potencializou a degradação do solo previamente iniciada com as atividades pecuárias.

Tavares (2008) caracterizou o uso do solo no município como predominantemente pecuária (quase 87% da área do município). No entanto, a expansão da indústria sucroalcooleira em parte do município, com plantio de cana-de-açúcar na área da bacia criou novas condições de dinâmica hídrica na área que carecem estudos detalhados.

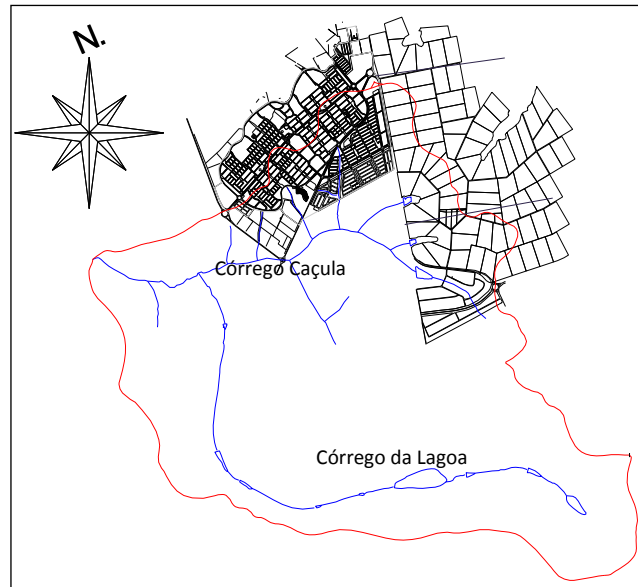
De acordo com Cruz (2008), os córregos encontram-se praticamente desprovidos de mata ciliar, e a cobertura principal do solo é representada pelos campos antrópicos (pastagens) e agricultura.

O Córrego Caçula, objeto de estudo desta pesquisa, possui como um de seus afluentes um importante corpo d'água urbano que recebe a drenagem fluvial do município, o Córrego Sem Nome. Gonzaga et al. (2010) constatou problemas com a qualidade de água do recurso, fortemente influenciada pelo uso e ocupação do solo, com indícios de ligações clandestinas de esgoto doméstico, escoamento superficial urbano, e fluxos provenientes da rede de drenagem urbana, além da ausência quase que total de mata ciliar nas Áreas de Preservação Permanente (APP) o que contribui diretamente com a degradação da qualidade de água do Córrego Caçula que tende a piorar nos próximos anos com o aumento da população.

Atualmente, a Prefeitura Municipal de Ilha Solteira apresenta iniciativas com intuito de melhorar a qualidade ambiental desta bacia hidrográfica como: Projeto de captação de água fluvial e controle de erosão do município; Desenvolvimento do Programa Estadual de Microbacia Hidrográfica, que vislumbra o acompanhamento de duas microbacias (Microbacia do Cinturão Verde e a Microbacia do Córrego Caçula); Projeto de controle de voçoroca na Microbacia do Córrego Caçula além do projeto de financiamento pelo Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO de terraceamento e recomposição da mata ciliar.

A localização da bacia em relação à área urbana e área de expansão urbana de Ilha Solteira também cria uma situação crítica, pois parte significativa da área da bacia se situa em área urbana ou de expansão urbana (Figura 10).

Figura 10 – Posição da Bacia do Caçula em relação á área urbana de Ilha Solteira



Fonte: Prefeitura Municipal de Ilha Solteira (2012).

É possível observar que a ocupação da terra na área de estudo possui parte da população localizada próximo as nascentes dos cursos d'água, em decorrência da expansão urbana.

4.2 Caracterização socioeconômica

De acordo com Santos (2004), os dados brasileiros socioeconômicos, censitários, de infraestrutura e estatísticos estão disponíveis por município, que frequentemente não obedecem aos limites de bacias hidrográficas, desta forma para caracterização socioeconômica da bacia hidrográfica do Córrego Caçula faz-se necessária apenas a abordagem do município de Ilha Solteira, onde a bacia hidrográfica encontra-se totalmente inserida.

Em relação às atividades econômicas, estas, baseiam-se em agropecuária, indústria e serviço. Segundo IBGE (2012), o Produto Interno Bruto - PIB de cada atividade é de, respectivamente, R\$ 27.952,00, R\$1.011.355,00 e R\$ 241.542,00, o que define as atividades em sua maioria como indústrias, seguido por serviços, e minoria agropecuária.

Os sistemas de saúde do município são em sua maioria privados representados por 58,3% equivalente a 7 estabelecimentos. Já os estabelecimentos de saúde municipais tem representatividade de 41,7% equivalente a 5 estabelecimentos.

Analogamente, a respeito dos dados de saneamento básico do municípios, de acordo com o Banco de Dados do Sistema Único de Saúde – Datasus as informações referentes ao abastecimento da água, interações sanitárias e coleta de lixo relatam que no ano de 2000, o número de moradores atendidos foi de 23.888, correspondente a quase totalidade da população de Ilha Solteira, que de acordo com censo demográfico 2010 do IBGE era de 25.064 habitantes.

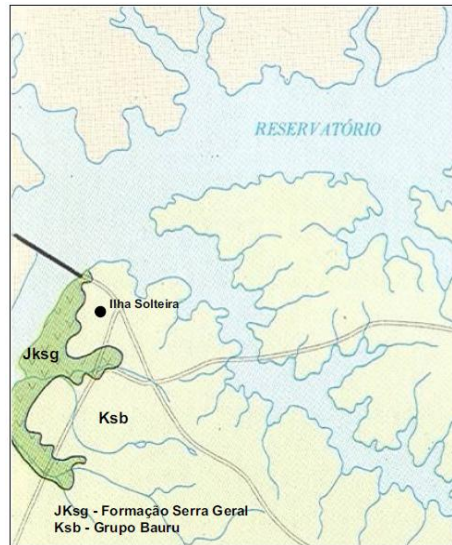
4.3 Caracterização do meio físico

A caracterização do meio físico da bacia hidrográfica do Córrego Caçula permitirá o conhecimento das características naturais da área de pesquisa, através de informações sobre a geologia, pedologia, relevo, clima, vegetação e hidrografia da bacia hidrográfica, bem como dados sobre o clima, vegetação e hidrografia local.

4.3.1 Geologia

De acordo com a Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (1981 apud Cruz, 2008), o perfil geológico da região é representado principalmente por rochas sedimentares do Grupo Bauru, Formação Santo Anastácio, que ocorre em áreas que acompanham as cotas mais baixas dos vales dos rios afluentes do Paraná, e é composta por arenitos de granulação de fina a média. O autor ainda ressalta que nos fundos de vale mais aprofundados observam-se afloramentos de basaltos da Formação Serra Geral, a qual apresenta ainda arenitos intercalados aos derrames. A Figura 11 representa as unidades geológicas presentes na área urbana de Ilha Solteira e seu entorno na escala 1:500.000.

Figura 11 – Unidades geológicas presentes na área urbana de Ilha Solteira e seu entorno



Fonte: Cruz (2008).

4.3.2 Pedologia

De acordo com Lollo (1999) a principal característica dos solos do município de Ilha Solteira é o alto teor de areia em relação às demais frações do solo. As litologias fonte são os basaltos e, principalmente, os arenitos. Os tipos de solos mais comuns são Latossolos Vermelho-escuros, Latossolos Vermelho-amarelos e Podzólicos Vermelho-amarelos.

Os tipos de solo da área, assim, podem ser relacionados a seguir a partir dos estudos de Cruz (2008) e Tavares (2008) apud CINDIRU (1995):

Solos hidromórficos (Hi) – Sua localização está relacionada às condições da rede hidrográfica, ocupando as planícies de inundação dos principais escoadouros e seus tributários, a maior parte ocupando terrenos com declividade entre 0% e 2%. Têm como principais características fertilidade natural média ou alta, presença constante de água e possibilidade de inundações.

Latossolo roxo (LR) - Localiza-se sobre os basaltos que apresentam pequenas exposições junto aos fundos de vale mais aprofundados e a maior parte situa-se em áreas com declividade entre 2% e 5%. Tem como características fertilidade natural alta, fraca propensão aos processos erosivos, pouco permeável e profundo.

Latossolo vermelho escuro (LE) – Localiza-se sobre rochas areníticas e a maior parte se encontra em áreas de declividade entre 2% e 5%. Caracteriza-se por sua baixa fertilidade natural, geralmente ácido, forte propensão à erosão e alta permeabilidade.

Solos Podzólico Lins (LP) e Podzólico Marília (LM) - Constituem-se em solos com alto potencial agrícola, mas que requerem uso e manejo que garantam a conservação do solo, impedindo a sua degradação pela erosão ou empobrecimento. São originados a partir das rochas areníticas do Grupo Bauru e não apresentaram porções significativas de áreas inundadas. Tem como características boa fertilidade, mas com altos riscos de erosão devido à textura dos horizontes superficiais e condições topográficas associadas.

4.3.3 Relevô

O relevô da área, de uma forma geral, pode ser descrito com ondulado a suavemente ondulado, pouco dissecado, composto por colinas amplas e médias com baixa declividade e vales amplos (LOLLO, 1999).

A partir de fotografias aéreas da área do município Lollo (1999) identificou dois sistemas de terreno denominados A e B. O sistema A é composto pelas unidades de terreno A.1 e A.2 e o B é composto por três unidades de terreno: B.1, B.2 e B.3. Dentre as cinco unidades identificadas, a B.2 não ocorre na área de estudo.

Na área de expansão urbana o levantamento foi detalhado até o nível elemento de terreno proporcionando um total de dez elementos de terreno sendo três deles pertencentes à unidade A.1 (A.1.1, A.1.2 e A.1.3), dois pertencentes a unidade A.2 (A.2.1 e A.2.2), três pertencentes à unidade B.1 (B.1.1, B.1.2 e B.1.3) e dois pertencentes à unidade B.3 (B.3.1 e B.3.2) descritos na tabela 8.

O sistema A, apresenta colinas médias suaves onduladas, com encostas convexas e média frequência de canais associadas a vales pequenos e profundos com encostas convexas, com alta frequência de canais e presença de ravinas e o sistema B vales amplos e médios, pouco profundos com encostas retilíneas a côncavas, e frequência de canais alta a média.

A partir da tabela 8, é possível visualizar a distribuição das formas de relevô na área urbana e de expansão urbana e a descrição dos elementos de terreno com o tipo de perfil de alteração de solo associado a cada um deles.

Tabela 8 – Descrição dos elementos de terreno com respectivo perfil de alteração de solo

Elemento	Descrição	Perfil de solo
A.1.1	Porção superior das encostas, formas convexas pouco íngremes.	Espessuras de até 7 m
A.1.2	Porção inferior das encostas, formas retilíneas a côncavas, bastante íngremes.	Espessura entre 2 e 5 m
A.1.3	Fundo dos vales, forma retilínea.	Espessura < 2 m
A.2.1	Metade superior e topo das colinas, formas convexas e topo relativamente aplainado.	Espessura > 20 m
A.2.2	Porção inferior das colinas, formas convexas.	Espessura raramente superior a 10m
B.1.1	Planícies aluviais recentes e depósitos aluviais em canais abandonados.	Espessura ≤ 5 m
B.1.2	Terraços aluviais em porções superiores de encostas (perfil convexo).	Espessura ≤ 10 m
B.1.3	Vales amplos com encostas côncavas, bastante dissecadas.	Espessura < 2 m
B.3.1	Metade inferior das encostas, formas côncavas íngremes tendendo a retilíneas.	Espessura de 5 a 6 m
B.3.2	Metade superior das encostas, formas convexas tendendo a côncavas pouco íngremes.	Espessura ≤ 10 m

Fonte: Cruz (2008).

4.3.4 Clima

Conforme a classificação de Köppen, o clima é do tipo Aw - Clima tropical e muito úmido até sub-tropical sub-úmido, Aw até Cwa, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (CINDIRU, 1995).

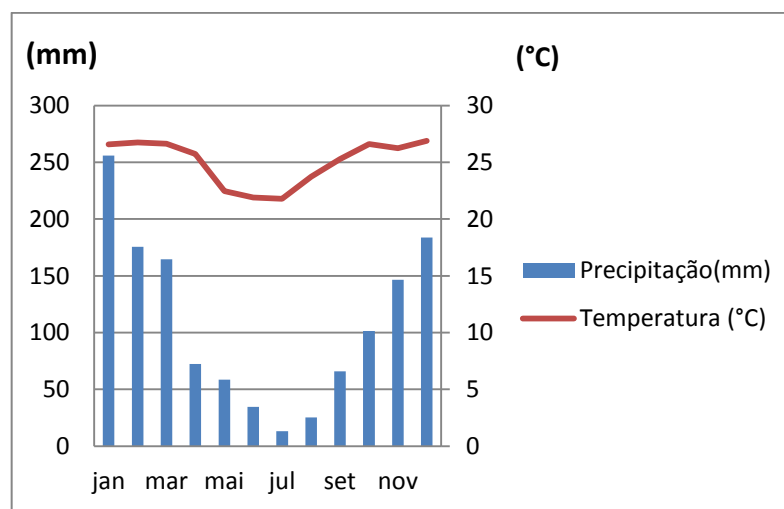
Ainda segundo CINDIRU (1995) o regime climático é controlado por quatro massas de ar: massa equatorial continental quente, massa tropical continental quente e seca, massa tropical atlântica e massa de ar polar.

A precipitação pluviométrica varia entre 1.100 e 1.300 mm diminuindo para oeste. A estação seca ocorre entre os meses de maio e setembro/outubro com 300 mm. A estação seca prolongada constitui um dos fatores limitantes aos cultivos nesta região (CINDIRU, 1995).

Em se tratando de temperatura o mês mais quente é o de janeiro, com temperatura média de 24°C a 25°C e média máxima de 30°C - 32°C. O mês mais frio é julho com temperaturas médias de 18°C a 20°C e médias mínimas de 11°C a 14°C (CINDIRU, 1995).

A partir da elaboração do gráfico representado pela Figura 12, pelo qual é apresentada uma série histórica das médias mensais de precipitação e temperatura de 20 anos (1992 a 2012), pode-se verificar que o clima do município Ilha Solteira e conseqüentemente da bacia hidrográfica do Córrego Caçula é predominante de chuvas entre outubro e março, já o período seco concentra-se entre junho e agosto. A temperatura segue o regime pluviométrico, sendo o período seco de baixas temperaturas, e maiores temperaturas com a predominância de chuvas.

Figura 12 – Gráfico com as médias mensais de temperatura e precipitação do período de 1992 a 2012



Fonte: Dados do próprio autor.

4.3.5 *Vegetação e Hidrografia*

A vegetação natural, segundo CINDIRU (1995), é composta pelas formações de floresta tropical latifoliada semi-decídua e cerrado/cerradão, sendo que grande parte dessa cobertura foi eliminada durante a ocupação da área. Atualmente a cobertura principal do solo é representada por pastagens e agricultura e os corpos d'água da região encontram-se praticamente desprovidos de mata ciliar.

O município de Ilha Solteira encontra-se entre os rios Paraná, Tietê e o Rio São José dos Dourados que está ao centro do município. A área de estudo está inserida no aquífero denominado: Aquífero Bauru-Caiuá. Tal aquífero tem como características ser poroso, livre a semiconfinado (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004).

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a caracterização do meio físico da Bacia hidrográfica do Córrego Caçula e processos de degradação associados é baseada em Pejon e Zuquette (1993), na utilização de ferramentas do ArcHydro, no método Soil Conservation Service – SCS e em Soares et al. (2012) para geração das cartas de escoamento superficial e infiltração potencial.

Tais metodologias foram empregadas para discussão da eficiência das abordagens com propósito de avaliar o potencial de ocorrência de processos de degradação (erosão e assoreamento) na área de estudo.

Os levantamentos das condições naturais visando subsidiar o planejamento territorial às vezes carecem de informações confiáveis acerca das condições do meio físico e do comportamento dos materiais presentes. A alternativa proposta nessa metodologia é utilizar dados digitais do projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008; VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010) como alternativa de representação das condições do relevo.

Os dados SRTM foram originalmente disponibilizados com o elipsoide de referência WGS 1984, estes dados foram projetados para o sistema de projeção UTM, datum Córrego Alegre, para compatibilização com outros dados do banco de dados.

As cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial foram elaboradas com os atributos do relevo obtidos do Topodata, e os demais atributos do meio físico, disponíveis de trabalhos anteriores, para a área (CINDIRU, 1995; LOLLO, 1998).

Foi elaborada ainda, a caracterização do uso e ocupação da terra da área de estudo dos anos de 2001 e 2009 com o objetivo de identificar, através da geração das cartas quais usos dados à bacia hidrográfica e suas influencias nos processos de degradação ao longo do tempo.

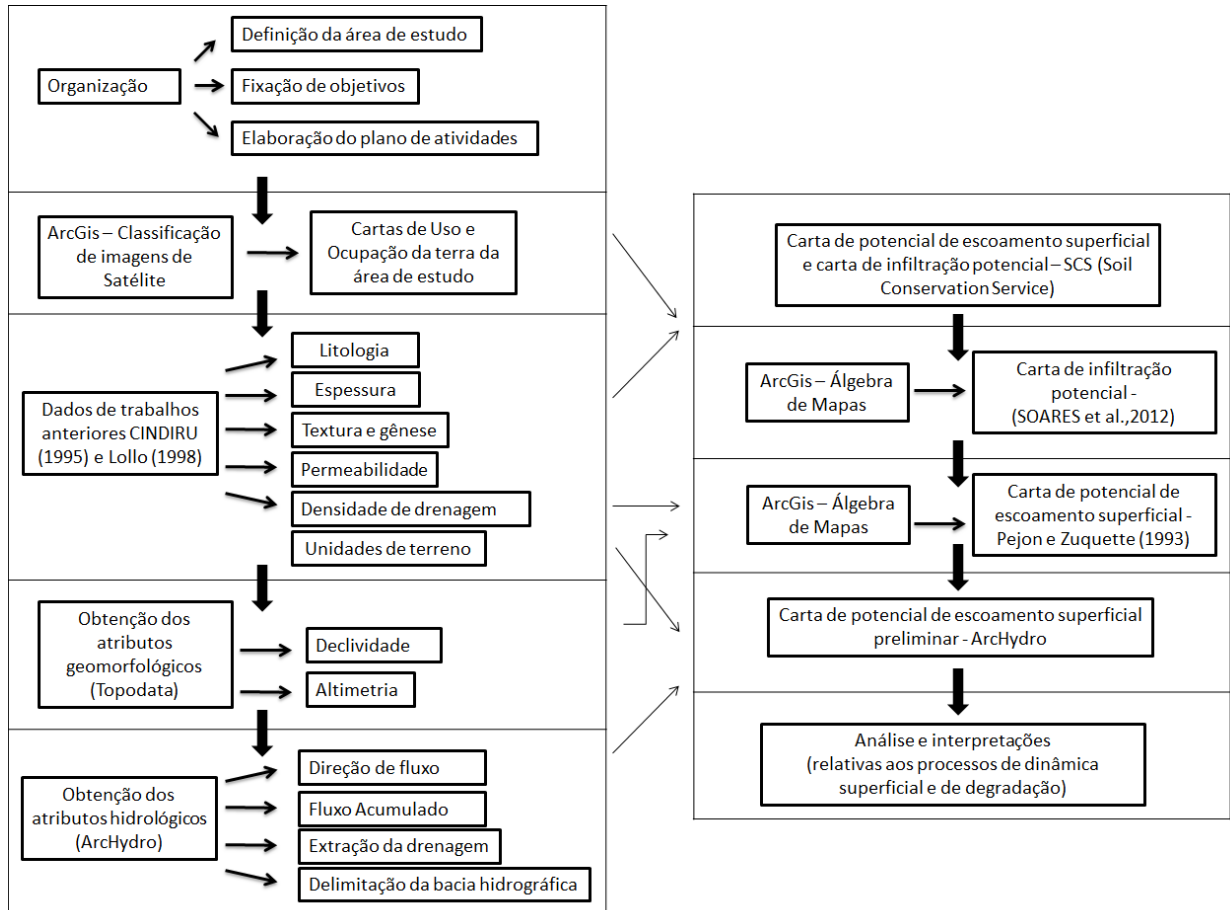
Pode-se organizar, assim, um banco de dados digital desta bacia hidrográfica, que permite facilitar a elaboração dos documentos propostos, bem como tornar mais ágil sua integração e comparação com outros documentos.

Os resultados obtidos na caracterização do meio físico, com base no uso das técnicas digitais, foram confrontados com trabalhos anteriores de caracterização do meio físico que incluem em sua abrangência da Bacia do Córrego Caçula, dentre estes podem ser destacados (CINDIRU,1995; LOLLO,1998).

A elaboração da carta de suscetibilidade a erosão e carta de limitações para uso e ocupação a partir dos dados relacionados anteriormente, permitiu análises e interpretações relativas aos processos de dinâmica superficial e degradação e assim possibilitou diagnosticar áreas com restrições de uso e áreas com características mais favoráveis para ocupação.

As etapas realizadas podem ser sintetizadas conforme a Figura 11. A seguir serão ilustradas as formas de obtenção dos atributos do meio físico inerentes deste processo.

Figura 13 – Metodologia proposta para a pesquisa



Fonte: Dados do próprio autor.

5.1 Topodata – atributos geomorfológicos

As informações sobre os atributos geomorfológicos foram obtidas do Projeto Topodata – INPE, que disponibiliza dados geomorfométricos locais derivados de dados SRTM para todo o território nacional (VALERIANO, 2008). Foram utilizadas, nesse estudo, as variáveis geomorfométricas declividade e altimetria.

A partir da variável altimetria (derivação de ordem zero), com derivações em torno de cada ponto analisado operadas através de janelas móveis, o TOPODATA pode fornecer a declividade e a orientação de vertentes (derivadas de 1ª ordem) e as curvaturas vertical e horizontal (derivadas de 2ª ordem) como principais variáveis geomorfométricas locais.

Em relação à declividade, a partir dessas informações no Software ArcGis 10.0 é possível realizar a operação de recorte da área de estudo e reclassificação, atribuindo as classes de declividade (em porcentagem) que melhor se adaptem a área de estudo.

5.2 ArcHydro – atributos hidrológicos

Para a caracterização preliminar do escoamento superficial foi utilizada uma aplicação informática que opera como módulo do Software ArcMap (ESRI, 2010), designada ArcHydro (ESRI, 2009; disponível em <http://support.esri.com>).

