

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA - BASINS 3.0 NA
MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA EXPERIMENTAL DO RIO
PARDO, SP.**

CAETANO HENRIQUE GROSSI

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA - BASINS 3.0 NA
MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA EXPERIMENTAL DO RIO
PARDO, SP.**

CAETANO HENRIQUE GROSSI

Orientador: PROF.^a DR.^a CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP
Janeiro – 2003

OFEREÇO

A Deus que me deu saúde e paz para poder chegar até aqui.

Aos meus pais,

Renato Grossi e Rute de Lourenço Grossi que sempre me apoiaram e me incentivaram em todas as etapas da minha vida.

Aos meus irmãos,

José Grossi Neto, Renato Grossi Júnior, Rute Elizabete Grossi, Paulo Sérgio Grossi e Luís Carlos Grossi pelo convívio familiar.

DEDICO

A Evelin Maria Dias,

minha namorada e melhor amiga, pelo apoio, estímulo e sobretudo pela paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu pela oportunidade da realização do Curso de Pós-Graduação.

À Prof^ª. Dr.^a Célia Regina Lopes Zimback pela orientação e acima de tudo pela amizade, confiança e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Kléber Pereira Lanças, coordenador do Curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro.

Aos professores Dr. Angelo Catâneo, Dr.^a Maria de Lourdes Conte e Dr. Sérgio Lázaro de Lima pelas sugestões apontadas e pela amizade compartilhada.

À Geógrafa Dr.^a Ligia Barrozo Simões e ao Eng.^o Florestal Dr. Edson Luis Piroli pela amizade e pelos ensinamentos passados no decorrer deste trabalho.

Aos amigos Edmilson Renato Silva Ruiz, Francisco Faggion, Maurício Javier de León, Moizéis Silva Nery, Renato Lara de Assis, Renildo Luís Mion e Wellington Pereira Alencar de Carvalho pela convivência saudável e pelo aprendizado em todos os momentos da nossa amizade.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento André Orsi, Débora Rosa Rafaelli, Ivana Fúrio Batista, João Batista Tolentino Rodrigues, João Lopes de Oliveira Filho, Juliana Aguiar Vetoratto, Luciana Corpas Bucene e Rodrigo Lilla Manzione pelo companheirismo e pelo auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Recurso Naturais – Ciência do Solo.

Ao Departamento de Ciências Ambientais pela concessão dos dados climatológicos.

Às funcionárias da seção de Pós-Graduação: Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende e Jaqueline de Moura Gonçalves pela eficiência no atendimento prestado.

Aos funcionários do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação pelos serviços prestados.

À Nancy Sammons (Blackland Research Center, Texas, USA) pelo auxílio na utilização do programa de modelagem hidrológica SWAT.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE QUADROS	X
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. REVISÃO DE LITERATURA	8
4.1. Bacia hidrográfica	8
4.2. Sistemas de informações geográficas (SIG)	14
4.3. Modelagem hidrológica	26
4.4. Investigação hidrológica x SIG – BASINS 3.0	27
5. MATERIAL E MÉTODOS	33
5.1. Descrição geral da área de estudo	33
5.2. Material	37
5.2.1. Material cartográfico	37
5.2.2. Mapa de solos	38
5.2.3. Imagens de satélite	38
5.2.4. Equipamentos	39
5.2.5. Programas utilizados	40
5.3. Métodos	40
5.3.1. Parâmetros dos solos	42
5.3.1.1. Análise granulométrica	42

5.3.1.2. Densidade do solo	43
5.3.1.3. Condutividade hidráulica	43
5.3.1.4. Capacidade de água disponível	44
5.3.1.5. Profundidade efetiva.....	44
5.3.1.6. Erodibilidade do solo	45
5.3.1.7. Albedo	45
5.3.1.8. Carbono orgânico	46
5.3.2. Parâmetros Climatológicos	47
5.3.2.1. Temperatura máxima e mínima.....	47
5.3.2.2. Precipitação	47
5.3.2.3. Quantidade máxima de chuva em 30 minutos.....	48
5.3.2.4. Radiação solar	48
5.3.2.5. Ponto de orvalho.....	48
5.3.2.6. Velocidade do vento.....	49
5.4. Modelo digital de elevação do terreno.....	49
5.5. Divisão da área de estudo em sub-bacias.....	51
5.6. Criação do banco de dados do solo.....	51
5.7. Definição do uso dos solos	51
5.8. O modelo SWAT	53
5.8.1. Produção de água	53
5.8.2. Escoamento superficial	54
5.8.3. Evapotranspiração.....	55
5.8.3.1. Evaporação potencial	55

5.8.3.2. Evaporação do solo	56
5.8.4. Transpiração das plantas	56
5.8.5. Percolação	57
5.8.6. Escoamento lateral	58
5.8.7. Escoamento de retorno.....	61
5.8.8. Produção de sedimentos.....	63
5.8.9. Propagação no canal	63
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
6.1. Modelagem espacial.....	65
6.2. Divisão da bacia hidrográfica	70
6.3. Parâmetros fisiográficos.....	77
6.4. Parâmetros hidrológicos e produção de sedimentos	81
7. CONCLUSÕES	87
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Ilustração de uma bacia hidrográfica.....	9
2. Base de dados gerada pelo SIG	18
3. Fluxograma de processamento do SWAT	30
4. Vista da nascente do Rio Pardo em Pardinho-SP	34
5. Área de captação da SABESP em Botucatu-SP	34
6. Localização da área de estudo	36
7. Mapa de solos da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.....	39
8. Cartas planialtimétricas da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	41
9. Imagem do satélite Landsat 5, bandas TM 3,4, e 5, com a definição da área de estudo.	52
10. Curvas de nível da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	66
11. Rede de drenagem da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	67
12. Modelo digital de elevação do terreno da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	68
13. Classes de declividade da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.....	69
14. Bacia Experimental do Rio Pardo-SP em 3D.....	70
15. Divisão da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP em sub-bacias.....	71
16. Mapa de solos predominante das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	73
17. Mapa da distribuição do uso do solo da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	74
18. Rio Pardo-SP, parcialmente assoreado.....	84
19. Ausência de mata ciliar às margens do Rio Pardo-SP	84

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1. Cartas planialtimétricas	38
2. Profundidades efetivas dos solos	45
3. Albedo para algumas coberturas do solo	46
4. Distribuição dos tipos de solos	72
5. Distribuição do uso dos solos e área.....	74
6. Distribuição do solo, uso dos solos e área para cada sub-bacia.....	76
7. Características físicas das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	79
8. Características do canal de drenagem das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	80
9. Características hidrológicas das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP....	83
10. Média mensal da simulação entre o período de 1997 a 2001 dos dados hidrológicos da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP	86

1. RESUMO

A disponibilidade de água doce na natureza é muito restrita sendo imprescindível sua preservação, controle e utilização racional. A constante destruição das matas ciliares associada ao aumento no uso de defensivos agrícolas tem colaborado para o transporte de resíduos e sedimentos para os rios causando, além do seu assoreamento, a poluição e a contaminação dos cursos de água.

Tendo em vista os problemas causados pelos escoamentos superficial e subsuperficial, fazem-se necessários estudos mais aprofundados sobre características hidrológicas e metodologias para o estudo. Com a utilização do SIG será possível desenvolver metodologias mais versáteis, buscando novas aplicações.

A área de estudo compreende a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, nos municípios de Botucatu e Pardinho, abrangendo uma área de 148,76 km². A finalidade do presente estudo é a integração entre um Sistema de Informação Geográfica e um programa de modelagem hidrológica para a obtenção de parâmetros hidrológicos e fisiográficos de uma bacia hidrográfica visando sua avaliação hidrológica. Esta integração além de facilitar a

análise de informações ambientais, também oferece suporte às tomadas de decisões envolvendo sistemas ambientais.