As ferramentas do ArcHydro são utilizadas para derivar diversos dados que coletivamente descrevem a drenagem de uma bacia hidrográfica. A análise dos rasters é realizada para determinar entre outros atributos, a direção de fluxo, fluxo acumulado, definição da drenagem, segmentação da drenagem e delimitação de bacias. Desta maneira, a utilidade das ferramentas do ArcHydro se justifica pelo desenvolvimento de atributos que podem ser úteis na modelagem hidrológica. O ArcHydro permite ainda obter os dados geométricos necessários sobre as bacias hidrográficas tal como a área, comprimento e declive do curso de água principal.

Foi realizado o processamento do terreno para identificar a superfície de drenagem pelo Modelo Digital de Elevação (MDE). Após o processamento do MDE, seus derivados podem ser utilizados para delinear de forma eficiente a bacia hidrográfica, para geração da rede de drenagem e para a obtenção dos atributos.

Assim, pode-se obter a direção de fluxo, fluxo acumulado, delimitação da bacia hidrográfica e extração da rede de drenagem. A seguir será explanado o procedimento para determinação desses atributos obtidos a partir dos estudos de Czekanski e McKinney (2006) adaptado por (COLLISCHONN et al., 2009).

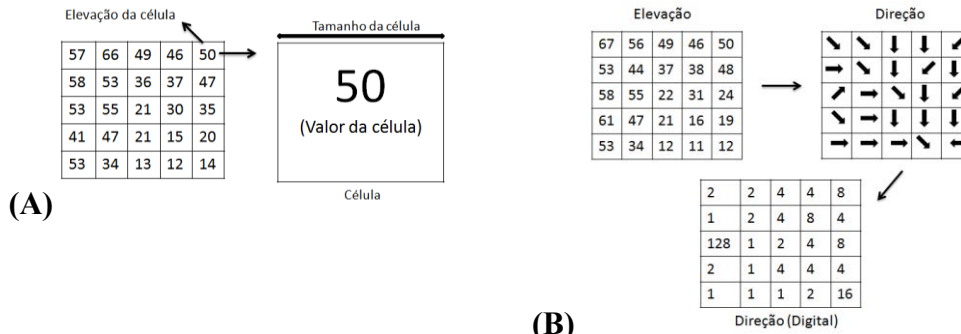
5.2.1 Direção do Fluxo

Um MDE é uma representação digital composta por uma matriz de pixels com coordenadas planimétricas (x,y) e com um valor de intensidade do pixel que corresponde à elevação. O esquema de um MDE pode ser visualizado na Figura 14(A).

Para definição da direção do fluxo da área de estudo, primeiramente foram retirados os possíveis sinks (Fill Sinks) do MDE obtido a partir dos dados SRTM. Estes consistem em

áreas com depressões rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, que podem ser imperfeições no MDE.

Figura 14 – (A) Esquema de um MDE; Figura 14: (B) Grade com as direções de fluxo



Fonte: Czekanski e McKinney (2006).

O próximo passo foi definir a direção de fluxo (Flow Direction), conferindo o sentido do escoamento para a célula vizinha que apresente a maior diferença de elevação do terreno, em relação à célula em questão, dividida pela distância entre elas. O método utilizado para esta definição é intitulado *Eighth Direction Pour Point Model – D8*, pois se assume que a água flui de uma das células para uma das 8 células adjacentes. De modo que a cada célula é determinado um valor de acordo com a regra do caminho mais íngreme. Através deste modelo, uma grade digital com as direções de fluxo (Figura 14(B)) pode ser construída onde o valor de cada pixel representa a direção do escoamento de água.

5.2.2 Fluxo acumulado

A definição do fluxo acumulado (Flow Accumulation), obtido a partir da direção de fluxo, representa uma área de afluência contada em termos de números de células do MDE. A função denominada *Terrain Preprocessing/Flow Accumulation* realiza este procedimento onde computa o fluxo acumulado em uma grade que contém o número de células que drenam para cada célula do MDE de entrada.

Deste modo, ao final do processamento são obtidos valores de fluxo acumulado para cada célula. Células com valores maiores representam uma alta concentração de fluxo acumulado, possibilitando identificar os canais de drenagem.

5.2.3 Extração da rede de drenagem e delimitação da bacia hidrográfica

Para extração automatizada da rede de drenagem a partir do MDE, o primeiro passo é a determinação da direção de fluxo (item 5.4.1) e em seguida determinar o fluxo acumulado (item 5.4.2).

A rede de drenagem é definida pela escolha de um limiar aplicado no fluxo acumulado, sendo que esse limiar classifica todas as células do mapa de acumulação de fluxo em zero (menor que o limiar) ou 1 (maior que o limiar). Para tanto, é necessário determinar o limiar adequado, ou seja, a partir de qual valor as células do fluxo acumulado são consideradas parte da rede de drenagem. Com o limiar estabelecido, a rede de drenagem pode ser definida pela função denominada *Stream Networks*.

A delimitação da bacia hidrográfica é realizada após a conclusão das etapas elencadas anteriormente, e utiliza a função intitulada *Watershed Processing/Bacth Subwatershed Delineation*. O usuário necessita determinar manualmente um ponto na rede de drenagem que será o exutório da bacia para que, a partir deste ponto, a bacia seja delimitada.

5.3 Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)

A carta do potencial de escoamento superficial apresenta uma graduação das áreas com maior ou menor potencial ao escoamento superficial.

O princípio da coleta de dados para o mapeamento dos atributos está baseado na utilização dos atributos do relevo obtidos do Topodata bem como da elaboração de um banco de dados em Sistema de Informações Geográficas, formado com dados e informações adquiridas de pesquisas anteriores (CINDIRU, 1995; LOLLO, 1998) realizadas na mesma área de estudo, transformadas em atributos do meio físico para o mapeamento dos atributos e finalmente as cartas de potencial de escoamento superficial.

Para a elaboração da carta de potencial de escoamento superficial foi utilizada a metodologia de Pejon e Zuquette (1993), que baseada no método de Cook para vazões máximas de escoamento superficial, atribui pesos aos atributos considerados, tanto maiores quanto maior for a influência no processo de escoamento superficial. Em seu estudo, o autor considerou os seguintes atributos: classes de declividade; substrato rochoso (litologia); materiais inconsolidados (textura, gênese, espessura e permeabilidade), densidade de drenagem e feições favoráveis ao armazenamento superficial.

A tabela 9 mostra o resultado da graduação dos atributos para a área estudada pelos autores, já a tabela 10, mostra a tabela adaptada para a área de estudo, com a definição dos atributos e suas respectivas classes.

Com base no método de Cook, e nas características da região estudada, Pejon e Zuquette (1993) propõe a seguinte sequência para a elaboração da tabela:

1. Analisar a variação de cada atributo na área de estudo.
2. Para cada atributo, de acordo com a sua variação, estabelecer classes que tenham comportamento semelhante quanto ao escoamento superficial.
3. Considerando ainda cada atributo isoladamente, dispor as classes em ordem crescente quanto ao seu potencial e escoamento superficial.
4. Analisar o conjunto obtido pela associação das classes de menor potencial ao escoamento de cada atributo. Em seguida, atribuir uma pontuação a cada uma dessas classes, tanto maior quanto menor a importância de cada atributo em relação aos demais, nessa situação de mínimo potencial do escoamento da região.
5. Verificar qual atributo que apresenta maior número de classes de escoamento, e a partir da pontuação mínima, estabelecer o número de pontos das demais classes desse atributo. Deve-se conceder maior número de pontos de acordo com o aumento da influência no processo de escoamento com a variação do atributo considerado. Por exemplo, as classes de declividade elevada devem receber pontuação maior do que as de baixa declividade.
6. Analisar o conjunto que define a condição de maior potencial de escoamento superficial na área, representado pela associação de todas as classes de maior potencial estabelecidas no item 3, para cada atributo. A partir do número de pontos da classe de maior potencial de escoamento do atributo, atribuir os pontos às classes dos demais atributos, de maneira a refletir a importância de cada um nesta situação de alto potencial de escoamento superficial.
7. Estabelecida a pontuação mínima e máxima para cada atributo, proceder à atribuição de pontos para as classes intermediárias, considerando novamente a influência que a variação do atributo ocasiona no processo de escoamento superficial.

Tabela 9 – Pontuação dos atributos do meio físico para elaboração da carta de potencial de escoamento superficial de Pejon e Zuquette (1993)

Classes de escoamento	←←←←Potencial de escoamento aumenta									
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Atributos	272-250	249 - 230	229-210	209-190	189-170	169-150	149 - 130	129 - 110	109-90	89-70
Declividade	>45%		30 a 45%	20 a 30%	15 a 20%	10 a 15%	5 a 10 %	2 a 5%		0 a 2%
	90		75	66	60	45	36	24		15
Litologia	Argilitos/siltitos/folhetos formações Irati e Corumbataí		Argilitos/siltitos Formação Itararé Magmáticos básicos Formação Serra Geral		Arenitos/siltitos arenosos/diamictitos Formações Itararé e Tatuí		Arenitos Formações Itaqueri e Itararé		Arenitos Formações Pirambóias e Botucatu	
	40		30		20		16		10	
Materiais inconsolidados	Textura e gênese	Silto-argiloso residual		Argiloso-siltoso residual		Argiloso-poroso retrabalhado		Arenoso (<30% finos) res. e retrab.		Arenoso (<20% finos) res. e retrab.
		40		30		20		14		10
	Espessura (m)	<0,5		0,5 a 3,0				3,0 a 5,0		>5,0
		30		20				16		10
	Permeabilidade (m/s)	<10 ⁻⁷		10 ⁻⁷			10 ⁻⁶	10 ⁻⁵		>10 ⁻⁴
		12		8			7	6		5
Densidade de drenagem (canais/km)	Mais que 5		Entre 5 e 2				<2			
	3		20				10			
Feições favoráveis ao armazenamento superficial	Não apresenta		Lagoas, pequenas depressões (pequena quantidade)				Lagoas, pequenas depressões (grande quantidade)			
	30		20				10			

Fonte: Pejon e Zuquette (1993).

Tabela 10 – Pontuação dos atributos do meio físico para elaboração da carta de potencial de escoamento superficial adaptada para área de estudo

	Classes de escoamento	←←←←Potencial de escoamento aumenta									
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	Atributos	197-202	184-196	171-183	158-170	145-157	132-144	119-131	106-118	93-105	80-92
	Declividade	>45%		30 a 45%	20 a 30%	15 a 20%	10 a 15%	5 a 10%	2 a 5%		0 a 2%
		90		75	66	60	45	36	24		15
	Litologia	Basalto				Arenito formação Santo Anastácio					
		40				30					
	Textura e gênese	LV – Latossolo Vermelho				PVA – Argissolo Vermelho Amarelo					
		40				20					
Materiais inconsolidados	Espessura (m)	<0,5		0,5 a 3,0				3,0 a 5,0		>5,0	
		30		20				16		10	
	Permeabilidade (m/s)	<10-7		10-7		10-6		10-5 - LV		>10-4 – PVA	
		12		8		7		6		5	
	Densidade de drenagem (canais/km)	Mais que 5		Entre 5 e 2 - Basalto				<2 – Arenito			
		3		20				10			
	Feições favoráveis ao armazenamento superficial	Não apresenta		Lagoas, pequenas depressões (pequena quantidade)				Lagoas, pequenas depressões (grande quantidade)			
		30		20				10			

Fonte: Pejon e Zuquette (1993).

A carta de potencial de escoamento superficial foi elaborada pela integração das cartas de declividade; substrato rochoso (litologia); materiais inconsolidados (textura, gênese, espessura e permeabilidade) e densidade de drenagem.

Inicialmente foi necessária a atribuição de pesos para cada classe dos mapas, esses pesos representam o potencial de escoamento superficial, os valores definidos pertencem ao intervalo de [1 a 10], sendo um (1) dado a classes com baixo potencial ao escoamento superficial e 10 para classes com alto potencial ao escoamento superficial, os valores entre um (1) e 10 representam graus, de potencial ao escoamento superficial, intermediários.

A atribuição dos pesos de potencial de escoamento superficial para cada atributo e para cada classe dos atributos pode ser visualizada a partir da tabela 11:

Tabela 11 – Atribuição de pesos de potencial de escoamento para os atributos e classes

Atributo	Peso dos atributos	Valor do escoamento para cada classe					
		0-2%	2-5%	5-10%	10-15%	15-20%	20-30%
Declividade	0,32						
		1	3	4	5	6	7
Litologia	0,20	Arenito	Basalto				
		6	10				
Textura e gênese	0,20	PVA	LV				
		6	10				
Espessura (m)	0,15	>0,5	3-5	0,5-3	<0,5		
		2	4	8	10		
Permeabilidade (m/s)	0,03	>10-4	>10-5				
		2	4				
Densidade de drenagem (canais/km)	0,10	<2	2-5				
		4	8				

Fonte: Dados do próprio autor.

Desta forma, a partir desta ponderação, no Software ArcGis 10.0 foi possível elaborar a álgebra de mapas através da função *Spatial Analyst Tools -> Map Algebra -> Raster Calculator*.

5.4 Cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial (Soil Conservation Service – SCS)

O mapa de escoamento superficial baseado na metodologia curva-número elaborado pelo USDA-SCS (1972) permite a partir do parâmetro CN (curve number – número de curva

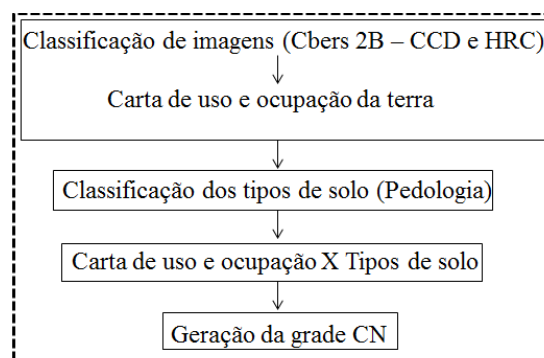
de escoamento) identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial com base no uso e ocupação da terra e nos tipos de solo existentes na área.

O parâmetro (CN) varia desde uma cobertura muito permeável (valor = 0) até uma cobertura completamente impermeável (valor = 100). Para a determinação do (CN), foram utilizadas técnicas de geoprocessamento que permitiram o cruzamento das informações de uso e ocupação da terra e pedologia, baseado nas tabelas 5 e 6 com valores de CN para áreas urbanas e rurais.

A classificação dos tipos de solo obedeceu aos critérios estabelecidos na figura 1, em que, de acordo com o tipo de solo e condições de uso, os tipos de solo são divididos em grupos hidrológicos. Desta forma primeiramente foram elaboradas as cartas com as informações referentes ao uso e ocupação do solo e pedologia no Software ArcGis 10.0.

A Figura 15 apresenta a sequência de processos para obtenção do CN.

Figura 15 – Sequência de processos para obtenção do CN



Fonte: Dados do próprio autor.

O próximo passo foi a obtenção do parâmetro S, que representa a capacidade máxima de armazenamento no solo (mm), e pode ser obtido a partir dos valores de CN aplicando a equação 6.

Para determinar o escoamento superficial (equação 5) foi necessário determinar a precipitação média mensal da bacia hidrográfica a partir dos dados obtidos da estação meteorológica da UNESP – Ilha Solteira. O gráfico representado pela figura 12 (página 56) apresenta as médias mensais de temperatura e precipitação em uma série histórica de 20 anos.

Os meses mais chuvosos compreendem outubro a março, e o cálculo da média desses valores de precipitação permitiu determinar a precipitação a ser utilizada para o cálculo do escoamento superficial e potencial de infiltração, ou seja, 171 mm/mês.

A carta de potencial de infiltração apresenta as regiões onde há predomínio ou não de infiltração com graduação de cores que permita esta visualização, para determinação dos valores de infiltração, foram utilizados os valores obtidos do escoamento superficial bem como a média mensal de precipitação que permitiram aplicar a equação 7 representada a seguir.

$$I = P - E \quad (7)$$

Onde: I = Infiltração (mm/mês); P = Média de precipitação mensal (mm/mês), e; E = Escoamento superficial (mm/mês)

Os dados foram manipulados no Software ArcGis 10.0, tal como os cálculos inerentes deste processo. A tabela 12 apresenta os valores de CN para a área de estudo, obtidos a partir da figura 1 e tabelas 5 e 6. Também são representados os valores de S e por fim os valores do escoamento superficial e potencial de infiltração, necessários para espacialização em cartas.

Tabela 12 – Valores de CN para bacia hidrográfica do Córrego Caçula

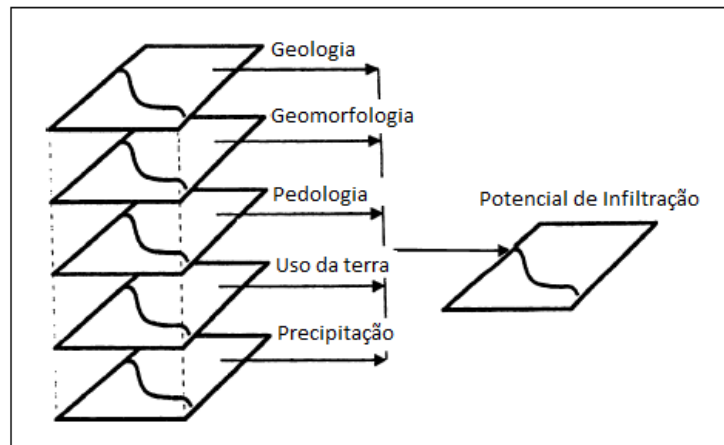
Classe	CN		S (mm/mês)		Escoamento superficial (mm/mês)		Infiltração (mm/mês)	
	Grupo B - PVA	Grupo C - LV	Grupo B - PVA	Grupo C - LV	Grupo B - PVA	Grupo C - LV	Grupo B - PVA	Grupo C - LV
Agricultura	76	84	76	52	104,72	121,32	66,28	49,68
Água	100	100	0	0	171	171	0	0
Asfalto	98	98	5	5	165,14	165,14	5,86	5,86
Mata e vegetação natural	68	78	119	72	81,4	107,28	89,6	63,72
Pastagem	67	75	125	60	78,66	115,44	92,34	55,56
Preparo para o plantio e solo exposto	67	81	63	38	113,33	132,57	57,67	38,43
Telhado	98	98	5	5	165,14	165,14	5,86	5,86

Fonte: Dados do próprio autor.

5.5 Carta de potencial de infiltração (SOARES et al., 2012)

A metodologia proposta por Soares et al. (2012) para elaboração da carta de potencial de infiltração baseia-se no pressuposto de que é possível avaliar e identificar o potencial de infiltração de uma bacia hidrográfica a partir da interação dos atributos: precipitação média anual, uso e ocupação da terra e elementos físicos naturais (geomorfologia, geologia e pedologia). A figura 16 apresenta a integração dos atributos para geração da carta de potencial de infiltração.

Figura 16 – Integração dos atributos para geração da carta de potencial de infiltração



Fonte: Simões (2012).

A carta de uso e ocupação da terra foi elaborada a partir da metodologia descrita no item 5.6. A espacialização das cartas dos elementos físicos foi feita no Software ArcGis 10.0, o sistema de projeção de coordenadas (UTM – Córrego Alegre – Zone 22S) foi usado associado ao datum horizontal (Datum SAD - 1969 da América do Sul).

A precipitação foi considerada homogênea para área de estudo devido às características e a área da bacia estudada. Os dados pedológicos e geológicos foram obtidos de trabalhos anteriores realizados na área de pesquisa, e foram convertidos de arquivos do banco de dados do Software Spring 5.4 para arquivos em formato shapefile para sua inserção no banco de dados digitais no ArcGis 10.0.

Por fim, a geomorfologia da área de estudo foi classificada segundo o trabalho realizado por Lollo (1998). O autor, a partir da técnica de avaliação do terreno no município de Ilha Solteira, reconheceu dois sistemas de terreno (denominados A e B), cuja subdivisão permitiu o estabelecimento de cinco unidades de terreno duas pertencentes ao Sistema A

(denominada A.1 e A.2), e três pertencentes ao Sistema B (denominadas B.1, B.2 e B.3). Os resultados desse trabalho foram convertidos de arquivos de CAD para arquivos em formato shapefile para sua inserção no banco de dados digitais no ArcGis 10.0.

Na bacia hidrográfica do Córrego Caçula, observa-se a presença das unidades de terreno denominadas A.2, B.1, B.2 e B.3, a tabela 13 apresenta as principais características de cada uma das unidades.

Tabela 13 – Características das unidades de terreno definidas por Lollo (1998)

Unidades	Forma
A.1	Vales pequenos profundos com encostas convexas, evidências de processos erosivos na porção inferior das encostas.
A.2	Colinas médias suave onduladas com encostas convexas com média frequência de canais.
B1	Vales amplos com encostas côncavas, alta frequência de canais, encostas abruptas suavizando-se em direção à drenagem, extensos depósitos aluviais na base.
B2	Colinas médias a amplas, suave onduladas, com encostas convexas na sua metade superior a côncavas na metade inferior com baixa frequência de canais.
B3	Vales médios com encostas côncavas à retilíneas, média frequência de canais.

Fonte: Lollo (1998).

De acordo com a metodologia, cada um dos atributos possui características próprias que influencia, de formas diferentes, o processo de infiltração. A permeabilidade do solo associada a estas características específicas permite a identificação de áreas com alto ou baixo potencial de infiltração.

É atribuído um valor, dentro de uma escala de 1 – 5, para cada elemento de acordo com a sua influência no processo de infiltração, sendo o valor 1 para áreas com potencial de infiltração “muito baixo” e 5 para “muito alto”.

As áreas com os diferentes potenciais de infiltração foram calculadas pela soma desses valores, o que caracteriza a influência de cada elemento no processo de infiltração, dividido pelo número de atributos, a partir do Software ArcGis 10.0.

A tabela 14 apresenta os valores atribuídos a cada classe de acordo com as características que influenciam no potencial de infiltração.

Tabela 14 – Contribuição de cada atributo no potencial de infiltração

Atributos	←←←←Potencial de infiltração aumenta						
Geologia	Arenito			Basalto			
	4			2			
Geomorfologia	B.2	A.2	B.3	A.1	B.1		
	5	5	2	2	1		
Pedologia	PVA – Argissolo Vermelho Amarelo			LV – Latossolo Vermelho			
	4			2			
Uso e ocupação da terra	Mata e vegetação natural	Agricultura perene e temporária	Pastagem	Preparo para o plantio e solo exposto	Asfalto	Telhado	
	5	4	3	2	1	1	
Precipitação	Considerada homogênea para área.						