Os resultados obtidos permitiram concluir que: na maior parte das sub-bacias os limites de perdas de solo foram superiores aos limites admissíveis. As sub-bacias com predominância de solos podzólicos apresentaram as maiores perdas de solo. Nas sub-bacias com predominância de latossolos, e mais próximas à nascente do Rio Pardo, as perdas de solo foram menores, nas demais as perdas superaram a tolerância. Para o cálculo envolvendo toda a bacia, as perdas de solo foram quase que três vezes superiores ao limite admissível.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica, sistema de informação geográfica, BASINS 3.0.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM – BASINS 3.0 ON HYDROLOGICAL

MODELLING OF RIO PARDO EXPERIMENTAL WATERSHED, SP. Botucatu, 2003. 101p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: CAETANO HENRIQUE GROSSI

Adviser: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

2. SUMMARY

Fresh water disponibility in nature is very restrict, and requires preservation, control and rational use. Constant riparian forest degradation associate to increasing on agrochemical use have been collaborate to chemical and sediment flows to rivers, causing water pollution and contamination.

Due to problems caused by superficial and subsuperficial flow, it has been necessary more detailed studies on methodologies and hydrological features.

The studied area covers upper portion of Rio Pardo Experimental Watershed, locate on Botucatu and Pardinho counties, draining 148,76 km². The aim of this study was to integrate GIS and hydrological modeling softwares to watershed management purposes. This integration allows environmental analysis and offers support to environmental system decisions.

Results lead to conclude that: in most part of the study area soil loss was greater than the tolerated. The sub watersheds on podzol soil predominance presented the lightest soil loss. In the sub watersheds on latossol soil predominance, near to Rio Pardo

headwater, soil loss was low, on other soils, soil loss was higher than tolerated. Considering the entire study area, soil loss was almost three times higher than admitted limit.

Keywords: Watershed, geographic information system, BASINS 3.0.

3. INTRODUÇÃO

A Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, principal fonte de abastecimento de água da cidade de Botucatu, encontra-se no limite de sua capacidade hídrica. É imprescindível que sejam estudadas e analisadas as suas características físicas e hidrológicas para um correto planejamento ambiental.

A água é o elemento fundamental da vida e será, muito provavelmente, o bem mais valioso deste milênio. Suas várias formas de utilização são indispensáveis ao bem estar e desenvolvimento da humanidade. Pode-se destacar como suas principais aplicações o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a navegação, a produção de energia elétrica, além de lazer e recreação.

A crescente expansão demográfica e agrícola trouxe como benefícios alimentos em grandes quantidades, alta qualidade e de custo reduzido. Em contra partida, houve o comprometimento da quantidade e qualidade das águas dos rios, lagos e reservatórios.

A água doce na natureza é muito restrita, menos de 1% da água existente na superfície terrestre está disponível para utilização. A sua demanda já é grande e

vem crescendo ano após ano, necessitando de sua obtenção de maneiras menos comuns, como é o caso das águas subterrâneas e da água do mar, que envolve custos elevados. Deve-se então dar prioridade à preservação, controle e utilização racional das águas doces.

A constante destruição das matas ciliares associada ao aumento no uso de defensivos e fertilizantes agrícolas, além do manejo inadequado do solo, tem colaborado para o transporte de resíduos e sedimentos para os rios, causando além do seu assoreamento, a poluição e a contaminação dos cursos de água.

Esses resíduos e sedimentos podem carrear diversos tipos de nutrientes para os rios causando problemas na fauna e flora aquática. As mudanças físico-químicas, como variação de pH, alto teor de matéria orgânica, dentre outros parâmetros, causam um aumento no valor da DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) conseqüentemente, reduzindo o oxigênio dissolvido na água. Como resultado têm-se o desaparecimento de peixes e outras formas de vidas aquáticas, além da produção de sabores e odores desagradáveis e, ainda, obstrução dos filtros de areia utilizados nas estações de tratamento de água.

Tendo em vista os problemas causados pelos escoamentos superficial e subsuperficial, se faz necessário estudos mais aprofundados sobre características hidrológicas das bacias hidrográficas. Esses estudos podem ser conduzidos através da modelagem hidrológica.

A modelagem constitui-se em um importante instrumento para a análise das características e investigação das mudanças nos sistemas ambientais, propiciando uma previsão, a qual então poderá ser comparada com a realização do fenômeno em outro local ou em outra época. Os modelos hidrológicos funcionam como instrumentos para gerar

seqüências artificiais de dados a fim de serem aplicadas na racionalização das análises em pesquisa e tomadas de decisão.

A maioria dos modelos hidrológicos é composta de três variáveis: distribuição espacial, características topográficas e outras variações espaciais.

No aplicação dos modelos hidrológicos há geração de grande número de variáveis e dados, necessitando de sistema informatizado para a análise global da bacia.

Com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas é possível extrair os dados adequados, a partir de banco de dados, tornando-os passíveis de serem manipulados e analisados automaticamente eliminando-se as ações subjetivas apresentando os resultados sob a forma de mapas, permitindo-se, então, desenvolver metodologias mais versáteis e buscando novas soluções para o objeto de estudo.

O presente estudo teve como objetivo a modelagem espacial, integrada com a investigação hidrológica da parte inicial da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP. Como instrumentos de coleta, armazenamento, análise e representação dos dados foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica em conjunto com um programa de modelagem hidrológica. Os objetivos determinados foram:

- modelagem espacial do escoamento superficial, produção de água e produção de sedimentos;
- construção de banco de dados de solos, uso, manejo e dados climáticos;
- simulação de perdas de solo na bacia, através da aplicação de modelo teórico para a obtenção de parâmetros hidrológicos da bacia.

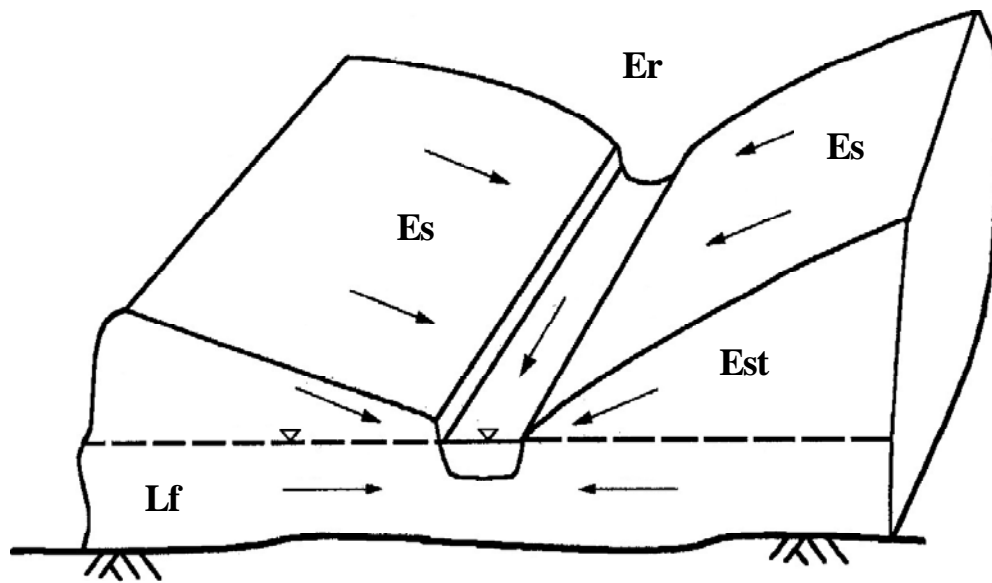
4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Bacia Hidrográfica

Considerada um dos elementos mais abundantes na natureza, a água ocupa aproximadamente 70% da superfície terrestre devendo-se ressaltar que 97% do total seja de água salgada, formando os oceanos e mares, e que 2% formam as geleiras, restando apenas 1% de água doce na forma de rios, lagos e as águas subterrâneas. O Brasil possui 8% de toda a reserva de água doce do mundo. A distribuição de água doce no Brasil se dá de maneira desigual, visto que, 80% da água doce do país estão em áreas da região Amazônica onde se concentra 5% da população e os 20% restantes são destinadas ao abastecimento das demais regiões onde se concentram 95% da população brasileira (Deffune, 1994 e Assis, 1997). A pequena disponibilidade de água doce no planeta associada ao consumo cada vez maior nos centros urbanos, industriais e agrícolas fazem com que as bacias hidrográficas sejam valiosos objetos de estudos para o aproveitamento racional dos recursos hídricos.