Fonte: Dados do próprio autor.

Desta maneira as classes dos atributos foram combinadas a fim de elaborar a carta de infiltração potencial.

5.6 Cartas de uso e ocupação da terra

Para elaboração das cartas de uso e ocupação da terra foram utilizadas imagens de satélite atuais e antigas da área de pesquisa para verificação do cenário de uso e ocupação passado e futuro e influencias dessa modificação na degradação do ambiente. Desta forma, foram utilizados os seguintes materiais:

- Cartas topográficas do IBGE em Escala 1: 50.000 SF-22-C-II-3 (Ilha Solteira) e SF-22-C-IV-1 (Bela Floresta);
- Imagem fusionada Cbers 2B sensor CCD (21 de dezembro de 2009) e sensor HRC (08 de setembro de 2008), resolução espacial de 2,7 metros, para identificação dos usos e ocupação da bacia hidrográfica do Córrego Caçula por meio das formas, textura e cor, a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto;
- Imagem LandSat 7 ETM+, órbita: 222, ponto 74, data do imageamento: 12 de agosto de 2001;
- Programa ArcGis 10.0: SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais.

As imagens Cbers e LandSat foram disponibilizadas gratuitamente pelo INPE. Para a classificação recente do uso e ocupação da terra foram utilizadas imagens Cbers do ano de 2009, pois não haviam disponíveis imagens mais recentes da área de pesquisa. Do mesmo modo, para a classificação referente ao passado foram utilizadas imagens Landsat do ano de 2001 que foi o ano em que foram obtidas imagens mais antigas da bacia hidrográfica.

A técnica adotada para fazer a fusão das imagens Cbers CCD e Cbers HRC foi a transformação IHS (Intensidade, Matiz e Saturação) com o objetivo de melhorar a qualidade visual dos alvos da superfície terrestre. No Software ArcGis 10.0 as imagens foram restauradas de 20 para 10 metros e depois para 2,5 metros com a finalidade de obter a mesma resolução espacial da HRC. Em seguida realizou-se o processo de fusão entre as imagens CCD e HRC através da transformação RGB-IHS e IHS-RGB. No sistema IHS, as cores são representadas através de três componentes: intensidade (Intensity - I), matiz (Hue - H) e saturação (Saturation -S), as quais definem respectivamente o brilho, a cor e a saturação, que é a qualidade da cor presente.

A transformação do espaço RGB para o IHS gera composições coloridas em que há menor correlação entre as bandas, permitindo um maior aproveitamento das cores. A transformação IHS tornou-se um dos métodos mais utilizados no fusionamento de imagens, com a finalidade de melhorar a resolução espacial ou fundir imagens de diferentes sensores. Esta permite isolar a informação espectral contida em três bandas para dois canais, o da Saturação e o do Matiz. O brilho da cena é isolado no canal intensidade onde pode ser substituído por outra banda de melhor resolução.

Assim, a imagem final terá as propriedades de ambos conjuntos de dados e possuirá melhor resolução espacial dos dados (NOVO, 2008). Os passos para o fusionamento das imagens podem ser encontrados no sítio online do INPE (<http://wiki.dpi.inpe.br/doku.php?id=fusaohrcccdcbbers2b:exemplo>).

5.6.1 Georreferenciamento da carta topográfica

O georreferenciamento da carta topográfica obtida através do sítio online do IBGE tem como objetivo compor a base para o registro da imagem de satélite descrito no item 5.6.2.

O procedimento é simples, primeiramente se verifica qual a projeção e o datum da carta em questão. No ArcCatalog do Software ArcGis 10.0 se pode definir a projeção e datum utilizando a ferramenta *Define Projection*.

Em seguida, é necessário obter coordenadas (pertencentes ao sistema no qual se pretende georreferenciar) de pontos da carta, conhecidos como pontos de controle.

5.6.2 Processamento das imagens: realce e registro de imagens

5.6.2.1 Realce

A técnica de Realce de Contraste da imagem tem por objetivo melhorar a qualidade das imagens para facilitar a visualização de feições nas mesmas. Desta forma, no ArcGis, pode-se realizar o realce das feições da imagem através das funções *Properties – Symbolology – RGB composite > Stretch*.

A alteração de contraste de composições coloridas deve ser precedida pela seleção do canal R, G ou B para escolha da camada a ser contrastada.

5.6.2.2 Registro de imagens

As imagens adquiridas para a realização da carta de uso e ocupação da terra não vem georreferenciadas a um sistema de projeção conhecido. O módulo para georreferenciamento, também conhecido como Registro de Imagens, disponível nos softwares de Processamento de Imagens Orbitais, tais como o ArcGis 10.0, possibilita a realização desta função. Ao passar por este processamento, a imagem pode ser integrada a outros tipos de informações (mapas vetoriais ou matriciais) em sistemas de informações geográficas (GONZAGA, 2012).

Ao georreferenciar as imagens cada um dos seus pontos (ou *pixels*), passa a estar atrelados a um par de coordenadas, de um sistema de coordenadas conhecido.

O procedimento para o registro da imagem no ArcGis 10.0 utiliza como base a carta topográfica do município de Ilha Solteira georreferenciada anteriormente, a partir do *Toolbar Georeferencing* são capturados 4 ou 5 pontos bem distribuídos na carta e que sejam bem identificados também na imagem. Desta forma, cria-se um novo arquivo de imagem registrada.

5.6.3 Processamento digital de imagens: classificação supervisionada

A técnica empregada para a classificação da imagem foi a classificação supervisionada. Este processo consiste na extração de amostras de *pixel* (Valor ND) que representem o tipo de alvo de interesse na imagem, permitindo que o software cometa menos erros no processo de classificação automática.

Na classificação supervisionada, definem-se primeiro as assinaturas espectrais das categorias utilizadas na classificação, tais como a área urbanizada, pastagem ou corpos d'água. Em seguida, a partir de um software para o processamento digital de imagem, por exemplo: ArcGis 10.0, associa-se a cada *pixel* a assinatura espectral mais similar. A classificação supervisionada compreende os seguintes passos:

- Localizar exemplos representativos de cada tipo de cobertura que pode ser identificado na imagem (definição das áreas de treino);
- Digitalizar polígonos em torno de cada área de treino, atribuindo um único identificador para tipo de cobertura;
- Analisar os *pixels* contidos nas áreas de treinos e criação de assinaturas espectrais para tipo de cobertura, e;
- Classificar toda a imagem, considerando cada *pixel* individualmente, comparando a sua assinatura particular com cada uma das assinaturas conhecidas.

A preferência pela classificação supervisionada se deu porque nos testes realizados com a classificação não supervisionada (onde são agrupados os pixels, segundo as suas características espectrais sem a influência do intérprete) os resultados não foram adequados aos reconhecimentos das classes de uso de interesse.

Esta classificação (não supervisionada), apresentou confusão, por exemplo, ao classificar agricultura e pastagem, solo exposto e asfalto, o que não ocorreu com a classificação supervisionada pela qual foi obtida uma classificação mais fiel do uso e ocupação da terra.

5.6.4 Elaboração do layout do mapa temático

A elaboração do mapa temático mostra a evolução das formas de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Córrego Caçula. A legenda proposta para este mapa adequou-se à nomenclatura e cores sugeridas pelo IBGE (2006) organizada segundo quatro níveis hierárquicos, comportando desdobramentos para níveis de maior detalhe dependendo da escala de trabalho como mostra a Figura 17.

As classes foram determinadas de acordo com os objetivos do estudo, isto é, identificar as coberturas que possuem diferentes coeficientes de escoamento superficial, sendo

assim cinco classes foram identificadas: agricultura perene e temporária, mata e vegetação natural, pastagem, preparo para plantio e solo exposto e área urbanizada (asfalto e telhado).

Figura 17 – Cores e classes do uso e ocupação da terra

Nível I	Nível II	
1. Áreas Antrópicas Não Agrícolas	1.1	Área Urbanizada
	1.2	Área de Mineração
2. Área Antrópicas Agrícolas	2.1	Cultura Temporária
	2.2	Cultura Permanente
	2.3	Pastagem
	2.4	Silvicultura
3. Áreas de Vegetação Natural	3.1	Florestal
	3.2	Campestre
4. Água	4.1	Corpos d'água continentais
	4.2	Corpos d'água costeiros

Fonte: IBGE (2006).

Na área urbanizada da carta de uso e ocupação da terra de 2009, foi feito um detalhamento das classes de forma a distinguir diferentes tipos de cobertura que possam ter influência no escoamento superficial. As duas classes identificadas foram: asfalto e telhado. Além disso, trabalhos de campo foram realizados para verificação da existência dessas classes.

5.7 Carta de suscetibilidade a erosão

Para diagnosticar a suscetibilidade da área de estudo aos processos erosivos, foi necessário analisar as potencialidades dos recursos naturais pelo conhecimento de elementos do meio físico que mais contribuem com esse processo, a declividade, os solos, a geomorfologia, além do uso e ocupação da terra.

Inicialmente para a operação de integração dos mapas temáticos previamente elaborados, definiu-se o grau de suscetibilidade aos processos erosivos das classes de cada um dos mapas a serem integrados. Assim, foi definido que o valor um (1) seria atribuído para classes com baixa suscetibilidade, dois (2) para classes com média suscetibilidade e três (3) para classes com alta suscetibilidade.

A realização da integração dos atributos ocorreu através das operações de álgebra de mapas no ArcGis 10.0, utilizando-se os mapas de declividade, de uso e ocupação da terra, pedológico e geomorfológico.

A tabela 15 apresenta os valores de suscetibilidade à erosão determinados para cada classe dos atributos que foram integrados

Tabela 15 – Valores de suscetibilidade a erosão para cada classe dos atributos

Atributos	←←←←Potencial de suscetibilidade a erosão Valor da Suscetibilidade a erosão					
	Geomorfologia	A.2	B.2	B.3	A.1	B.1
	3	2	2	1	1	
Pedologia	PVA – Argissolo Vermelho Amarelo		LV – Latossolo Vermelho			
	3		2			
Uso e ocupação da terra	Preparo para o plantio e solo exposto	Asfalto	Telhado	Pastagem	Agricultura perene e temporária	Mata e vegetação natural
	3	2	2	2	1	1
Declividade	>10%	5 – 10 %	<5%			
	3	2	1			

Fonte: Dados do próprio autor.

5.8 Carta de limitações para uso e ocupação

A carta de limitações para uso e ocupação tem como objetivo representar a partir da caracterização do meio físico, áreas que apresentam restrições ao uso e ocupação, bem como áreas mais favoráveis para o uso e ocupação e, portanto contribuir com planejamento territorial.

Desta forma a carta foi confeccionada a partir da álgebra de mapas realizada no ArcGis 10.0, utilizando as cartas de geomorfologia (unidades de terreno), suscetibilidade a erosão, escoamento superficial e infiltração potencial baseados no método Soil Conservation Service – SCS. Para cada classe atribuída a cada carta, foram conferidos valores que determinam a sua influência na limitação para o uso e ocupação. Assim foi definido que o valor um (1) seria atribuído para classes com baixa limitação para uso e ocupação, dois (2)

para classes com média limitação para uso e ocupação e três (3) para classes com alta limitação para uso e ocupação.

Para finalizar a carta, foi elaborada a delimitação das APPs - Áreas de Preservação Permanente, com intuito de estabelecer áreas que, de acordo com a legislação vigente, devem ser preservadas.

Portanto, a delimitação da APP foi elaborada segundo a lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 que institui no caso da área de pesquisa em que os cursos d'água apresentam largura entre 10 e 50, áreas de preservação permanente de 30 metros.

Para as áreas de nascentes, a lei dispõe que as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 metros. Além disso, deve ser respeitada a APP de 30 metros nas áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento.

A tabela 16 apresenta os valores de limitação de uso e ocupação para cada classe das cartas.

Tabela 16 – Valores de limitação de uso e ocupação para cada classe das cartas

Classes	Valor de limitação de uso e ocupação				
	A.2	B.2	B.3	A.1	B.1
Geomorfologia	3	2	2	1	1
Suscetibilidade a erosão	Alta		Média		Baixa
	3		2		1
Escoamento superficial	Alta		Média		Baixa
	3		2		1
Infiltração potencial	Baixa		Média		Alta
	3		2		1
APP	30 metros		50 metros		
	3		3		

Fonte: Dados do próprio autor.

6 RESULTADOS

6.1 Cartas de atributos

Para elaboração das cartas derivadas: escoamento superficial, infiltração potencial, suscetibilidade a erosão e limitação ao uso e ocupação foi organizado um banco de dados com os atributos necessários. Estes atributos foram obtidos de partir de trabalhos anteriores que tiveram o Córrego Caçula como área de abrangência (CINDIRU, 1995; LOLLO, 1998), ou por tratamento de dados do projeto TOPODATA, da aplicação da ferramenta ArcHydro do Software ArcGis 10.0 ou pro processos de tratamento digital de imagens.

As informações oriundas do Projeto Topodata, constituem as cartas de altimetria e declividade. A aplicação da ferramenta ArcHydro, a partir das informações derivadas da carta de altimetria, pode obter as informações: extração da rede de drenagem, delimitação da bacia hidrográfica, direção de fluxo e fluxo acumulado.

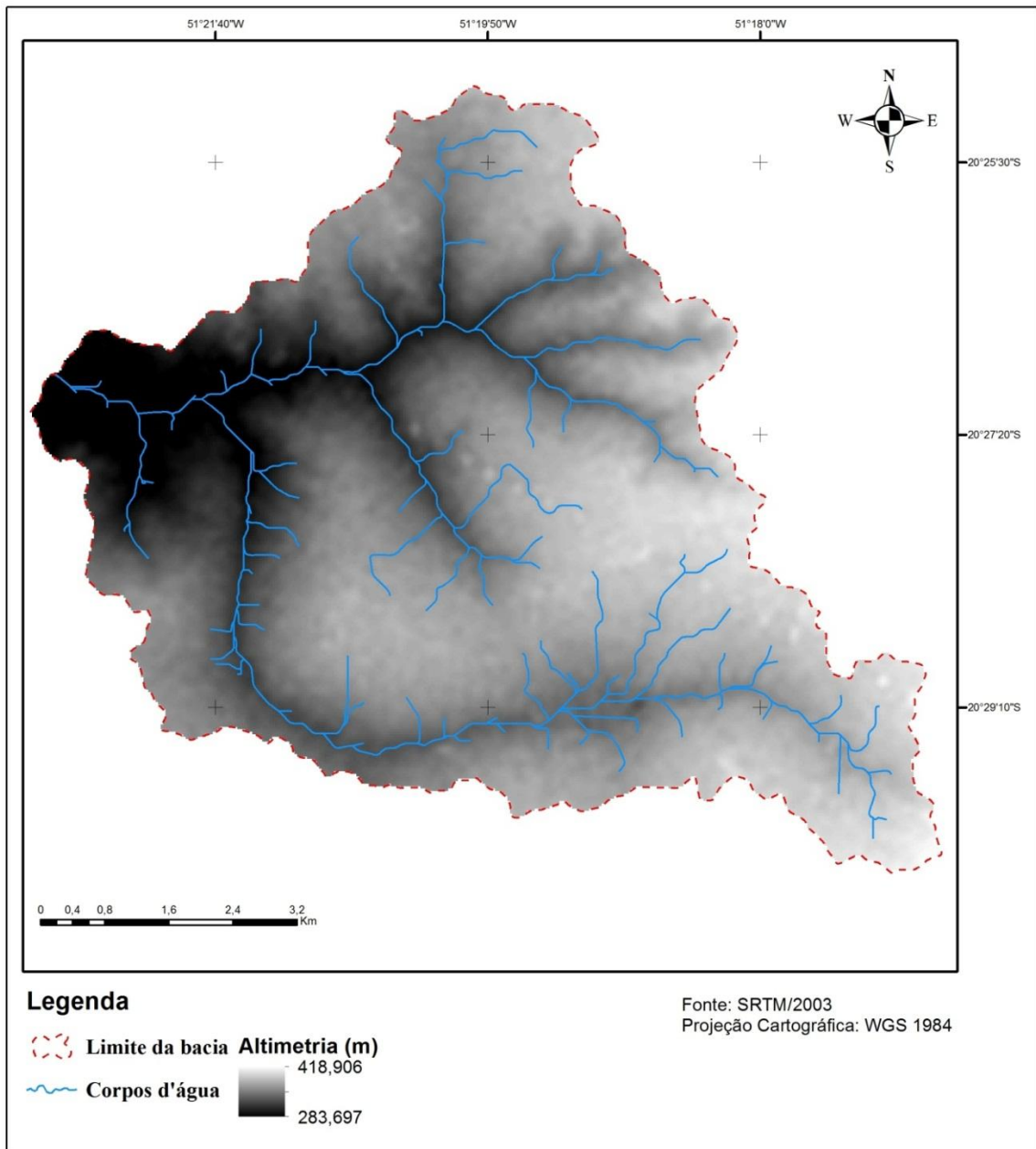
Em relação aos dados obtidos de trabalhos anteriores, foram descritos e representados em cartas, os atributos que compreendem: litologia, textura e gênese, espessura (m), permeabilidade (m/s), densidade de drenagem (canais/km), feições favoráveis ao armazenamento superficial e unidades de terreno.

6.1.1 *Altimetria*

Com a finalidade de aplicar as ferramentas do ArcHydro, tal como extração da rede de drenagem, delimitação da bacia, direção de fluxo e fluxo acumulado, inicialmente foi elaborada a carta de altimetria (Figura 18) da área de pesquisa, para tanto foi utilizada a imagem de radar SRTM/2003 disponível no sitio online do TOPODATA. A partir do MDE – Modelo Digital de Elevação também pode ser gerada a delimitação da bacia e extração da rede de drenagem da bacia.

A carta de altimetria tem como objetivo a representação da distância vertical dos pontos a uma superfície de referência, o que permite fazer a representação do relevo, que varia na bacia hidrográfica do Córrego Caçula de 283,7 metros a 418,9 metros.

Figura 18 – Carta de altimetria



Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.2 Declividade

A carta de declividade foi elaborada a partir da imagem de radar SRTM/2003 disponível no sítio online do Projeto TOPODATA e reclassificada no ArcGis 10.0 segundo as classes de declividade em porcentagem de inclinação (0-2%, 2-5%, 5-10%, 10-15%, 15-20%, 20-30%). Desse modo, a Figura 19 apresenta a distribuição da área de estudo das quatro classes de declividade consideradas de acordo com a ocorrência na área.

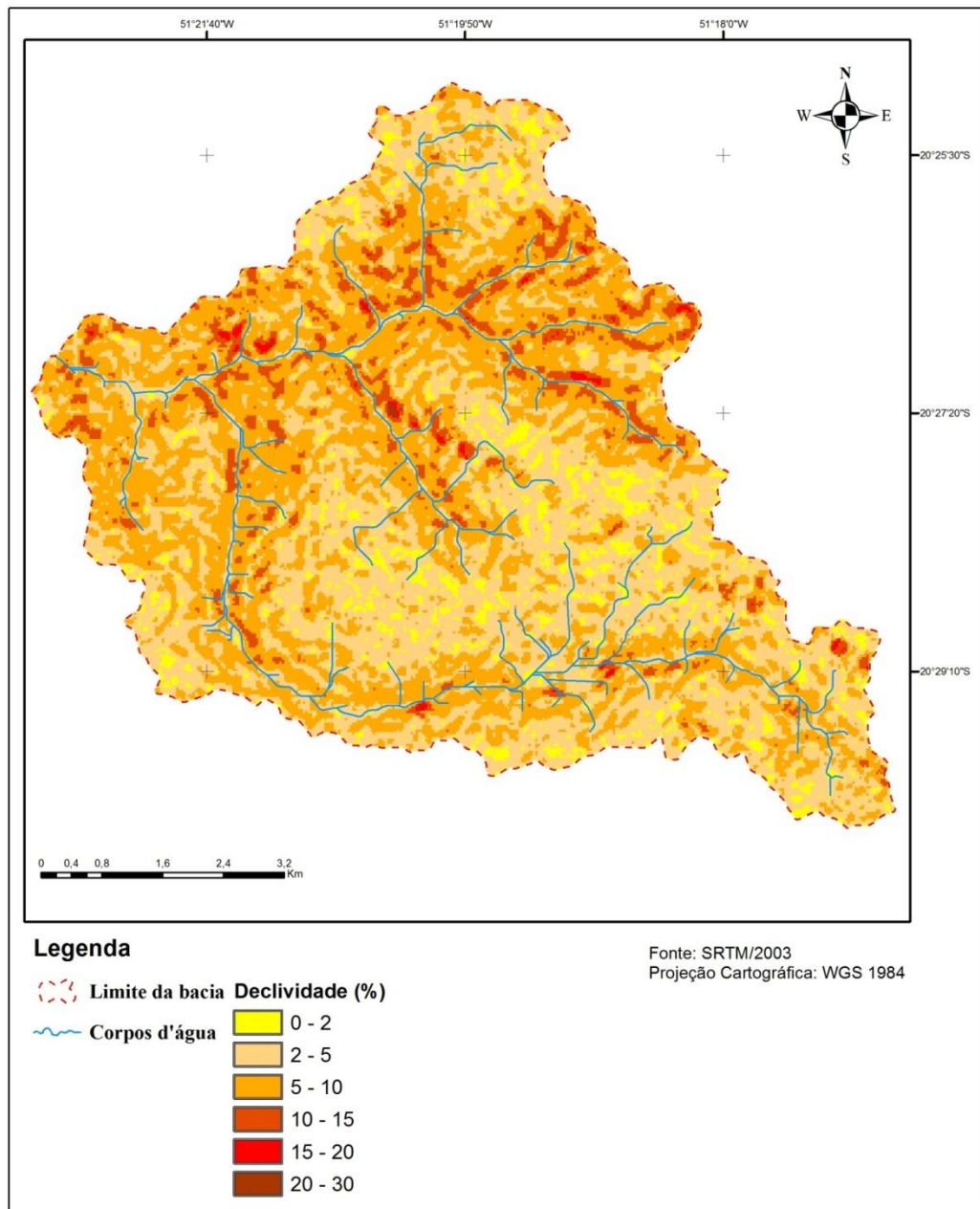
A carta de declividade (ou carta clinográfica) representa o grau de inclinação do terreno e é um importante fator para avaliação de alternativas de uso do solo na bacia hidrográfica.

De acordo com De Biasi (1992), as classes: < 5% (0 a 2%, 2 a 5%,) são áreas quase planas, adequadas para o uso e ocupação da terra (no caso de vertentes e/ou topos), ou inadequadas (no caso de planícies fluviais, pelos riscos de inundação e por estarem em área de preservação e proteção ambiental); 5 a 10% seria a faixa de áreas com moderada susceptibilidade à erosão, com poucas restrições ao uso e ocupação; 10 a 20% (10 a 15% e 15 a 20%) são áreas com forte susceptibilidade a erosão, e que necessitam de manejo adequado para sua utilização, por fim a classe 20 a 30% definem áreas com escoamento superficial muito rápido e muito forte susceptibilidade à erosão.

As maiores declividades da bacia hidrográfica variam de 20 a 30%, e por não existirem maiores declividades esta classe é a última classe representada na carta.

Destacam-se principalmente as áreas de 5 a 10% predominantes nas margens dos cursos d'água, seguidas pela classe de 2 a 5% nas áreas de escoamento, a classe 0 a 2% encontra-se distribuída pela área de pesquisa. Por fim as classes 10 a 15%, 15 a 20% e 20 a 30% encontram-se principalmente próximo aos cursos d'água na parte norte da bacia hidrográfica, sendo pouco expressivas na bacia hidrográfica.

Figura 19 – Carta de declividade



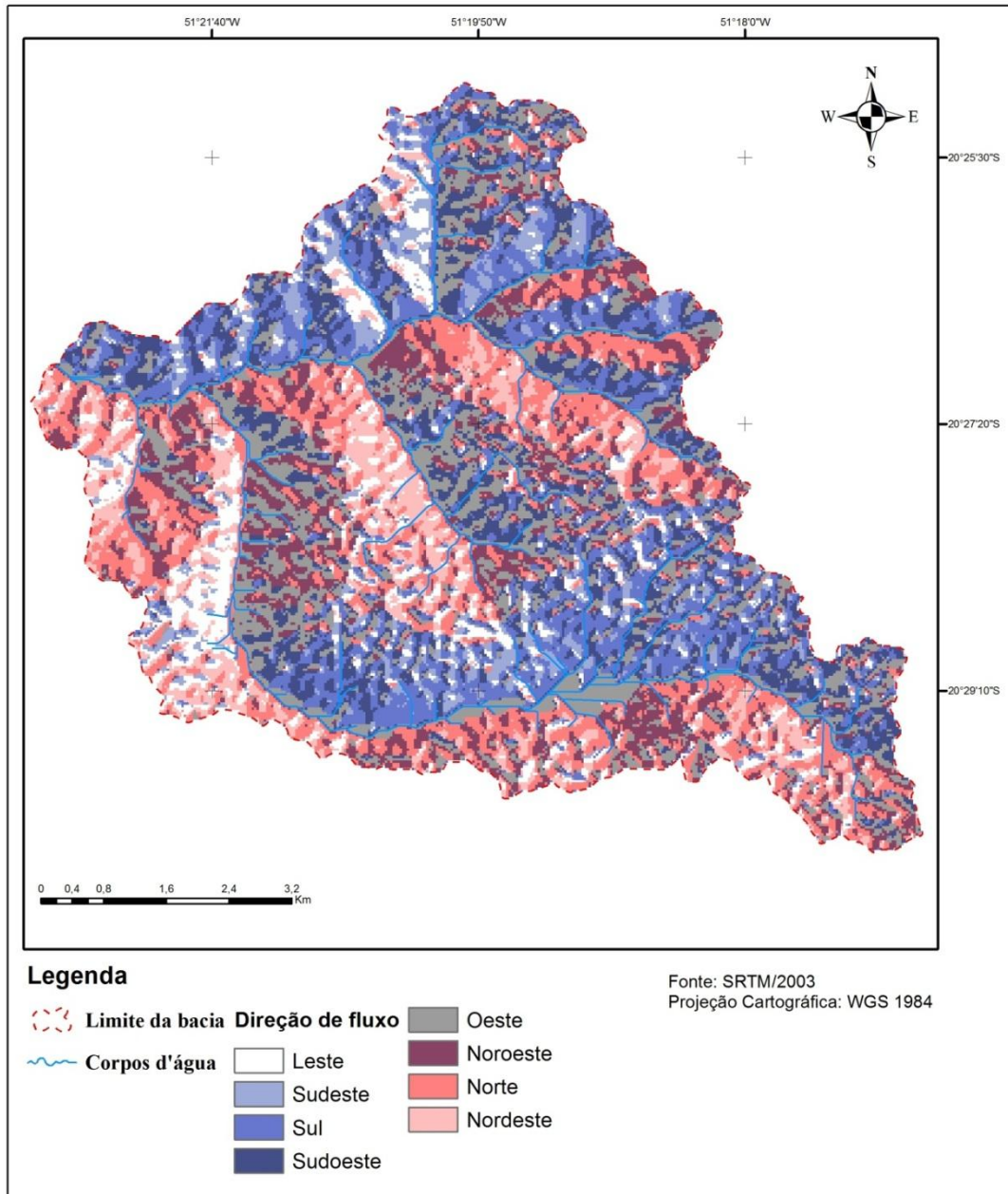
Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.3 Direção de fluxo

A partir do aplicativo *Flow direction* disponível na ferramenta ArcHydro do Software ArcGis 10.0 foi obtida a direção do fluxo de água de acordo com o caminho de maior declividade e menor gasto de energia através dos *pixels* da imagem de altimetria obtida a partir do TOPODATA (Figura 18). Desta forma, a Figura 20 apresenta a carta de direção de fluxo de água, onde é possível a observação da direção do escoamento de água nas vertentes.

De acordo com Rennó et al. (2008) apud Alves et al. (2010) a direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir.

Figura 20 – Carta de direção de fluxo



Fonte:

Dados do próprio autor.

6.1.4 Fluxo acumulado

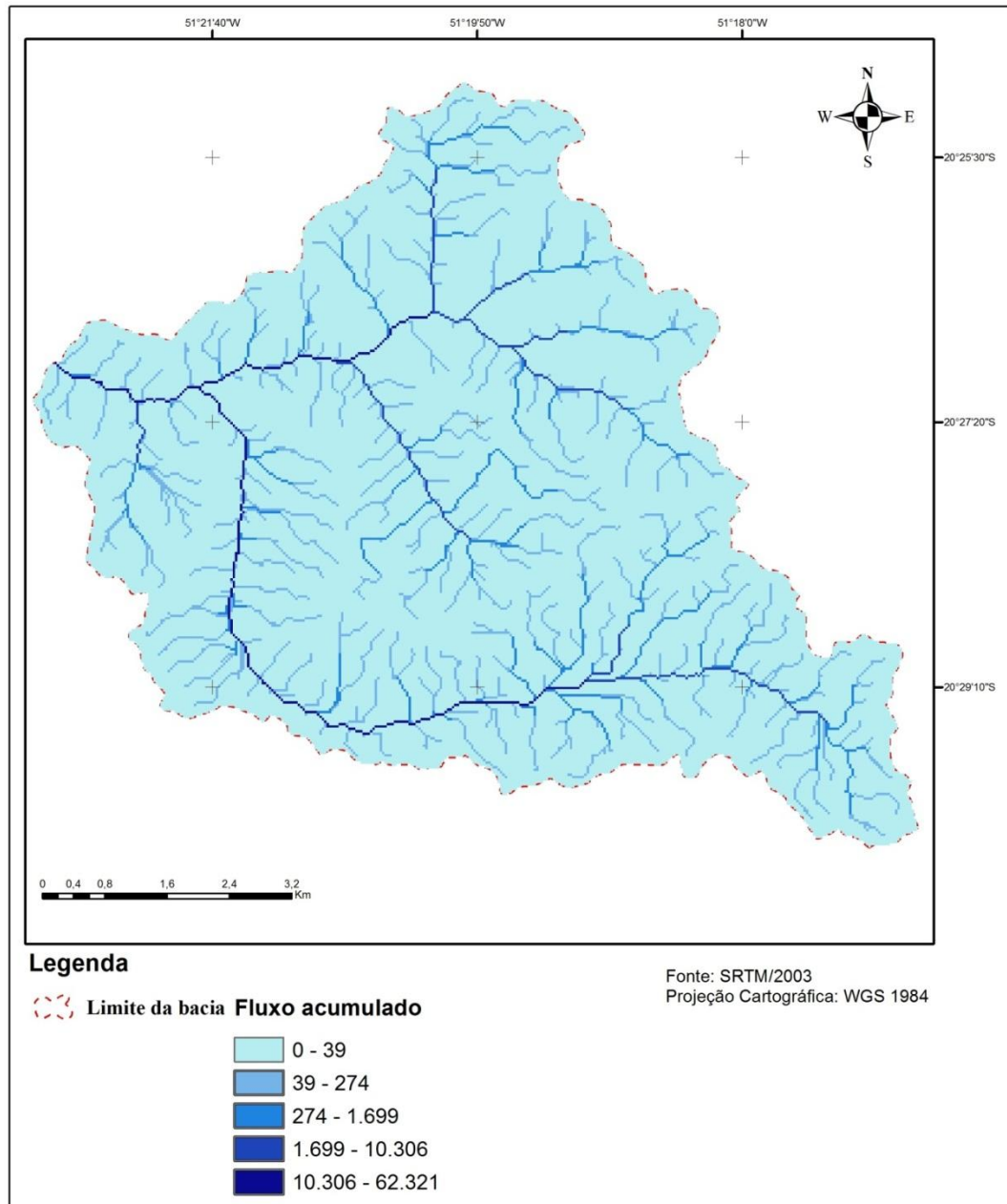
A partir do aplicativo *Flow accumulation* disponível na ferramenta ArcHydro do Software ArcGis 10.0 foi obtida a acumulação da água com base nas drenagens acumuladas em declividades baixas a partir da carta de altimetria obtida do TOPODATA (Figura 18). Desta forma a Figura 21 apresenta a carta de fluxo acumulado

O fluxo acumulado é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento e pode ser associado ao fator comprimento de rampa aplicado em duas dimensões. O fluxo acumulado, também denominado área de captação, apresenta obtenção complexa, manual ou computacional, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo) (VALERIANO, 2008).

Segundo Mendes e Cirilo (2001) apud Alves et al. (2010), o fluxo acumulado representa a rede hidrográfica, sendo possível montar nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada *pixel*. Desse modo, cada *pixel* recebe um valor correspondente ao número de *pixels* que contribuem para que a água chegue até ele.

Após a determinação da direção de fluxo e do fluxo acumulado foi possível à extração automatizada da rede de drenagem a partir do MDE, e em seguida a delimitação da bacia hidrográfica representada em ambas às cartas.

Figura 21 – Carta de fluxo acumulado



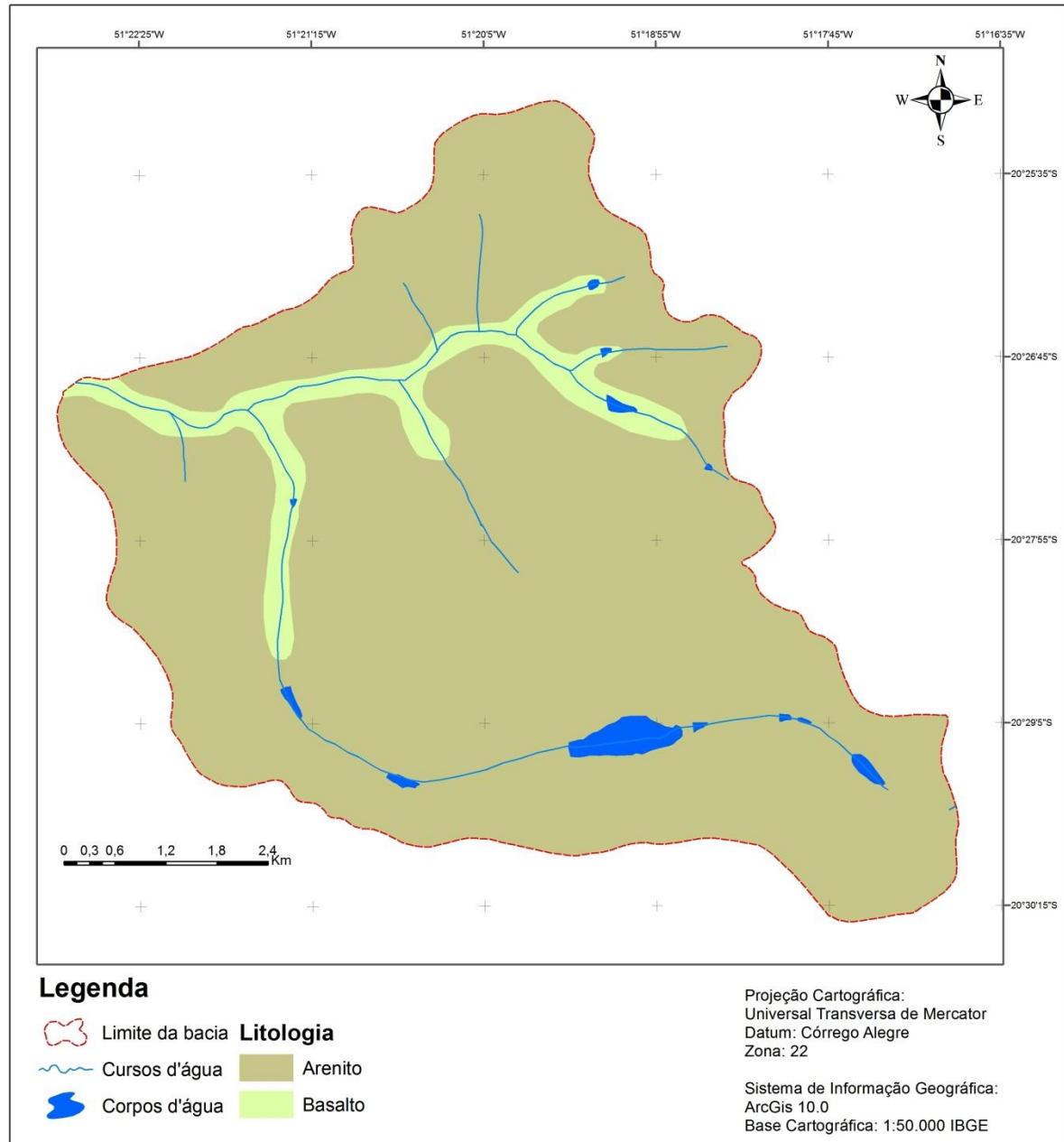
Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.5 Litologia

O termo litologia refere-se ao tipo de rocha. Consiste na descrição de rochas em afloramento ou amostra de mão, com base em várias características tais como a cor, textura, estrutura, composição mineralógica ou granulometria.

As litologias presentes na área de estudo, representadas na Figura 22 consistem as classes Arenito e Basalto. Observa-se que a classe mais expressiva é o Arenito, e apenas uma parte dos fundos de vale apresentam o Basalto.

Figura 22 – Carta de litologia



Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.6 Textura e Gênese dos materiais inconsolidados

As classes de textura e gênese dos materiais inconsolidados verificadas na área de estudo consistem em solos LV – Latossolo Vermelho Amarelo e PVA – Argissolo Vermelho Amarelo (dados do levantamento pedológico de (CINDIRU, 1995).

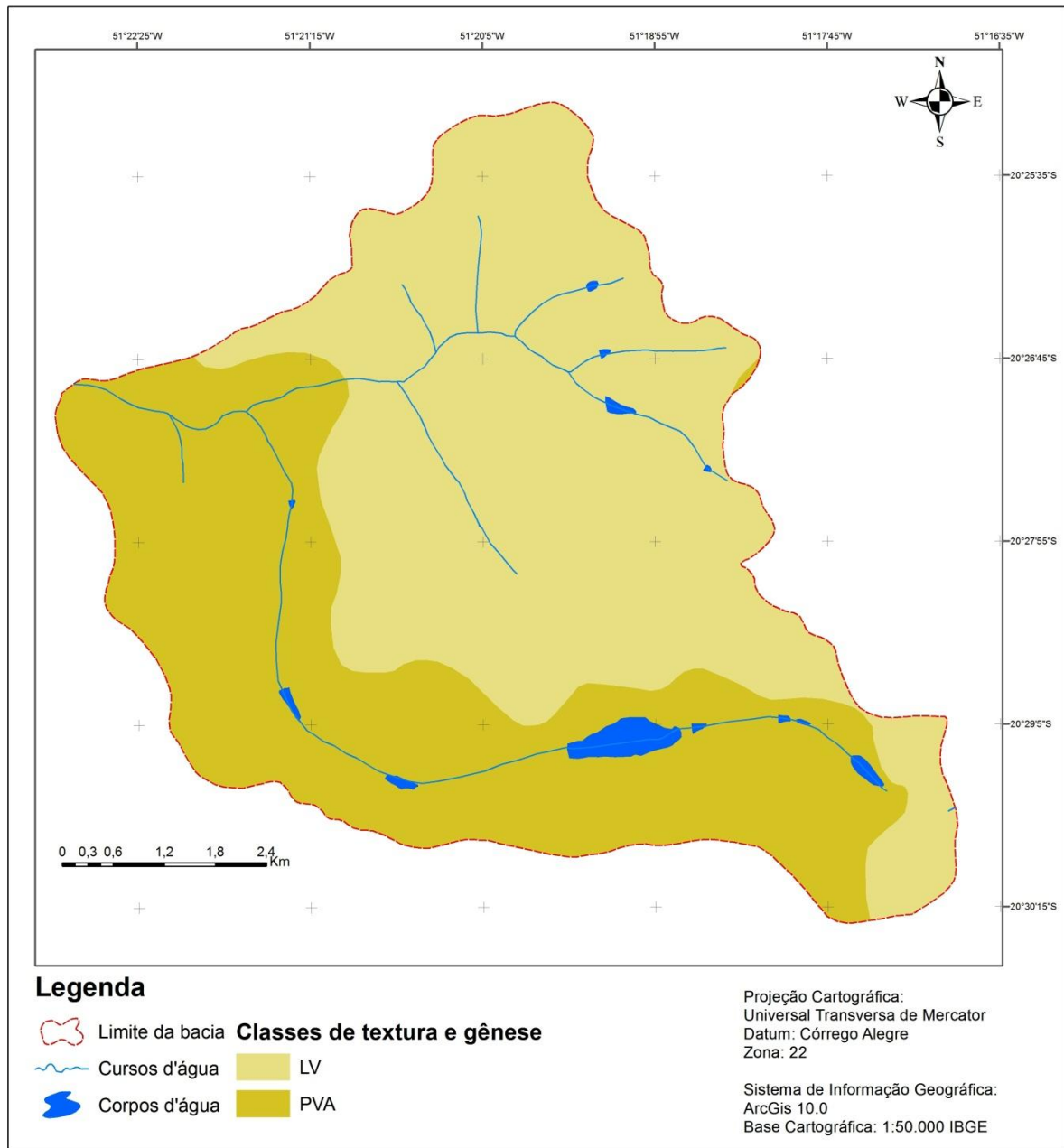
Os solos LV – Latossolo Vermelho são considerados estáveis e bem desenvolvidos, possuem geralmente grande profundidade, homogêneos, de boa drenagem e quase sempre com baixa fertilidade natural (necessitam correções químicas para aproveitamento agrícola).

Estes solos, também apresentam problemas físicos com limitações quanto à permeabilidade restrita (elevada coesão dos agregados, pois o solo é extremamente duro quando seco) e lenta a infiltração de água, quando utilizados para lavouras ou pastagens apresentam alta erodibilidade (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA, 2006).

Os solos PVA – Argissolo Vermelho Amarelo são solos bem drenados e uma das suas principais características é um aumento de argila no horizonte superficial A para o subsuperficial B. A profundidade dos solos é variável, mas em geral são pouco profundos e profundos.

Na carta de textura e gênese dos materiais inconsolidados apresentada na figura 23, observa-se a presença dos solos LV na parte norte na bacia, em contrapartida os solos PVA são encontrados ao sul com uma pequena área na parte nordeste.

Figura 23 – Carta de textura e gênese dos materiais inconsolidados



Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.7 Espessura dos materiais inconsolidados

A carta de espessura dos materiais inconsolidados (Figura 24) apresenta 4 classes de espessura dos materiais inconsolidados, divididas em: <1 metro, de 1 e 3 metros, de 3 a 5 metros e > que 5 metros (dados do levantamento pedológico de (LOLLO,1998).

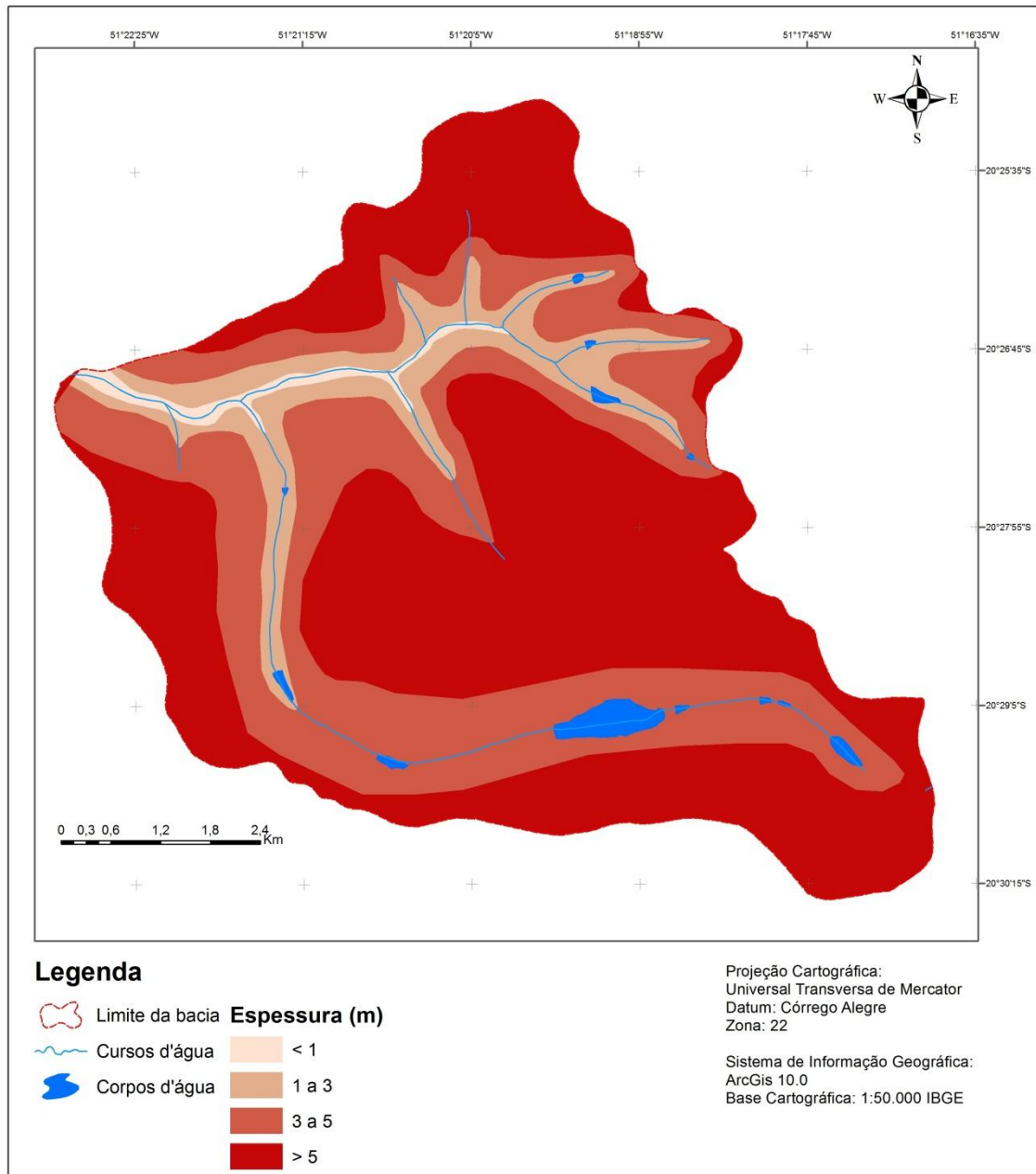
A classe com espessura menor que 1 metro apresenta uma pequena porção localizada no Córrego Caçula próximo a Foz da bacia, esta classe é considerada a mais favorável para o escoamento superficial, pois este passa a ser controlado pelo substrato rochoso (PEJON; ZUQUETTE, 1993).