Uma bacia hidrográfica é o conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes (Guerra, 1993) cuja delimitação é dada pelas linhas divisoras de água que demarcam seu contorno.

Segundo Silveira (1993), a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico, exposto na Figura 1, onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados, transpirados e também os infiltrados através do escoamento subterrâneo. O papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume concentrada no tempo (precipitação) em uma única saída de água (escoamento).



Legenda

- Lf – lençol freático
- Est – escoamento subterrâneo
- Es – escoamento superficial
- Er – escoamento em rios

Figura 1. Ilustração de uma bacia hidrográfica.

Dentre as regiões hidrológicas de importância prática destacam-se as bacias hidrográficas ou bacias de drenagem, devido à simplicidade que oferecem na aplicação do balanço de água. Uma microbacia hidrográfica compreende uma área de formação natural, drenada por um curso de água e seus afluentes, a montante de uma seção transversal considerada para onde converge toda a água da área considerada (Freitas & Ker, 1996).

De acordo com Rocha (1997), bacia hidrográfica é a área que drena as águas de chuvas por ravinas, canais e tributários, para um curso principal, com vazão efluente convergindo para uma única saída e desaguando diretamente no mar ou em um grande lago.

Encostas, topos ou cristas e fundos de vales, canais, corpos de água subterrânea, sistemas de drenagem urbanos e áreas irrigadas, entre outras unidades espaciais, estão interligados como componentes de bacia de drenagem. A bacia de drenagem é uma área da superfície terrestre que drena água, sedimentos e materiais dissolvidos para uma única saída comum, num determinado ponto de um canal fluvial. O limite de uma bacia de drenagem é conhecido como divisor de drenagem ou divisor de águas. Uma determinada paisagem pode conter um certo número de bacias drenando para um reservatório terminal comum, como os oceanos ou mesmo um lago. A bacia de drenagem pode desenvolver-se em diferentes tamanhos, que variam desde a bacia do rio Amazonas até bacia com poucos metros quadrados que drenam para a cabeça de um pequeno canal erosivo ou, simplesmente, para o eixo de um fundo de vale não-canalizado. Bacias de diferentes tamanhos articulam-se a partir dos divisores de drenagem principais e drenam em direção a um canal, tronco ou coletor principal, constituindo um sistema de drenagem hierarquicamente organizado (Netto, 1998).

Segundo Christofolletti (1999), a bacia de drenagem compreende um conjunto de unidades estruturais, destacando-se as formas de relevo representadas pelas

vertentes e as relacionadas diretamente com os canais fluviais. Em qualquer segmento ao longo de um rio, o uso de procedimentos para a ordenação fornece informações relacionadas com a escala de grandeza e a posição no conjunto da rede. Sob esta perspectiva, uma bacia de drenagem de grande tamanho engloba diversos conjuntos de bacias fluviais de escalas menores.

Christofolletti (1999) ressalta que, em geral, costuma-se considerar como pequenas bacias aquelas com área inferior a 100 km^2 , como médias as situadas na grandeza entre 100 e 1.000 km^2 e como grandes, as que possuem área maior que 1.000 km^2 .

Fraisse et al. (1996) demonstraram que a atividade agropecuária tem ação significativa na degradação das águas superficiais e subterrâneas em diversas partes do mundo. Devido à esta degradação, pode ocorrer um aumento no custo da obtenção de água para abastecimento humano em virtude da má qualidade da água bruta enviada para estações de tratamento (Léon & Cavallini, 1996).