As classes intermediárias com espessuras entre 1 a 3 metros apresenta maior potencial para o escoamento, e encontra-se limitada pelas classes com espessura menor que 1 metro e entre 3 a 5 metros.

A classe com espessura dos materiais entre 3 a 5 metros possui maior tendência para a infiltração, e encontra-se limitada pelas classes de espessura de materiais entre 1 a 3 metros e com mais de 5 metros.

As áreas que apresentam materiais com mais de 5 metros de espessura são as mais expressivas na bacia hidrográfica, e estão localizadas na parte Norte, Sul e Central da bacia, nestas áreas considera-se uma maior tendência para a infiltração.

Figura 24 – Carta de espessura dos materiais inconsolidados



Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.8 Permeabilidade

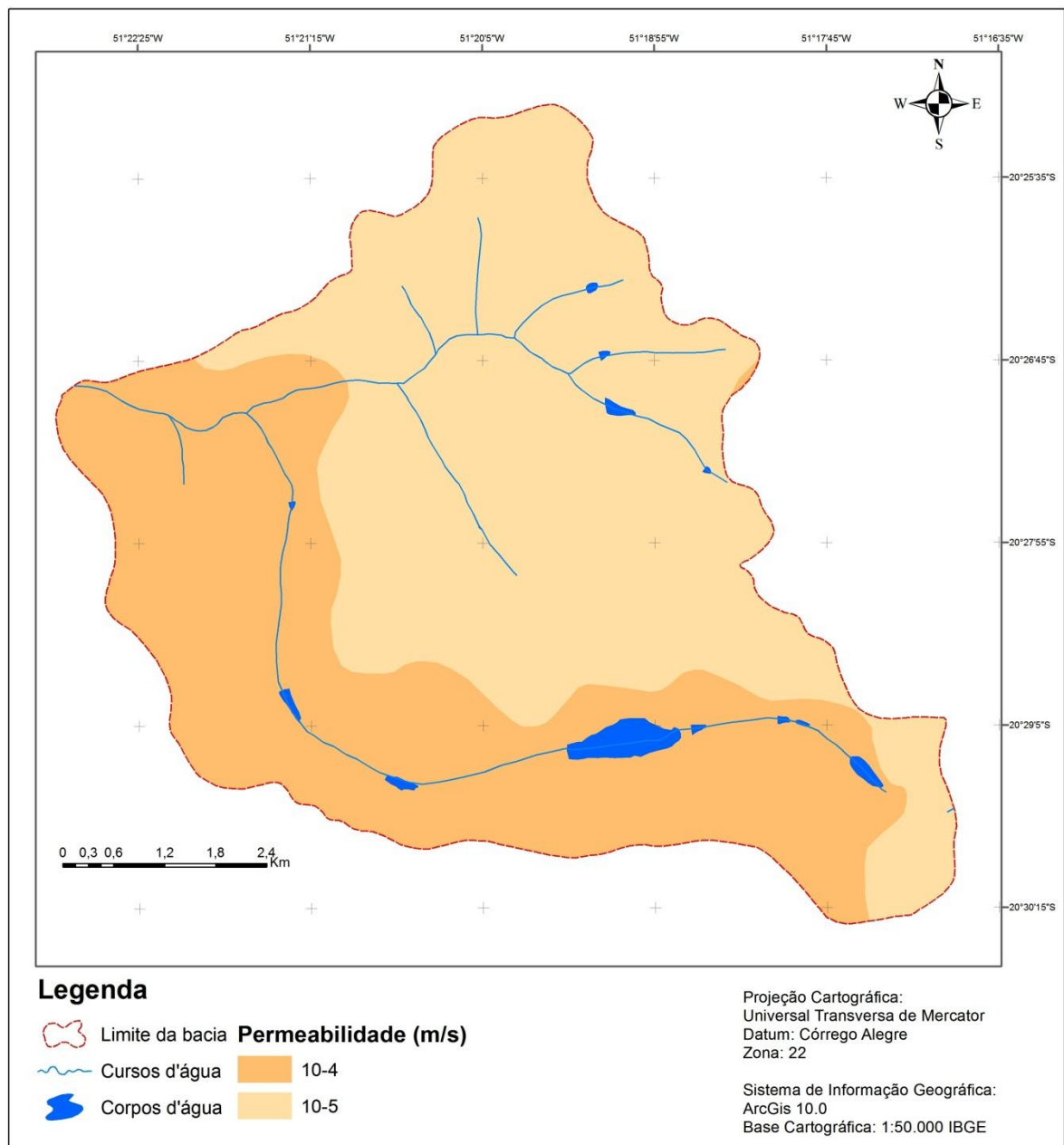
As classes de permeabilidade da bacia foram obtidas por Lollo (1998), através de perfis de sondagens e ensaios de caracterização de solos da área de estudo.

A carta de permeabilidade da bacia hidrográfica do Córrego Caçula (Figura 25) apresenta duas classes sendo a classe 10^{-5} m/s com área mais significativa, presente na parte Norte da bacia. Nesta classe, considera-se que a velocidade de percolação é lenta, facilitando

o escoamento superficial, fato relacionado diretamente com o tipo de solo Latossolo Vermelho.

A classe 10^{-4} m/s está localizada principalmente na porção Sul da bacia, com uma pequena área a Noroeste. Esta classe apresenta condições mais favoráveis para a infiltração, relacionado com o tipo de solo Argissolo Vermelho Amarelo.

Figura 25 – Carta de permeabilidade

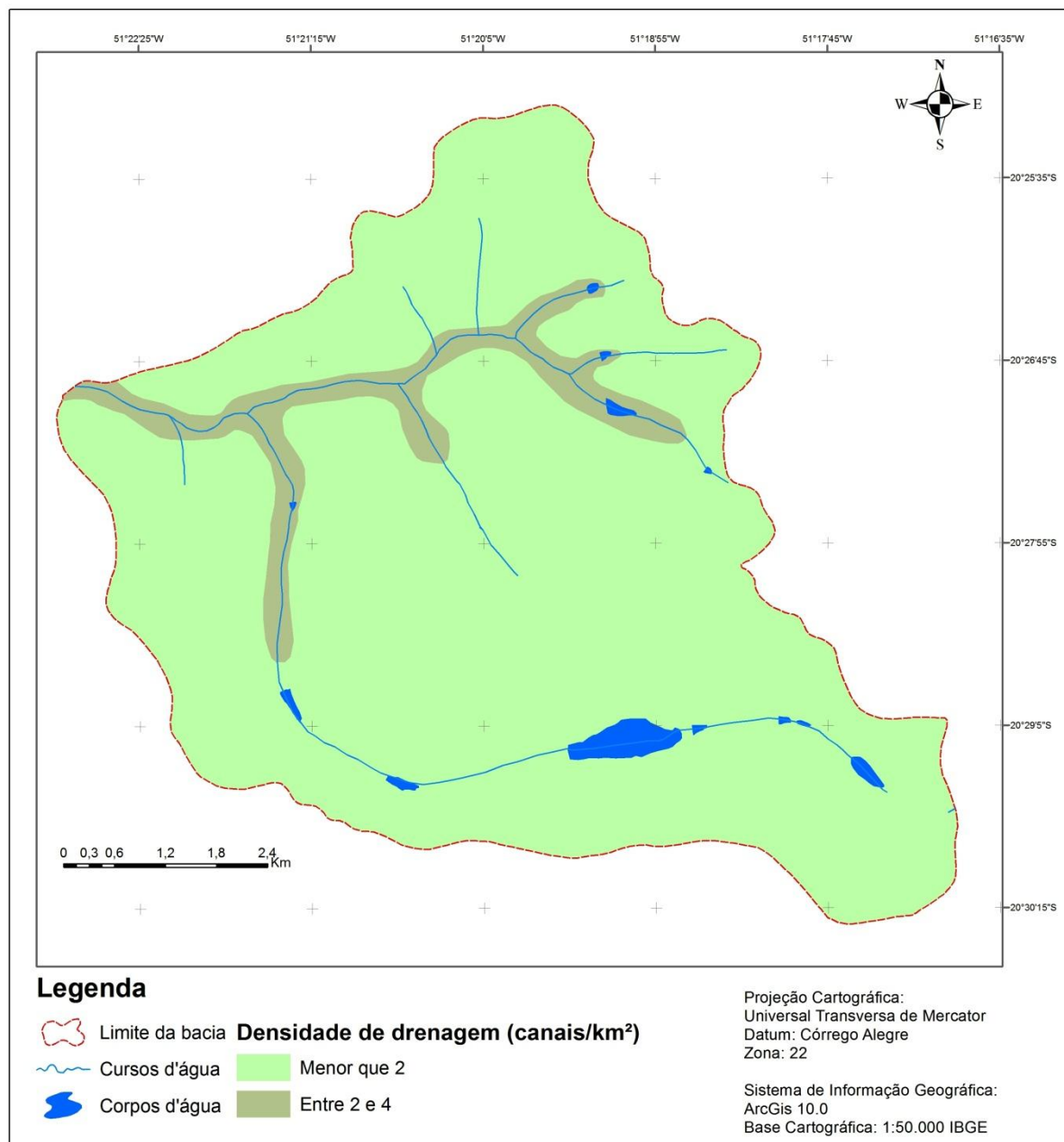


Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.9 Densidade de drenagem

A carta de densidade de drenagem (Figura 26) possui duas classes. A classe mais expressiva na área de estudo é a que apresenta menos que 2 canais/km², a classe entre 3 e 4 canais/km² possui uma área menos representativa presente nos fundos de vale próximo a foz da bacia hidrográfica, por quase toda a extensão do Córrego Caçula.

Figura 26 – Carta de densidade de drenagem



Fonte: Dados do próprio autor.

6.1.10 Unidades de terreno

As unidades de terreno da área de estudo foram classificadas segundo o trabalho realizado por Lollo (1998). O autor, a partir da avaliação do terreno no município de Ilha Solteira reconheceu dois sistemas de terreno (denominados A e B), cuja subdivisão permitiu o estabelecimento de cinco unidades de terreno (duas pertencentes ao Sistema A denominada A.1 e A.2, e três pertencentes ao Sistema B, denominadas B.1, B.2 e B.3).

Os resultados desse trabalho foram convertidos de arquivos de CAD para arquivos em formato shapefile para sua inserção no banco de dados digitais no ArcGis 10.0.

Na bacia hidrográfica do Córrego Caçula, observa-se a presença das unidades de terreno denominadas A.2, B.1, B.2 e B.3, a tabela 16 apresenta as principais características de cada uma das unidades.

Tabela 16 – Características das unidades de terreno definidas por Lollo (1998)

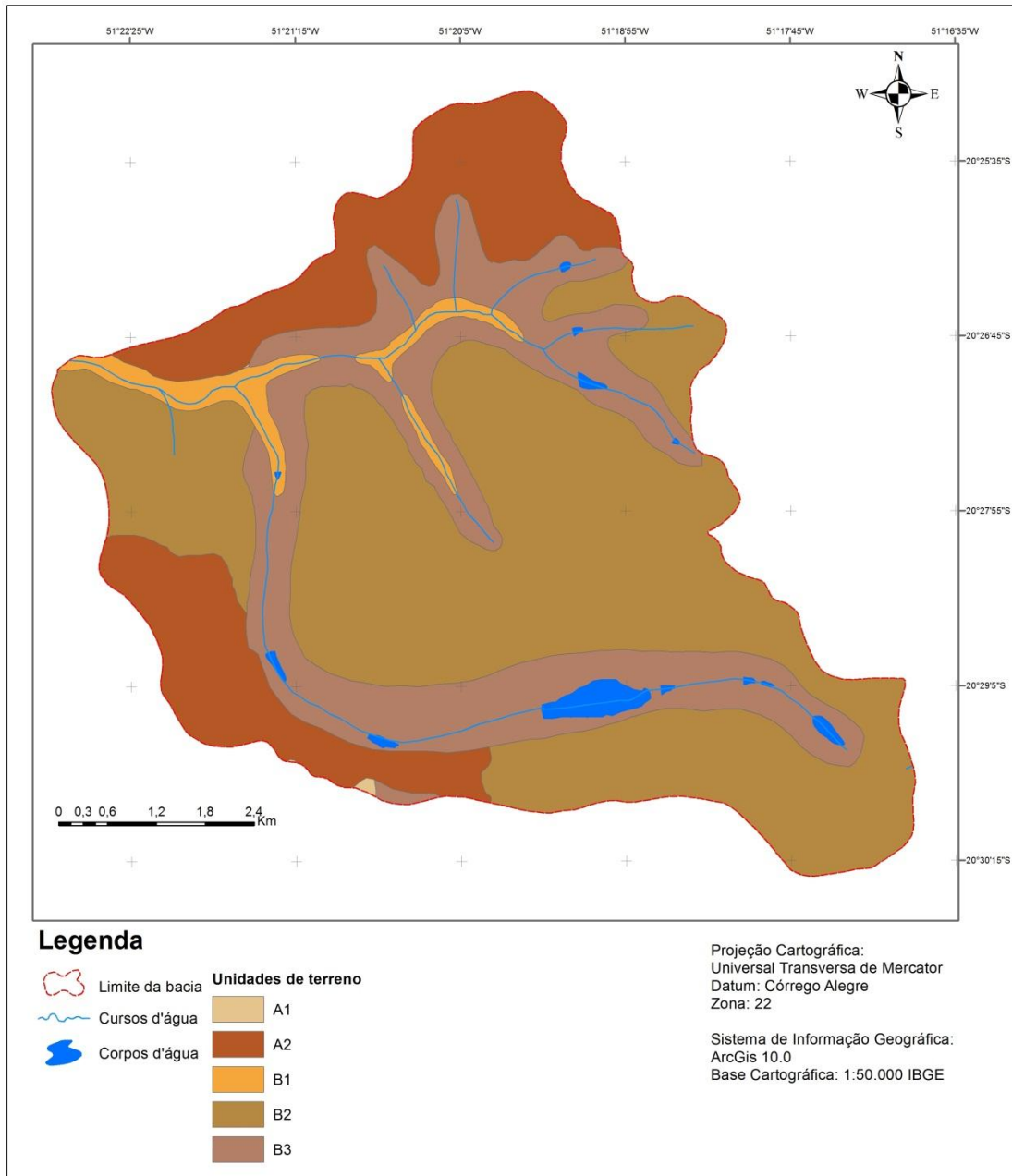
Unidades	Forma
A.1	Vales pequenos profundos com encostas convexas, evidências de processos erosivos na porção inferior das encostas.
A.2	Colinas médias suave onduladas com encostas convexas com média frequência de canais.
B1	Vales amplos com encostas côncavas, alta frequência de canais, encostas abruptas suavizando-se em direção à drenagem, extensos depósitos aluviais na base.
B2	Colinas médias a amplas, suave onduladas, com encostas convexas na sua metade superior a côncavas na metade inferior com baixa frequência de canais.
B3	Vales médios com encostas côncavas à retilíneas, média frequência de canais.

Fonte: Lollo (1998).

Na carta de unidades de terreno da bacia hidrográfica do Córrego Caçula (Figura 27), a unidade B.2 é predominante, seguida pelas unidades B3 localizada principalmente nos fundos de vale e A2 com áreas nas porções Norte e Sul da bacia.

A unidade A.1 está localizada ao Sul da bacia com uma pequena parte contribuinte.

Figura 27 – Carta de unidades de terreno



Fonte: Dados do próprio autor.

6.2 Cartas derivadas

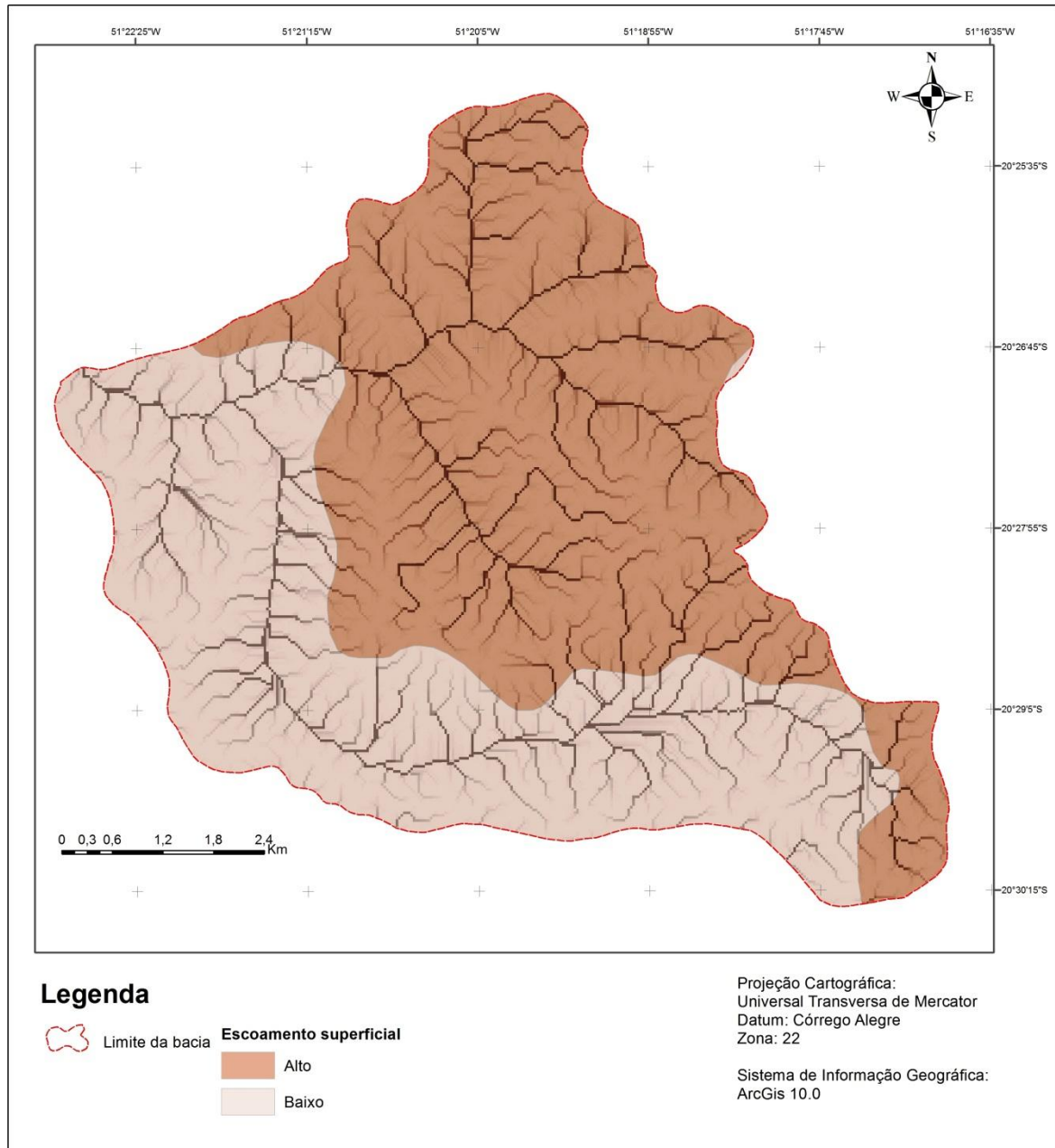
6.2.1 Carta de potencial de escoamento superficial preliminar - ArcHydro

A carta de fluxo acumulado gerada a partir da ferramenta ArcHydro do Software ArcGis 10.0, apresenta a acumulação de fluxos de escoamento superficial a partir da altimetria extraída dos dados do projeto TOPODATA, com a ausência de dados hidrológicos.

Esta acumulação de fluxos pode indicar a presença de áreas de saturação, ou seja, áreas em que de acordo com a formação do relevo, pode ocorrer saturação no terreno durante precipitações.

A integração desta carta de fluxo acumulado com a carta pedológica da área de estudo, permite estabelecer uma relação destas informações com o escoamento superficial, gerando a carta de escoamento superficial preliminar.

Figura 28 – Carta de potencial de escoamento superficial preliminar - ArcHydro



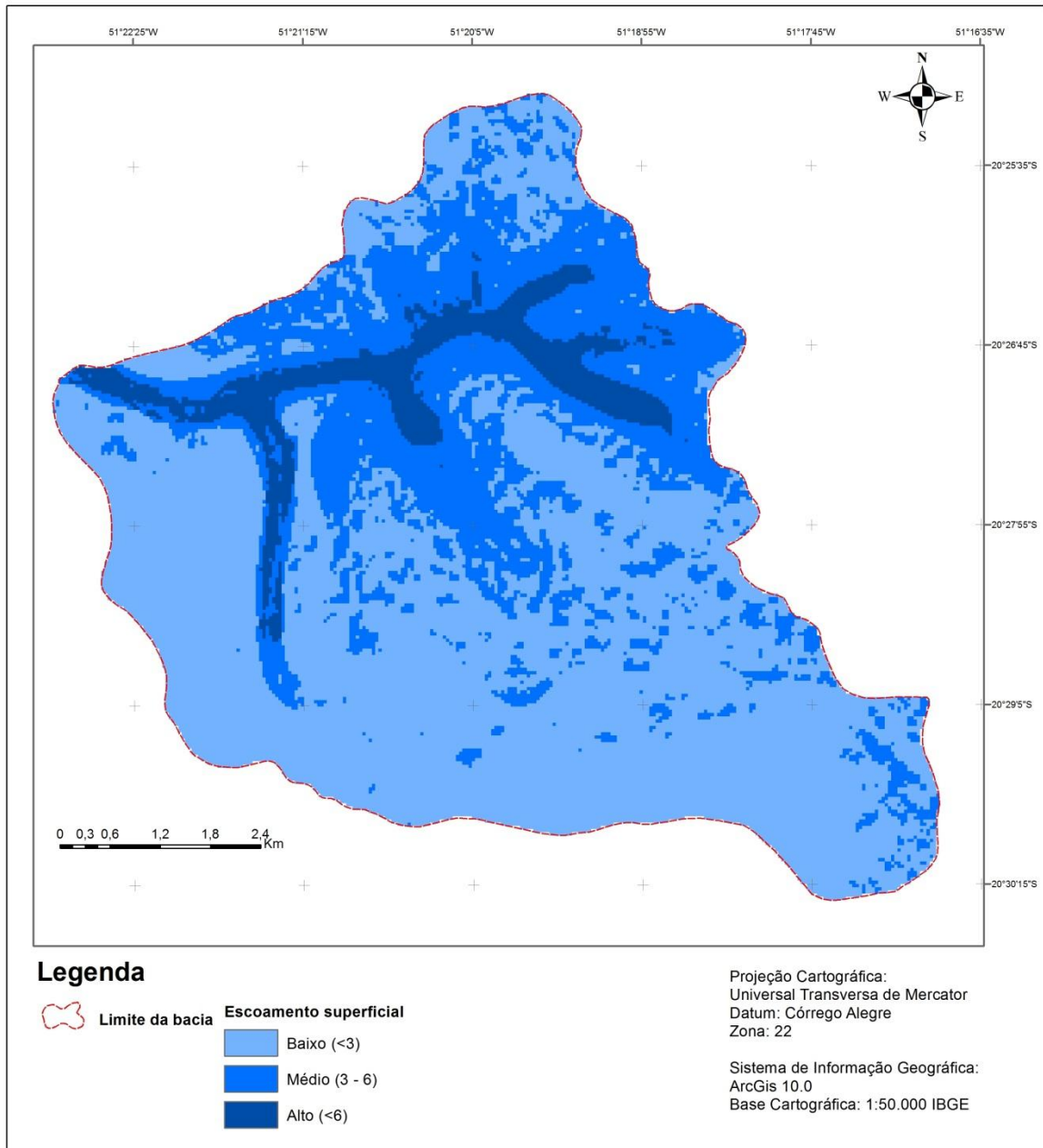
Fonte: Dados do próprio autor.

6.2.2 Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)

A carta de potencial de escoamento superficial, a partir da metodologia proposta de Pejon e Zuquette (1993), foi elaborada a partir das tabelas 10 e 11, que apresenta as classes de escoamento superficial bem como a ponderação de valores atribuídos de acordo com o potencial de escoamento de cada uma delas.

Os atributos permeabilidade, densidade de drenagem, litologia, declividade, espessura e textura e gênese foram integrados a partir da álgebra de mapas realizada no ArcGis 10.0 resultou na carta de potencial de escoamento superficial representada pela figuras 29.

Figura 29 – Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)



Fonte: Dados do próprio autor.

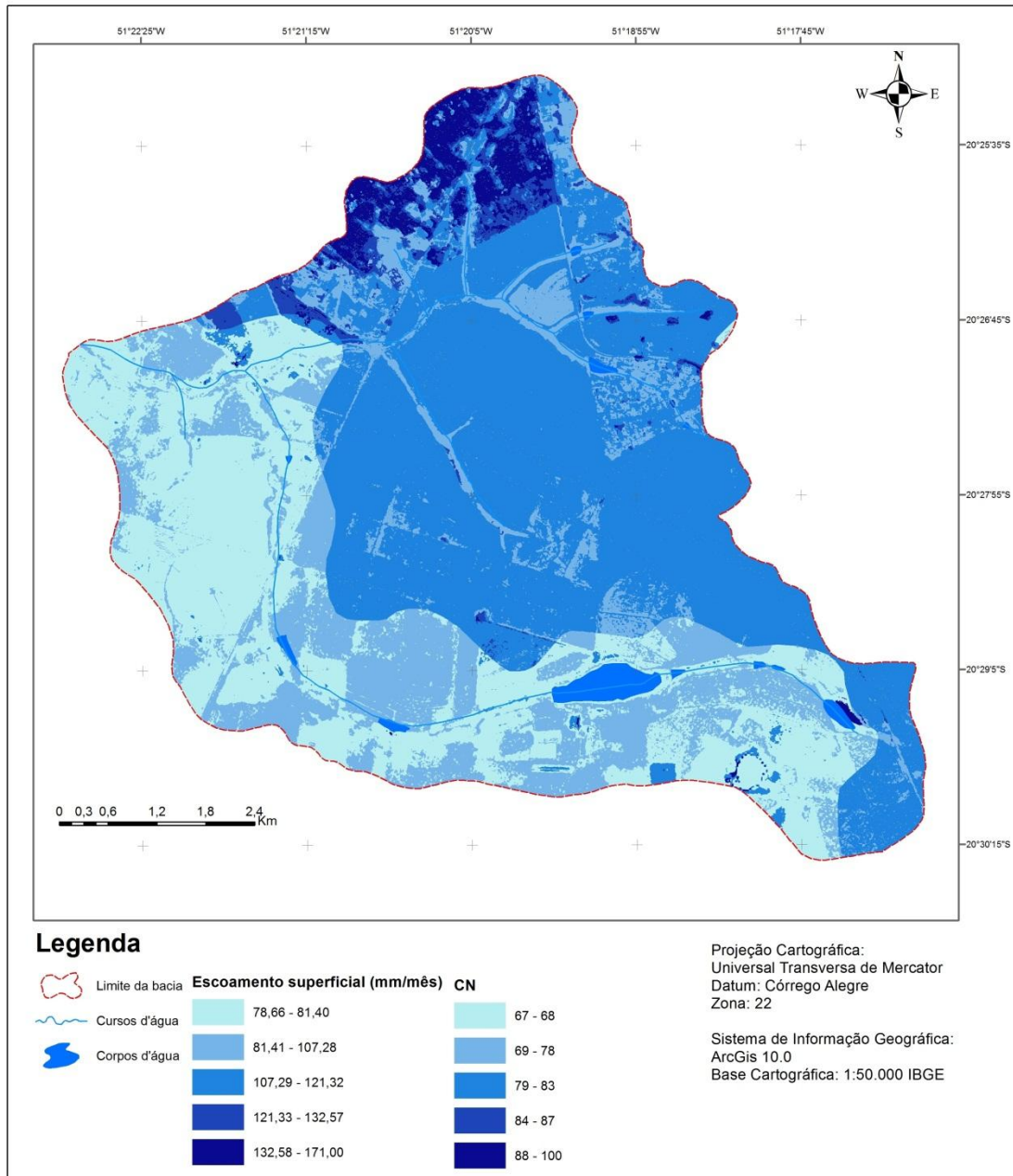
6.2.3 Cartas do CN de escoamento superficial, potencial de escoamento superficial e infiltração potencial baseada no método de Soil Conservation Service – SCS

As cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial tiveram como base a metodologia Soil Conservation Service – SCS. Este método permite estimar o máximo potencial de retenção na bacia com a determinação do parâmetro CN (*Curve Number*). Este índice está associado às condições de uso e ocupação da terra, ao tipo hidrológico do solo e à umidade antecedente. Seu valor pode variar entre 0 e 100, visto que quanto maior o valor, maior será o escoamento superficial.

Primeiramente foram elaborados os mapas de uso e ocupação da terra e tipos de solo para então elaborar-se a álgebra dos mapas que resultou na carta do CN de escoamento superficial representada pela figura 30. Nesta carta, observa-se a espacialização dos valores de CN obtidos a partir da tabela 12.

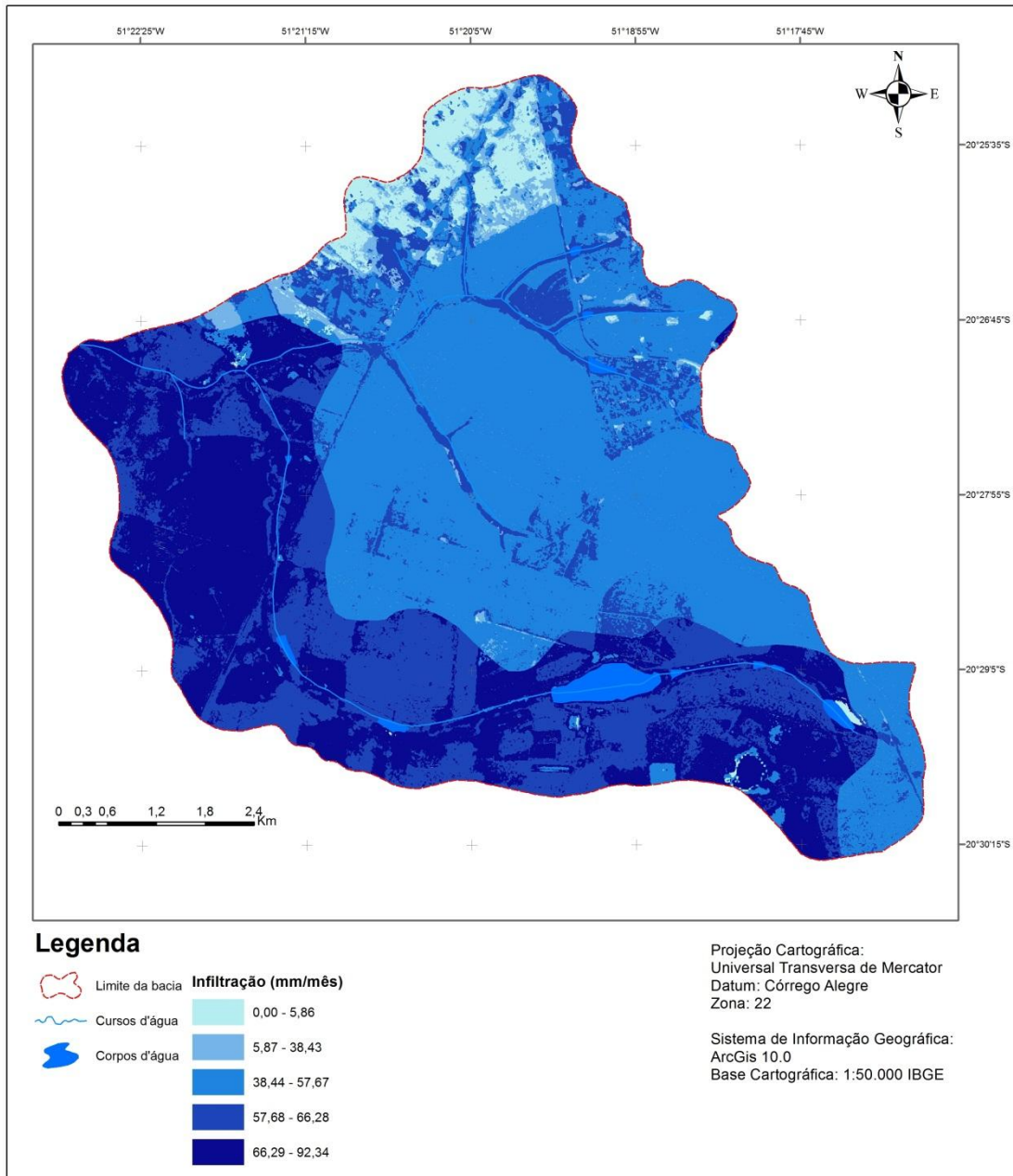
A partir desta carta, e da obtenção dos valores da capacidade máxima de saturação – S (determinados através da precipitação média mensal da bacia) foi possível à elaboração da carta de potencial escoamento superficial (figura 30). A carta de infiltração potencial (Figura 31) também foi elaborada a partir desta metodologia, utilizando a equação 7 que realiza uma relação entre a precipitação e o escoamento, tornando possível a determinação da infiltração.

Figura 30 – Cartas de potencial de escoamento superficial e valores de CN



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 31 – Cartas de infiltração potencial



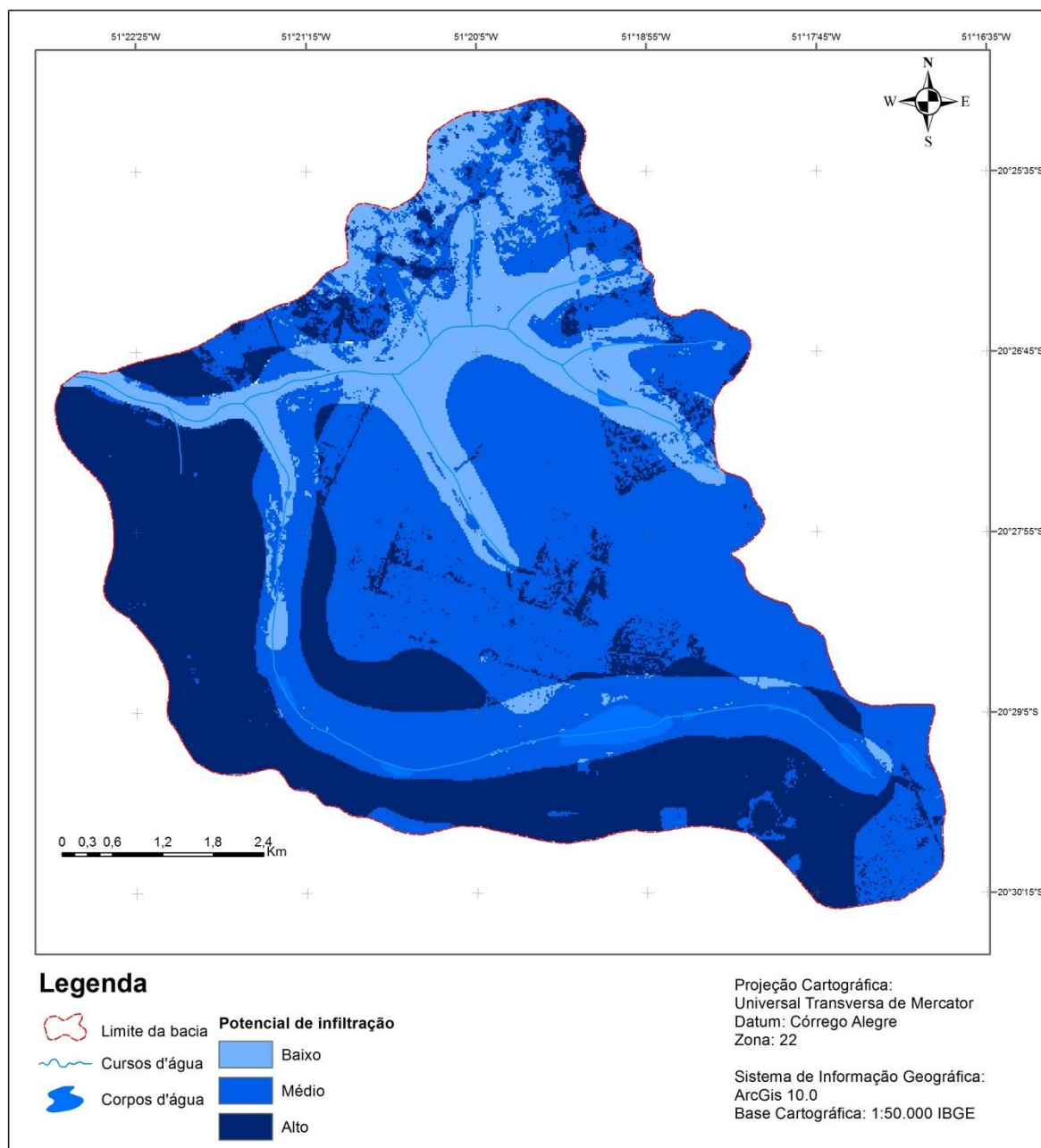
Fonte: Dados do próprio autor.

6.2.4 Carta de potencial de infiltração (SOARES et al., 2012)

A carta de potencial de infiltração (Figura 32) elaborada a partir da metodologia de Soares et al. (2012) permitiu identificar áreas com características físicas homologas que influenciam no processo de infiltração. Os procedimentos de aplicação desta metodologia assumem que é possível identificar e avaliar o potencial de infiltração em uma bacia

hidrográfica através da interação de dados de precipitação, elementos do meio físico e dados de uso e ocupação da terra.

Figura 32 – Carta de potencial de infiltração (segundo a proposta de SOARES et al., 2012)



Fonte: Dados do próprio autor.

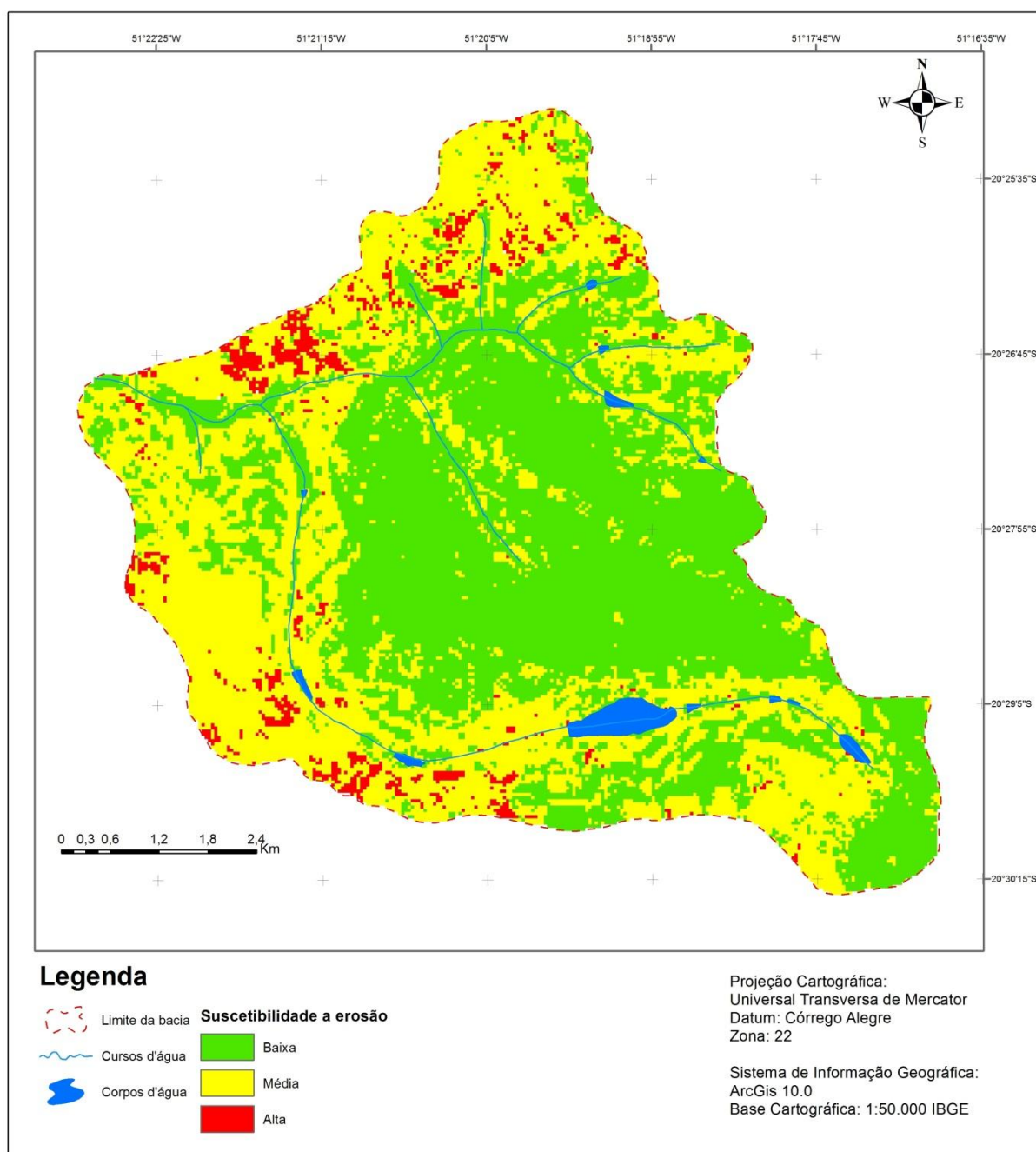
6.2.5 Carta de Suscetibilidade a erosão

A elaboração da carta de suscetibilidade a erosão (Figura 33) adveio a partir da integração dos atributos: declividade, geomorfologia, pedologia e informações sobre o uso e

ocupação da terra. Para cada classe dos atributos foi atribuído um valor referente a seu potencial de contribuição para os processos erosivos.

Assim, a carta de suscetibilidade a erosão tem como objetivo apresentar a classificação da área de pesquisa em baixa, média e alta suscetibilidade a processos erosivos.

Figura 33 – Carta de Suscetibilidade a erosão



Fonte: Dados do próprio autor.