Em estudos sobre a disponibilidade hídrica realizados na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, no Estado de Santa Catarina, foi observado que grande parte das águas próprias para o abastecimento e consumo humano, vem sendo utilizada para outros fins como irrigação, dessedentação de animais e abastecimento industrial (Krebs et al., 1997).

Com relação à utilização da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, no que diz respeito ao abastecimento da cidade de Botucatu, a mesma encontra-se no limite de sua capacidade hídrica. Isto se deve ao fato de que em determinadas ocasiões onde a vazão foi menor, a quantidade de água retirada para o abastecimento da cidade chegou a representar 96% da descarga gerada pela bacia (Conte, 1999).

O escoamento superficial é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. Quando se trata de uma bacia rural, o escoamento na superfície sofre influência da cobertura vegetal e grande parte dele se infiltra. O comportamento do escoamento depende, além da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, de sua declividade e do sistema de drenagem (Tucci, 1998).

A destruição de áreas de matas ciliares para a utilização agrícola e o largo uso de defensivos agrícolas, para o aumento da produtividade, têm contribuído para o aumento do transporte de resíduos químicos e sedimentos para os cursos de água (Muscutt et al., 1993).

Henry & Gouveia (1993) analisando o Rio Pardo que compõe a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, constataram que 90% da carga de sedimentos ficou retida no reservatório da Represa de Jurumirim-SP.

Segundo Carvalho (1994), as partículas de solo transportadas aos cursos de água, além de provocar o assoreamento de reservatórios ou do próprio leito do rio, podem danificar equipamentos (bombas de recalque, turbinas), encarecendo os processos de tratamento de água ou de produção de energia elétrica.

As perdas de solo ocorridas na natureza têm sido aceleradas e intensificadas pelo uso inadequado do solo, desmatamentos e a urbanização (Carvalho, 1994). O autor comenta ainda que o conhecimento de determinados mecanismos, como o transporte de sedimentos, é essencial para a solução de problemas de perdas de solo.

Branco (1986) e Conte-Castro et al. (1998) analisaram a qualidade da água destacando que, por ocasião da ocorrência de chuvas, essas águas chegam aos rios transportando grandes quantidades de partículas de solo, restos de cultura, lixo e outros

poluentes, podendo causar ainda a contaminação por resíduos de produtos agrícolas e a eutrofização dos cursos de água.

Tornero (1996), em relação à ocupação da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, mostra que as culturas anuais e reflorestamentos representavam, em 1962, 11,83% da área da Bacia, e que, em 1977, essa área aumentou para 30,01%. Com relação às áreas de mata e mata ciliar houve uma redução de 0,07% e 2,17%, respectivamente.

Para se executar o monitoramento agrícola de uma região é necessário o mapeamento das áreas em estudo, o qual se constitui instrumento imprescindível para representar as diferentes informações temáticas, e as potencialidades naturais relativas ao meio físico (Ferrante, 1990).

De acordo com Prochnow (1985), a bacia hidrográfica é a unidade de estudo funcional que mais favorece ao desenvolvimento de muitos conceitos hidrológicos e a que mais se ajusta aos objetivos do planejamento ambiental. Jenkins et al. (1994), também evidenciaram a bacia hidrográfica como uma unidade ecossistêmica e morfológica que melhor reflete os impactos das interferências antrópicas, como a ocupação das terras com atividades agrícolas.

Em vista disto, no Brasil, a bacia hidrográfica é referenciada como área de influência a partir da Resolução de n.º 001/86 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), de 1981, sendo que esta unidade passou a ser considerada como área a ser analisada no estudo prévio de impacto ambiental. Na Legislação do Estado de São Paulo, o Decreto n.º 36787, de 18 de maio de 1993, que regulamenta a Lei n.º 7663, discrimina grupos de bacias hidrográficas e esta divisão hidrográfica é aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH (São Paulo, 1994).

Jonys (1973) afirma que uso e conservação do solo e da água são as essências do manejo de uma bacia hidrográfica. Solo e água atuam interativamente e qualquer ação que cause efeito adverso num destes elementos afetará o outro. Como exemplo, o autor cita que a estabilidade ecológica dos ambientes aquáticos é frequentemente modificada pela ruptura das seqüências temporais de escoamento superficial e de entrada de sedimentos. Esta entrada é causada pela erosão acelerada do solo na época chuvosa.

A formulação de projetos com recursos hídricos é um processo em que selecionam-se e avaliam-se propostas que atentam, não apenas para as características do meio físico como também aspectos econômicos e sociais.

4.2. Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

O geoprocessamento vêm-se tornando uma ferramenta poderosíssima e, na maioria das vezes, indispensável à consecução de projetos relacionados à área de meio ambiente. As vastas áreas normalmente abrangidas por estes projetos, bem como o grande número de variáveis contempladas por eles, fazem do uso do geoprocessamento o principal recurso para o manuseio das grandes bases de dados envolvidas neles, sejam elas de natureza espacial ou não (Petersen et al. 1995).

Em um contexto mais amplo, os Sistemas de Informações Geográficas incluem-se no ambiente tecnológico que se convencionou chamar de geoprocessamento, cuja área de atuação envolve a coleta e tratamento da informação espacial, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações. A tecnologia ligada ao geoprocessamento envolve equipamentos e programas de computador com diversos níveis de sofisticação

destinados à implementação de sistemas com fins didáticos, de pesquisa acadêmica ou aplicações profissionais e científicas nos mais diversos ramos das geociências (Teixeira et al., 1992).

A utilização de sistemas de informações geográfica possibilita a aquisição, manuseio e integração de dados temáticos proporcionando uma caracterização espacial e temporal de áreas submetidas à processos erosivos em bacias hidrográficas (Valério Filho & Araújo Júnior, 1995).

Colocando-se como um importante conjunto de tecnologias de apoio ao desenvolvimento da agricultura, o geoprocessamento permite analisar grandes quantidades de dados georreferenciados, independentemente de serem estatísticos, dinâmicos ou atuando de maneira isolada ou em conjunto. Mais do que isto, o geoprocessamento permite o tratamento desses dados, gerando informações e possibilitando soluções através de modelagem e simulações de cenários (Rocha & Lamparelli, 1998).

A utilização de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas compõe o geoprocessamento. Esta tecnologia tem influenciado de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. Nos países de grande dimensão e com carência de informações adequadas para tomada de decisões sobre problemas urbanos e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo. O objetivo principal do geoprocessamento é fornecer ferramentas computacionais para que sejam determinadas as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico e as inter-relações entre diferentes fenômenos (Rodrigues, 1990 e Câmara & Medeiros, 1998).

Segundo Dainese (2001), o geoprocessamento transfere as informações do mundo real para o sistema computacional. Esta transferência é feita sobre bases cartográficas, através de um sistema de referência adequado. Um sistema de geoprocessamento é, geralmente, destinado ao processamento de dados referenciados geograficamente (georreferenciados), desde a sua aquisição até a geração de saídas na forma de mapas, relatórios ou arquivos digitais.

Em seus estudos, Simões (2001) pode concluir que o geoprocessamento favorece a percepção holística do meio ambiente, principalmente quando aplicado a bacias hidrográficas. Identificação de áreas poluídas bem como qual estratégia de manejo deve ser adotada são algumas das vantagens do uso do geoprocessamento.

As ferramentas do geoprocessamento permitem análises complexas integrando dados de diversas fontes e criando bancos de dados georreferenciados.

Um SIG é um sistema de informações projetado para trabalhar com dados referenciados por coordenadas espaciais ou geográficas (Star & Estes, 1990).

De acordo com Teixeira et al. (1992), na fase de entrada de dados, as fontes utilizadas podem ser classificadas em primárias (dados obtidos diretos do campo) e secundários (mapas gerados a partir de dados estatísticos).