6.3 Cartas de uso e ocupação da terra

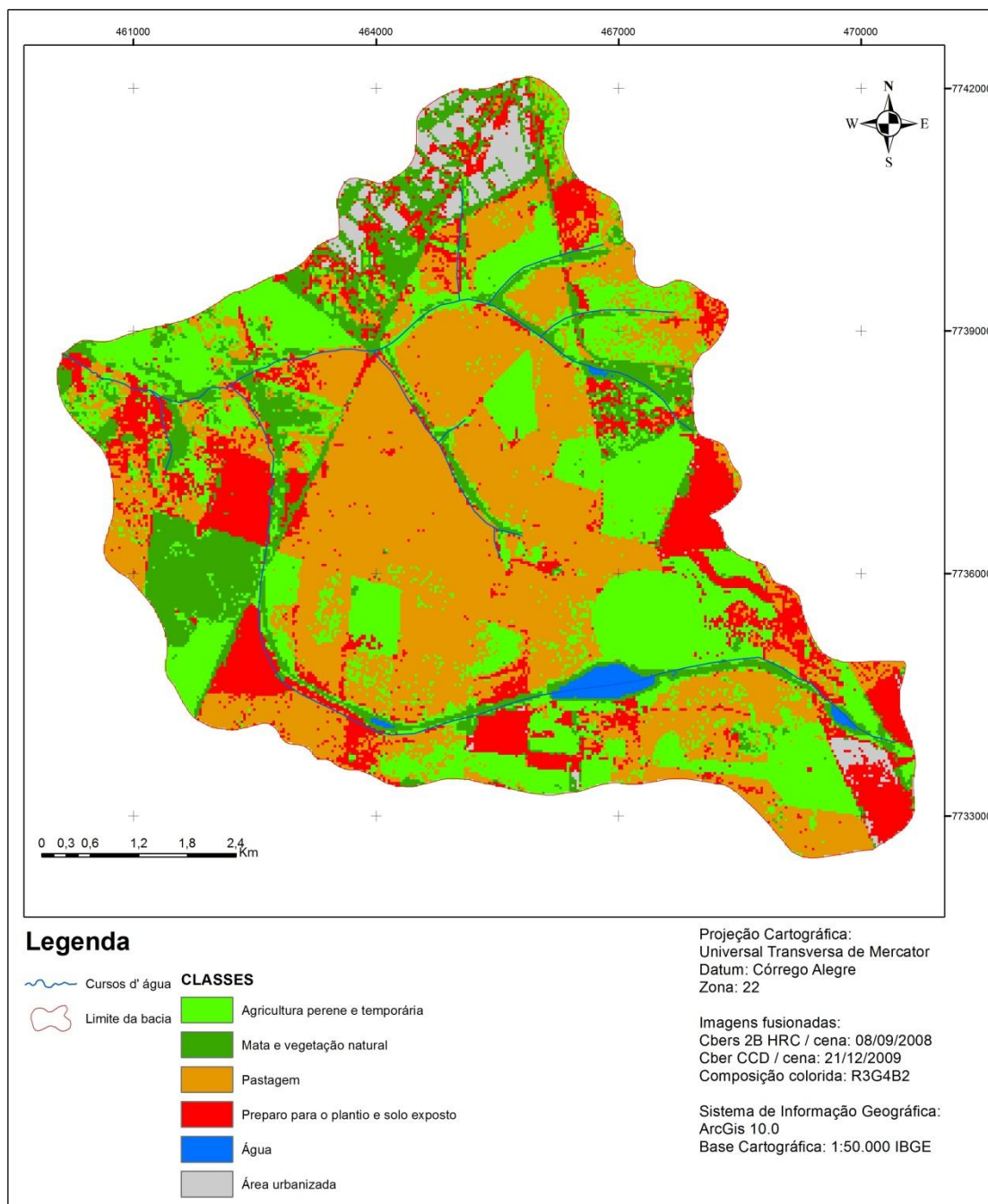
A caracterização de uso e ocupação da terra teve como objetivo identificar quais tipos de usos dados à bacia hidrográfica, constatados atualmente com imagens de satélite do ano de 2009 e comparar com a carta de uso e ocupação do solo elaborada com imagem do ano de 2001. Esta comparação, permite verificar as possíveis modificações e sua influência com o escoamento superficial e processos de degradação associados.

A carta de uso e ocupação da terra de 2001, representada pela figura 34, apresenta seis (6) classes identificadas de uso e ocupação da terra que incluem: agricultura perene e temporária, área urbanizada, mata e vegetação natural, pastagem, preparo para o plantio e solo exposto e água.

A carta de uso e ocupação da terra de 2009, representada pela figura 35, apresenta sete (7) classes identificadas de uso e ocupação da terra que incluem: agricultura perene e temporária, asfalto, telhado, mata e vegetação natural, pastagem, preparo para o plantio e solo exposto e água.

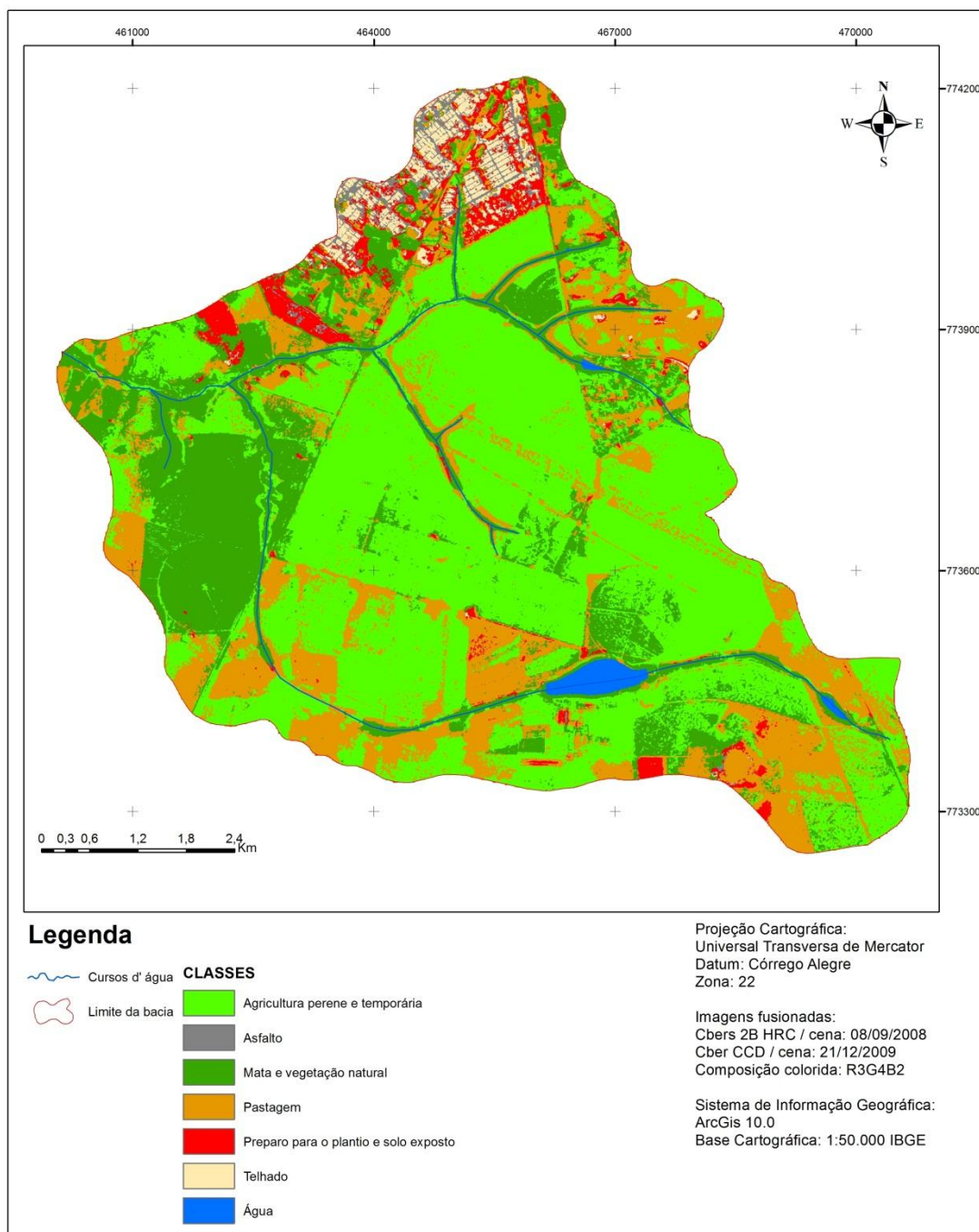
A classe área urbanizada da carta de uso e ocupação da terra de 2001 não foi detalhada em asfalto e telhado, como na carta de uso e ocupação da terra de 2009, devido aos níveis de detalhes da imagem utilizada não permitir tal detalhamento na classificação supervisionada.

Figura 34 – Cartas de uso e ocupação da terra – 2001



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 35 – Cartas de uso e ocupação da terra - 2009



Fonte: Dados do próprio autor.

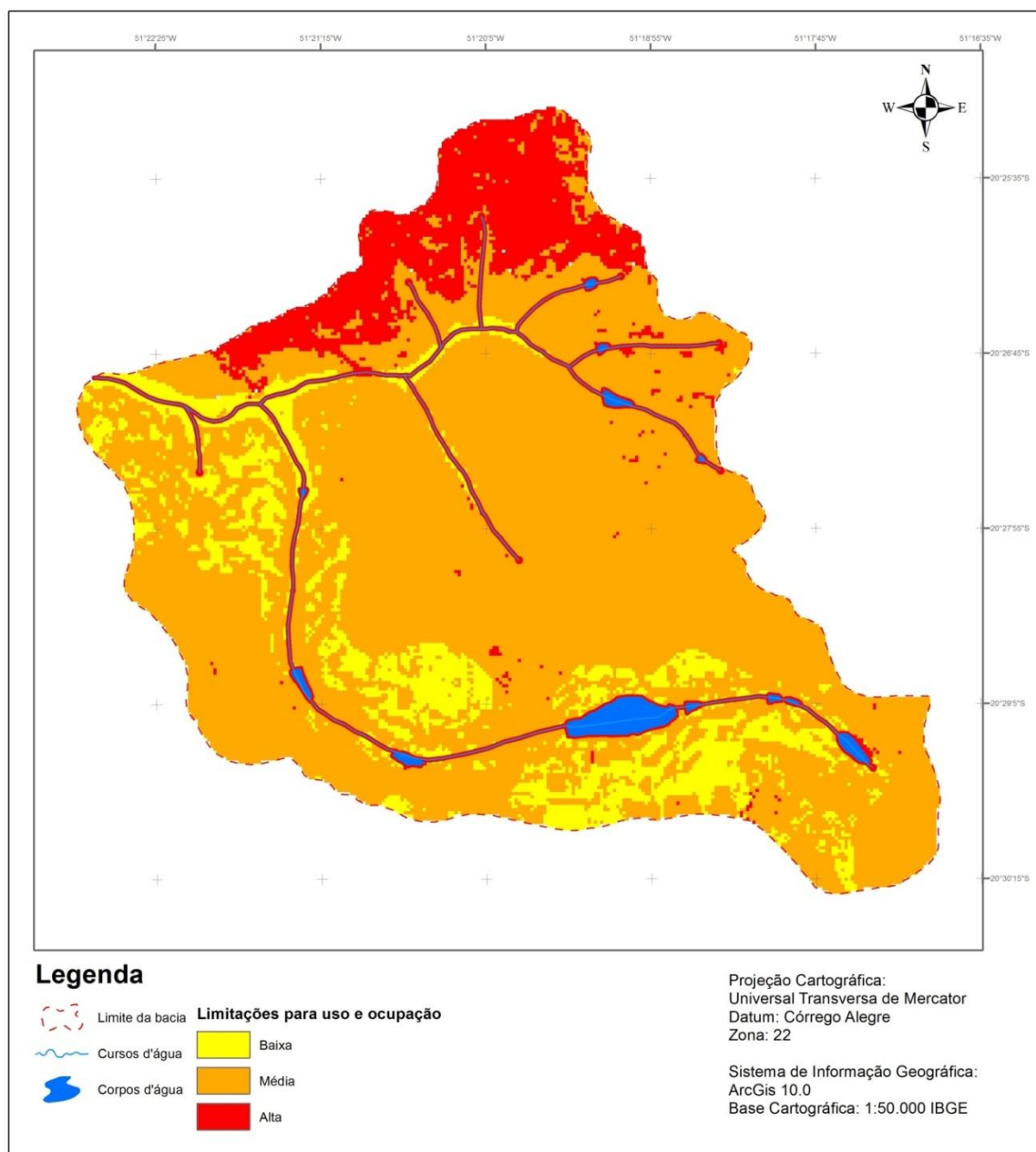
6.4 Carta de limitações para uso e ocupação

Para elaboração da carta de limitações para uso e ocupação (Figura 36) foram integradas as cartas de geomorfologia (unidades de terreno), suscetibilidade a erosão, bem como as cartas de escoamento superficial e potencial de infiltração, elaboradas através da aplicação do método Soil Conservation Service – SCS.

A delimitação das APP's – Áreas de Preservação Permanente contribui para este estudo, uma vez que faz referência a áreas que, de acordo com a legislação vigente, não podem ser ocupadas, e devem ser preservadas.

A álgebra de mapas, realizada com base no potencial de limitação para ocupação de cada classe dos atributos, possibilitou definir áreas com baixa, média e alta limitação para o uso e ocupação.

Figura 36 – Carta de limitações para uso e ocupação



Fonte: Dados do próprio autor.

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 *Uso e ocupação da terra*

Na carta de uso e ocupação da terra de 2009 as classes predominantes são agricultura perene e temporária, seguido por pastagens e mata e vegetação natural.

A maior diferença em relação às cartas é a classe de pastagem e preparo para o plantio e solo exposto, que em 2001 eram os tipos de uso e ocupação mais expressivos da bacia hidrográfica, e foram substituídos pela agricultura perene e temporária.

Este fato pode ser confirmado, pela expansão e intensificação do cultivo de cana de açúcar na região principalmente nos últimos 10 anos. De acordo com estudos de Palla et al. (2009), no município de Ilha Solteira a expansão da lavoura canavieira tem sido apontada como responsável pela redução das áreas de pastagens e também pela degradação da vegetação nativa, uma vez que em alguns locais esse cultivo é realizado em Áreas de Preservação Permanente.

Outra modificação é a aumento da área urbanizada na bacia hidrográfica em áreas de nascentes e fundos de vales. A partir de trabalhos de campo, pode-se visualizar que trechos da bacia do Córrego Sem Nome, que localiza-se na área urbana de Ilha Solteira não possui Área de Preservação Permanente preservada em muitos trechos. Este fato, colabora com aumento do escoamento superficial, que pode influenciar em processos de degradação, como erosões a jusante e o assoreamento das margens do Córrego.

Segundo Tucci (2003), a falta de critérios técnicos específicos para construção e manutenção dos sistemas de drenagem urbana acarretam diversos impactos que são transferidos de montante para jusante. Por exemplo, pelo escoamento superficial tem-se o aumento das frequências de enchentes e entupimento dos condutos e canais por sedimentos e conseqüentemente a degradação da qualidade da água.

A figura 37(A) apresenta um trecho do Córrego sem nome onde há lançamento da drenagem urbana, e percebe-se o início de processos erosivos nas margens do Curso d'água. A Figura 37(B) apresenta um exemplo de erosão que ocorre na bacia hidrográfica do Córrego Caçula mais precisamente nas margens do Córrego da Lagoa.

Figura 37 – Processos de degradação: Processos erosivos (A); Lançamento da drenagem urbana (B)



Fonte: Dados do próprio autor.

7.2 Carta de potencial de escoamento superficial preliminar – ArcHydro

A combinação da carta de fluxo acumulado com os dados pedológicos da área de pesquisa possibilita a geração de uma carta preliminar de escoamento superficial. Na área de pesquisa, encontram-se solos do tipo LV – Latossolo Vermelho e PVA – Argissolo Vermelho Amarelo, e na carta é possível observar que áreas com solo do tipo LV apresentam maior escoamento superficial devido a este tipo de solo apresentar solos de textura arenosa e perfis de solos bastante espessos.

O estudo mostrou que a utilização da ferramenta ArcHydro é eficiente no que diz respeito a uma caracterização preliminar (integração apenas de dados pedológicos e fluxo acumulado), isto porque apresenta áreas de acúmulo de fluxos, ou seja, áreas onde há maior probabilidade de ocorrência de processos de degradação, como por exemplo, ocupação de áreas passíveis de ocorrência de enchentes e processos erosivos.

Os processos erosivos são muito expressivos por toda a área de pesquisa, e desta forma, este estudo colabora com o diagnóstico de áreas com maior potencial para ocorrência destes processos a partir de dados mais detalhados de uso da terra e cartografia geotécnica de detalhe.

Nestas áreas diagnosticadas como suscetíveis a processos de degradação, recomenda-se a realização de estudos detalhados através da integração de novos atributos como, por exemplo, dados de uso e ocupação da terra, dados geológicos da área.

Outro resultado observado é a delimitação da rede de drenagem, que gera canais além dos existentes realmente na área. A partir de algumas funções disponíveis no ArcGis 10.0 é possível diminuir este erro e aproximar a drenagem da bacia da realidade. Porém, a drenagem gerada inicialmente representa áreas que, de acordo com o relevo da área, podem representar acúmulo de escoamento superficial e deste modo, áreas com maior potencial para processos de degradação do meio físico como enchentes.

7.3 Carta de potencial de escoamento superficial (PEJON; ZUQUETTE, 1993)

A metodologia empregada para elaboração da carta de potencial de escoamento superficial, segundo Pejon e Zuquette (1993), determina que os atributos textura e gênese, e permeabilidade apresentam maior influência no processo de escoamento superficial, de acordo com a ponderação definida pelos autores.

No entanto, para aplicação desta metodologia em bacias hidrográficas como a do Córrego Caçula, onde existem características importantes como a predominância de baixas declividades e substrato rochoso de baixa heterogeneidade, tais características deveriam ser consideradas na atribuição de pesos para o processo de escoamento superficial.

Esta supervalorização destes atributos, em decorrência das diferentes características da área de estudo e do local em que a metodologia foi aplicada pelos autores exacerbou a importância de alguns atributos, e isto deve ser revisto quando for utilizada para outras áreas de estudo.

Deve-se destacar também que a metodologia de Pejon e Zuquette (1993) não foi desenvolvida para ser aplicada em áreas urbanas e de expansão urbana, razão pela qual não considera em suas análises os atributos de uso e ocupação da terra como é observado na tabela 9.

A carta representada pela Figura 29 apresenta o comportamento do escoamento superficial na bacia hidrográfica que varia de baixo a alto. A álgebra de mapas realizada pelo ArcGis, apresentou-se como eficiente para este tipo de manipulação e, além disso, a utilização de diversas variáveis do meio físico integradas permitiu uma carta com alto nível de detalhes em relação ao potencial de escoamento superficial.

Na carta as áreas consideradas com alto potencial de escoamento superficial estão localizadas principalmente, nos fundos de vale e de forma expressiva na porção Norte da bacia. Isto ocorre devido à influência das variáveis: densidade de drenagem (entre 2 e 4

canais/km²), litologia (Basalto), permeabilidade (10⁻⁵m/s) e textura e gênese (solos LV - Latossolo Vermelho).

As áreas consideradas com menor potencial de escoamento superficial estão localizadas de forma expressiva na parte Sul da bacia sendo representativos os valores de ponderação atribuídos na álgebra de mapas às variáveis: densidade de drenagem (<2 canais/km²), litologia (Arenito), permeabilidade (10⁻⁴m/s) e textura e gênese (solos PVA – Argissolo Vermelho Amarelo).

7.4 Cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial (Soil Conservation Service – SCS)

As variações apresentadas na carta de escoamento superficial são provenientes dos tipos de ocupação associados aos tipos de solo da região. Nas áreas com maior índice de asfalto e telhados, ou seja, na área urbana da bacia os valores de CN apresentaram-se elevados, o que constitui os locais com maior escoamento superficial, e isto pode ser igualmente observado na carta de escoamento superficial, com valores de 132,58 a 171 mm/mês de escoamento superficial. Nessas áreas, tem-se os menores valores de infiltração, que variam de 0 a 5,86 mm/mês.

Em contrapartida, nas áreas com predomínio de vegetação são verificados os menores valores de CN, ou seja, menor escoamento superficial, com valores que variam de 81,41 a 121,32 mm/mês e maior infiltração potencial com valores que variam de 66,29 a 92,34 mm/mês.

Em relação aos tipos de solo, há uma divisão visível no mapa. Os valores mais altos de CN e potencial de escoamento superficial são verificados nas áreas da bacia de solos LV – Latossolo Vermelho, já os valores menores de CN e de maior infiltração potencial apresentaram-se em solos PVA – Argissolo Vermelho Amarelo.

O método SCS apresentou resultados satisfatórios, uma vez que as áreas classificadas segundo o potencial de escoamento superficial e infiltração potencial foram bem representadas e condizem com a realidade local. O ArcGis 10.0 permitiu a análise das informações obtidas através da manipulação e representação das variáveis.

A utilização das classes de uso e ocupação do solo, como uma das variáveis que possui peso significativo na representação e definição da dinâmica de escoamento e infiltração na bacia, permite influir sobre possíveis mudanças no uso e as consequências destas mudanças nestes processos.

Desta forma este método contribui com o planejamento territorial, podendo ser utilizado para determinar usos que mais se adequem a área de pesquisa, através da junção das características naturais da área e das atividades antrópicas. Podendo evitar, assim, processos de degradação do meio físico como erosões e assoreamento, bem como evitar ocupação de áreas que são passíveis de enchentes, que afetam a qualidade de vida da população.

7.5 Carta de potencial de infiltração (SOARES et al., 2012)

A carta de potencial de infiltração apresenta áreas bem definidas, em relação ao potencial de infiltração na bacia hidrográfica em função das variáveis utilizadas: geologia, geomorfologia, pedologia, uso e ocupação da terra e precipitação (considerada homogênea na bacia hidrográfica).

As áreas consideradas com alto potencial de infiltração estão concentradas principalmente na região Sul da bacia, devido ao tipo de solo desta área (PVA – Argissolo Vermelho Amarelo) e unidades de terreno predominantes nessa área A2, B2 e B3, favorecerem esse processo. Estas áreas também possuem grandes partes cobertas por agricultura perene e temporária e matas e vegetações naturais, o que favorece o processo de infiltração.

A região dos fundos de vale, possui baixo potencial de infiltração, e este fato está relacionado com a geologia (Basalto) e unidades de terreno predominantes B1 e B3 e pedologia. Áreas com baixo potencial de infiltração também estão localizadas na parte Norte da bacia, onde se encontra a área urbanizada, com ênfase nos telhados e asfalto.

A metodologia de Soares et al. (2012) para determinação de áreas homólogas de infiltração utiliza informações relativas às características físicas da bacia bem como a classificação do uso e ocupação do solo, ou seja, a influência da ação antrópica no processo de infiltração. É possível deste modo, determinar as áreas homólogas de infiltração com base em um maior número de características naturais da área, e assim obter um resultado mais próximo da realidade local e dos processos de dinâmica superficial e degradação.

O Software ArcGis 10.0 permitiu a realização da álgebra dos atributos utilizados de acordo com a metodologia de forma rápida e eficiente.

7.6 Carta de Suscetibilidade a erosão

A carta de suscetibilidade a erosão apresenta áreas classificadas em alta, média e baixa potencialidade a processos erosivos, a partir da integração de informações pedológicas, declividade, geomorfologia e tipos de uso e ocupação da terra da área de pesquisa de acordo com a relevância de suas classes nos processos erosivos.

Como resultado, a carta revela que a região em sua maior parte é classificada em baixa e média suscetibilidade a erosão. As áreas ao sul foram classificadas com alta e média suscetibilidade a erosão, apesar de serem áreas com ocupação urbana. Isto ocorreu, porque foi atribuído peso dois (2) à estas classes e também a unidade de terreno A2 predominante nesta área e ao tipo de solo LV – Latossolo Vermelho.

As áreas na região Sudoeste também apresentam alta e média suscetibilidade à erosão, e este fato é explicado em virtude de áreas abrangentes de pastagens simultaneamente com unidades de terreno A2.

As áreas apresentadas com baixa suscetibilidade à erosão, estão localizadas principalmente na área central e ao Leste da bacia hidrográfica. Esta classificação é explicada devido às baixas declividades encontradas nestes locais e o uso e ocupação com cobertura predominante de agricultura perene e temporária, que protege o solo impede (se ocorrer com manejo adequado) a ocorrência dos processos erosivos.

7.7 Carta de limitação para uso e ocupação

A carta de limitação para uso e ocupação apresenta áreas classificadas em baixa, média e alta limitação.

As áreas classificadas com baixa limitação estão localizadas na região Sul da bacia hidrográfica, em virtude da alta suscetibilidade a erosão nestas áreas, unidades de terreno A2 e A1 e taxas médias de escoamento superficial. Estas áreas, devem ter os recursos naturais explorados com consciência, para evitar a degradação dessas áreas, e isto deve ser destacado para um futuro planejamento territorial.

As áreas classificadas com média limitação estão concentradas na área central Sul da bacia. Estas áreas, possuem de média a baixa suscetibilidade a erosão, unidades de terreno B2 que possui alto potencial erosivo, e taxas médias e altas de escoamento superficial. Estas áreas são ocupadas principalmente por agricultura perene e temporária, e em grande parte é utilizada para cultura de cana-de-açúcar.

Em função do potencial de escoamento superficial ser considerado de médio a alto nestas áreas, é recomendado que sejam construídos os terraços em nível para contenção do escoamento superficial da água das chuvas. Para controlar e evitar os processos erosivos os usos que são recomendados incluem a implantação de plantio direto, cultura em faixas, rotação de culturas, e faixas de vegetação nativa no meio dos canaviais. Através das práticas conservacionistas que mantenham a cobertura do solo, os processos erosivos e o carreando de sedimentos para os cursos d'água serão evitados.

Nas áreas consideradas com alta limitação para uso ocorre a expansão urbana, porém para um futuro planejamento territorial deve-se investir em preencher os vazios urbanos, a fim de evitar a ocupação indevida de outras áreas.

Estas regiões possuem baixo potencial de infiltração e é recomendado aplicar medidas não estruturais e estruturais para minimizar o impacto do escoamento superficial da água das chuvas que possibilita a ocorrência de enchentes e prejudicam a qualidade de vida da população. Estas medidas incluem: a educação ambiental em toda a bacia hidrográfica, os mapas de inundação para evitar a ocupação destas áreas, práticas agrícolas corretas e reflorestamento da bacia.

As Áreas de Preservação Permanente - APPs devem ser protegidas de acordo com a legislação, porém em muitos trechos dos Córregos da bacia elas são inexistentes ou aparece fragmentadas, o que contribui com o assoreamento dos rios e poluição da rede de drenagem. Estas áreas devem ser conservadas e protegidas a fim de evitar estes processos de degradação. Para isso, recomenda-se um trabalho em conjunto com os produtores rurais com objetivo de orientar a necessidade de implantação das APPs. E isto pode ser realizado concomitantemente com a educação ambiental em escolas, igrejas e associações comunitárias, para explicação da importância do manejo integrado da bacia hidrográfica.

A participação pública é fundamental para que estas propostas sejam efetivadas, uma vez que é a população responsável por denunciar, fiscalizar e exigir ações e projetos dos órgãos públicos para melhoria da situação ambiental da bacia. Estas ações devem ser incentivadas principalmente pela prefeitura de Ilha Solteira, secretarias do meio ambiente, Comitê de Bacias Hidrográficas, dentre outros possíveis colaboradores.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na revisão bibliográfica é possível verificar os métodos para estimativa do escoamento superficial. Neste trabalho, foram empregados especificamente o método de estimativa do escoamento superficial a partir das características físicas da área de pesquisa a partir das propostas metodológicas de (PEJON; ZUQUETTE, 1993; SOARES et al., 2012).

O método de Curva-Número – CN foi utilizado dentre as técnicas para estimar o potencial de escoamento superficial a partir de modelos hidrológicos tradicionais e a ferramenta ArcHydro do Arcgis 10.0 foi empregada para estimar o escoamento superficial preliminar.

Em relação às metodologias propostas, pode-se concluir que as ferramentas do ArcHydro possibilitaram a elaboração da carta de fluxo acumulado, ou seja, áreas onde há maior probabilidade de ocorrência de processos de degradação, como por exemplo, locais favoráveis para enchentes e processos erosivos. Esta carta integrada com a carta pedológica da área de pesquisa resultou na carta de potencial de escoamento superficial preliminar, que pode ser utilizada para proposição de áreas fragilizadas que devem ser analisadas com maior detalhamento.

A metodologia proposta por Pejon e Zuquette (1993) possibilitou a determinação de áreas com potencial de escoamento superficial baixo, médio e alto com base nas características naturais da área. As áreas determinadas condizem com a realidade local, porém há uma supervalorização na atribuição de pesos dos atributos textura e gênese, e permeabilidade, que pode comprometer a qualidade dos resultados.

Como sugestão, para bacias hidrográficas como a estudada neste trabalho, que tem como características importantes à predominância de baixas declividades e substrato rochoso de baixa heterogeneidade, a atribuição dos pesos deve ser revisada.

A proposta de Soares et al. (2012) para determinação de áreas homólogas de infiltração obteve êxito uma vez que este estudo pode indicar áreas com maior suscetibilidade a inundação (baixo potencial de infiltração) e que devem ser analisadas com maior detalhamento tanto no caso de áreas que ainda não foram ocupadas quanto nas áreas onde há ocupação urbana, uma vez que as inundações podem comprometer a qualidade de vida da população.

O método de Curva-Número desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS possibilitou elaborar as cartas de potencial de escoamento superficial e infiltração potencial sendo observada a contribuição da área urbanizada na potencialização destes processos.

As diversidades apresentadas na carta de escoamento superficial são provenientes dos tipos de ocupação associados aos tipos de solo da região. Na região são verificados dois tipos de solo (LV – Latossolo Vermelho e PVA – Argissolo Vermelho Amarelo), cada tipo de solo apresenta como característica hidrológica comportamentos que favorecem mais o escoamento superficial e menos a infiltração.

Este comportamento, observado nas cartas, é compatível com as observações do meio físico da bacia. As regiões com valores mais altos de escoamento superficial são verificados nas áreas da bacia de solos LV – Latossolo Vermelho, já os valores mais baixos de escoamento superficial, e de maior infiltração potencial apresentaram-se em solos PVA – Argissolo Vermelho Amarelo.

O uso dos dados do Projeto Topodata para caracterização do meio físico produziu resultados eficientes para descrever as condições do meio natural da área, e teve como resultado informações mais confiáveis para caracterização do meio físico, em especial em escalas de maior detalhe.

A adoção do software ArcGis para manipulação das informações permitiu, através da representação cartográfica dos atributos geomorfológicos e hidrológicos, a caracterização das condições de dinâmica superficial e relacionamento destes atributos com os processos de degradação do meio físico diagnosticados na bacia hidrográfica.

A álgebra das cartas dos atributos através do Software possibilitou uma análise abrangente e detalhada através da geração das cartas derivadas com alta qualidade das informações e por ser uma ferramenta eficaz e viável.

A utilização das imagens de satélite gratuitas (Cbers e Landsat) mostrou-se eficiente para a identificação das classes de uso e ocupação da terra de 2001 e 2009, porém para próximos trabalhos indica-se, sempre que possível, a classificação a partir de imagens de alta resolução. As imagens de alta resolução permitem um mapeamento com maior nível de detalhes que contribuem com as análises.

A carta de suscetibilidade a erosão representou o comportamento atual da bacia hidrográfica em relação às respostas dos processos de uso da terra no meio físico natural, possibilitando conhecer regiões que apresentem alta suscetibilidade à erosão, bem como áreas potencialmente estáveis, para fins de planejamento territorial.

Em conjunto com essa classificação foram propostas limitações para o uso e ocupação, bem como tipos de uso que são indicados para cada área diagnosticada. As áreas consideradas como alta limitação para uso e ocupação estão localizadas na área urbana e de expansão

urbana, estas regiões apresentam solos de textura arenosa e perfis de solos bastante espessos, maior potencial de escoamento superficial e condições muito favoráveis a processos erosivos.

Essas áreas encontram-se ocupadas, sendo assim, a sugestão é que seja aplicada a educação ambiental com objetivo de orientar a população sobre a importância do manejo de bacias hidrográficas, e da ocupação dos vazios urbanos através de um planejamento visando a melhor relação entre a sociedade e o meio ambiente.

Nesse contexto, esta caracterização do meio físico da área visa contribuir com o planejamento territorial através da definição de critérios para a ocupação das áreas com base nos atributos do meio físico, e dos processos de dinâmica superficial.

Desta forma, este estudo pode colaborar para que sejam previstos no Plano Diretor estes critérios de ocupação urbana que levem em consideração as condições naturais. Para isso, a participação pública é essencial nas questões ambientais seja através de projetos de educação ambiental ou de associações de bairro que lutem para que estas propostas sejam efetivadas proporcionando um meio ambiente mais saudável.

REFERÊNCIAS

ALVES T. S.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010.

AMORIM, L. M.; CORDEIRO, J. S. **Impactos ambientais provocados pela ocupação antrópica de fundo de vale**. 2004. 302 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2004.

ARCHYDRO Tools: tutorial. New York: ESRI, 2009. 136 p.

BARRETO-NETO, A. A; SOUZA FILHO, C. R. Modelagem dinâmica de escoamento superficial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2427-2434.

BARTH, F. T.; POMPEU, C. T.; FILL, H. D.; TUCCI, C. M.; KELMAN, J.; BRAGA, B. P. F. **Modelos de gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre: Universidade/UFRGS/ABRH, 1997. 526 p. (Coleção ABRH de Recursos hídricos.).

BONETTI, F. J.; MIRANDA, L. B. Estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape. **Revista Brasileira de Oceanografia**, São Paulo, v. 45, n.2, p. 89-94, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portal Datasus**: informações de saúde. São Paulo: Departamento de Informática do SUS, 2013. Disponível em: <<http://www2.datasus.gov.br/DATASUS/index.php>>. Acesso em: 5 mar. 2013.

BROOKS, K. N.; FFOLLIOTT, P. F.; GREGERSEN, H. M.; THAMES, J. L. **Hydrology and the management of watersheds**. Ames: Iowa State University, 1991. 392 p.

CAMARGO, M. U. C. **Os sistemas de informações geográficas como instrumento de gestão em saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 1997. 224 p.

CAMARINHA, P. I. M. **Mapeamento do potencial de infiltração como subsídio ao planejamento de microbacias de cabeceira**: uma proposta metodológica utilizando Geotecnologias. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011.

CONSÓRCIO INTERMUNICIPAL PARA O DESENVOLVIMENTO DA IRRIGAÇÃO NA REGIÃO DE URUBUPUNGÁ- CINDIRU. **Minuta do termo de referência para o estudo de viabilidade técnica, econômica e social para o desenvolvimento da agricultura irrigada na Região de Urubupungá**. Ilha Solteira: CINDIRU, 1995. 32 p.

COLLISCHONN, W.; KAYSER, R.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M. **Manual de discretização de bacias para aplicação do modelo MGB-IPH.**: projeto integrado de cooperação Amazônica e de modernização do monitoramento hidrológico. Porto Alegre: FINEP/ANA/IPH-UFRGS, 2009. 50 p.

CONOSCENTI, C.; DI MAGGIO, C.; ROTIGLIANO, E. Soil erosion susceptibility assessment and validation using a geostatistical multivariate approach: a test in Southern Sicily. **Natural Hazards**, Dordrech, v. 46, n. 3, p. 287-305, 2008.

COSTA, F. R.; SILVA, S. M. P. Sensoriamento remoto e SIG na análise multitemporal do uso e ocupação do solo no Município de Mossoró - RN. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2., 2004, Aracaju . **Anais...** Sergipe: Aracaju , 2004. Disponível em < <http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr2/pdfs/poster22.pdf> > Acesso em: 1 jun. 2013.

CRUZ, S. P. **Avaliação da degradação do meio físico por áreas de empréstimo usando geoindicadores e sistema de informações geográficas - área urbana de Ilha Solteira (SP).** 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

CULSHAW, M. G.; PRICE, S. J. The 2010 Hans cloos lecture: the contribution of urban geology to the development, regeneration and conservation of cities. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Heidelberg, v. 70, n. 3, p. 333–376, 2011.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL- CETESB. **Drenagem urbana:** manual de projeto. São Paulo: DAEE-CETESB, 1979. 476 p.

DE DIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista de Geografia**, São Paulo, v. 6, n. 5, p. 45-53, 1992.

DIBIESO, E. P. **Planejamento ambiental da bacia hidrográfica do Córrego do Cedro – Presidente Prudente/SP.** 2007. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, 2006.

FARIA, L. F. T. D. **Otimização de estudos de inventário hidroelétricos.** 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro, 2012.

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 e Tecnologia**, Piracicaba, v.7, n. 14, p. 45-56. 1999.

FONSECA, G. P. S. **Análise da poluição difusa na bacia do Rio Teles Pires com técnicas de geoprocessamento**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso, Mato Grosso. 2006.

GONZAGA, M. L.; CARVALHO, A. G. B. M.; LOLLO, J. A.; MATSUMOTO, T. Uso e ocupação do solo e qualidade da água de mananciais superficiais: córrego sem nome, Ilha Solteira (SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 7., 2010, Maringá. **Anais...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2010. p. 1-15. 1 CD-ROM.

GONZAGA, M. L. **Dinâmica ambiental da bacia hidrográfica do Córrego da Onça (Três Lagoas / MS): o uso do solo e a legislação pertinente** – Ilha Solteira. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA, D. D. Avaliação de um modelo para a estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 411-417. 2001.

GRIFFITHS, J. S.; STOKES, M. Engineering geomorphological input to ground models: an approach based on Earth systems. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v. 41, n.1, p.73-91, 2008.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000.

GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 15-55.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE. **Dados demográficos e econômicos – município de Ilha Solteira**. Brasil: IBGE, 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 5 mar. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **MANUAIS TÉCNICOS EM GEOCIÊNCIAS- IBGE. Manual técnico de uso da terra**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006. 91 p.

ILHA SOLTEIRA. Lei complementar nº 151 de 01 de Julho de 2008. Institui o Plano Diretor do Município de Ilha Solteira, cria o Conselho da Cidade e dá outras providências. **Lei**

orgânica do município de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2008. 142 p. Disponível em: <
<http://www.ilhasolteira.sp.gov.br/planodiretor/images/Leic-151.pdf>>. Acesso em: 22 nov.
 2012.

KORTE, G. B. **The GIS book: how to implement, manage, and assess the value of Geographic Information Systems**. 5. ed. Canada: On Word, 2001. 216 p.

LOLLO, J. A. **Avaliação do potencial de utilização de redes neurais artificiais no processo de avaliação do terreno com vistas à caracterização do meio físico**. Ilha Solteira: UNESP- FE, 1999. 88 p. (Relatório de Pesquisa FAPESP, processo nº 1996/07608-7, 1999).

LOLLO, J. A. Caracterização geotécnica da área de expansão urbana de Ilha Solteira (SP) com o uso de formas de relevo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 3., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 1998. 1 CD-ROM.

LOLLO, J. A.; GEBARA, D. Caracterização do meio físico da área de implantação do aterro sanitário de Ilha Solteira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., 1999, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 1999. p. 63-69.

LOLLO, J.A. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração de mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação para a quadrícula de Campinas (SP)**. 1996. 267 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

MAIDMENT, D. R. **ArcHydro: GIS for water resources**. Redlands California: ESRI, 2002. 203 p.

MARTIN-DUQUE, J.F.; PEDRAZA, J.; SANZ, M.A.; BODOQUE, J.M.; GODFREY, A.E.; DIEZ, A.; CARRASCO, R.M. Landform classification for land use planning in developed areas: an example in Segovia Province (Central Spain). **Environmental Management**, New York, v. 32, n. 4, p. 488-498, 2003.

MENDES, R. M.; LORANDI, R. Geospatial analysis of geotechnical data applied to urban infrastructure planning. **Journal of Geographic Information System**, Irvine, v. 2, n.1, p. 23-31, 2010.

MENDONÇA, M.; LORANDI, R. Proposta metodológica para identificação do conflito de uso a partir do potencial de escoamento superficial. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 10., 2006, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2006. Disponível em: <
[http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20\(resumos\)/Congresso_Actas%20\(D\)/Volume%201/V1-08.pdf](http://geomuseu.ist.utl.pt/OG2009/Documentos%20Complementares/Congresso%20Geotecnia%20(resumos)/Congresso_Actas%20(D)/Volume%201/V1-08.pdf)> Acesso em: 22 maio 2013.

MOTA, S. **Planejamento urbano e preservação ambiental**. Fortaleza: UFC, 1981. 242 p.

MOTA, S. **Preservação e conservação de recursos hídricos**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 187 p.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M.; WEILL, M. A. M. Estudo das relações solo-relevo pela análise geomorfométrica de dados SRTM e TOPODATA e a técnica de recuperação de conhecimento a partir de mapas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 9261-9268.

NOVO, E.L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008. 388 p.

OLIVEIRA, V. P. S.; ZANETTI, S. S; AZEVEDO, H. J; SOUSA, E. F; ALMEIDA, F. T. Avaliação do coeficiente de escoamento superficial em microbacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34., 2005, Canoas. **Anais...** Canoas: SBEA, 2005. Disponível em: < <http://www.pesca.iff.edu.br/pesquisa/gestao-dos-recursos-hidricos-2012/varre-sai/R0077-1.pdf>> Acesso em: 22 maio 2013.

PAIVA, A. C.; NETO, H. M.; ZULIANI, M. A. **Sistema de informação geográfica - SIG como instrumento para gestão de bacia hidrográfica estudo de caso: unidade de gerenciamento de recursos hídricos 22 (UGRHI 22)**. 2000. 223 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Cartográfica)- Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

PALLA, G. O.; SILVA, G. N. R.; SILVA, H. R.; MARQUES, A. P.; HOLANDA, H. V.; ASTOFI, T. B.; ZOCOLER, J. V. S; CÉZAR, F. R. G. Potencial de expansão da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) no município de Ilha Solteira/SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 4218-4224.

PEJON, O. J.; SILVEIRA, L. L. L. Index properties to predict erodibility of tropical soil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Heidelberg, v. 66, n. 2, p. 224-236, 2007.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. Carta de potencial de escoamento superficial da folha de Piracicaba/SP. **Revista de Geociências**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 1015-1023, 1993.

PICKBRENNER, K.; PEDROLLO, M. C.; RISSO, A. Determinação do CN utilizando geoprocessamento: simulação hidrológica na Bacia do Rio Criciúma. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005. Disponível em: <

<http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/pa/Determinacao%20do%20CN%20utilizando%20geo%20processamento.pdf> > Acesso em: 20 out. 2012.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

SANTANA, D. P. **Manejo integrado de bacias hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63 p.

SANTIM, T. G. S. **Uso de geotecnologias na análise temporal dos impactos da urbanização na sub-bacia do Córrego Sem Nome em Ilha Solteira/SP**. 2010. 228 f. Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2004. 184 p.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. **Os sistemas de informação geográfica na modelação hidrológica**. Granada: Universidade de Granada, 2008. Disponível em: < http://age.ieg.csic.es/metodos/docs/XII_1/033%20-%20Santos%20et%20al.pdf>. Acesso em: 25 maio 2012.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DE SÃO PAULO- SIGRH. **Comitê de Bacia Hidrográfica do São José do Dourados**. São Paulo: Comitê de Bacia Hidrográfica do São José do Dourados, 2013. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: 21 abr. 2012.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Louisiana: Water resources publications, 1995. 1130 p.

SILVA, R.; CERQUEIRA, E. G. **O Impacto da expansão sobre a drenagem: estudo de caso Lauro de Freitas – BA**. Salvador: UCSAL, 2010. Disponível em: < http://info.ucsal.br/banmon/Arquivos/Art3_0074.pdf>. Acesso em: 16 out. 2012.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; TRANNIM, J. C. B. The definition of potential infiltration areas in Guaratinguetá watershed, Paraíba do Sul Basin, Southeastern Brazil: an integrated approach using physical and land-use elements. **Environmental Earth Sciences**, New York, v. 67, n. 6, p.1685-1694, 2012.

SOUZA, T. F. **Drenagem urbana sob cenários de longo prazo visando incentivos ambientais**. 2008. 253 f. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SURIYA, S.; MUDGA, B.V. Impact of urbanization on flooding: the thirusoolam sub watershed – a case study. **Journal of Hidrology**, Chennai, v. 412-413, n. 1, p. 210-219, 2012.

TAVARES, A. B. **Avaliação da degradação do meio físico por áreas de empréstimo utilizando geoindicadores e sistema de informações geográficas: área de expansão urbana de Ilha Solteira (SP)**. 2008. 172 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: _____. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 1995. 428 p.

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

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – SOIL- USDA-SCS – CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook: hydrology section**. Washington: USDA, 1972.

UTEXAS. **Archydro: gis for water resources**. Texas: Texas University, 2012. Disponível em: <<http://www.crrw.utexas.edu/gis/archydrobook/ArcHydroTools/Tools.htm>>. Acesso em: 25 maio 2013.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **TOPODATA: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais, 2010. 74 p.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. 75 p.

WHITEAKER, T. **Hidrologic simulation with Archydro, libhydro, and model builder**. Texas: Texas University, 2012. Disponível em: <<ftp://ftp.crrw.utexas.edu/ArcHydrolibhydroandmodelbuilder.doc>>. Acesso em: 30 maio 2013.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia geotécnica**. São Paulo: Oficina de textos, 2004. 500 p.