Para representar a informação espacial e temporal usa-se, geralmente, mapas de diversos tipos estabelecidos a partir de levantamentos de campo, de fotointerpretação, de análise da resposta espectral de uma imagem enviada por um satélite de observação da terra ou de qualquer outra fonte de informação geográfica. Para considerar a dimensão temporal, um mapa do mesmo parâmetro pode ser preparado para diversos intervalos de tempo. Durante os últimos anos, com a capacidade de geração desta informação

espacial, foi necessário desenvolver ferramentas especiais para gerar e processar estes dados espaciais (Chevallier, 1993).

Uma metodologia completa envolve a caracterização fisiográfica, hidrológica, sócio-econômica e ambiental da área. Normalmente uma metodologia sofre modificações quando aplicada em regiões com características diferentes. A caracterização fisiográfica inclui a elaboração de mapas básicos e temáticos da área e estes podem ser feitos mediante o uso dos SIGs. Diante da difusão e disponibilidade de computadores, nos dias atuais, torna-se cada vez mais crescente a disponibilização de mapas em formato digital (Schwab et al., 1993).

Dados geográficos descrevem objetos do mundo real em termos de posicionamento, com relação a um sistema de coordenadas, seus atributos não aparentes (como a cor, pH, custo, incidência de pragas, etc.) e das relações topológicas existentes. Portanto, um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real (Burrough, 1996, citado por Câmara & Ortiz, 1998).

Visando basicamente o projeto e planejamento de um mapeamento, o SIG tem por objetivos adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacialmente, integrando em uma única base de dados informações espaciais provenientes de várias fontes de dados, como: mapas analógicos, fotografias aéreas, imagens de satélite, dados de análise e de campo (Castro, 1996 e Eastman, 1999). Esta integração de dados pode ser vista na Figura 2:

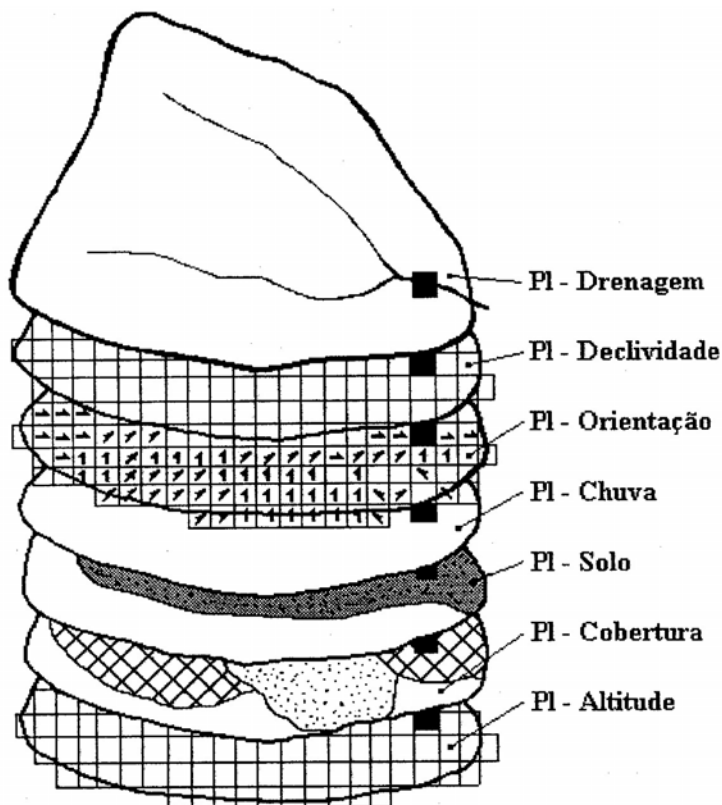


Figura 2. Base de dados gerada pelo SIG.

Segundo Burrough & McDonnell (1998), os SIGs são poderosos instrumentos para coletar, armazenar e recuperar informações, transformando e organizando os dados do mundo real para um conjunto particular de objetivo.

No SIG, o principal objetivo é o suporte à tomada de decisões, para gerenciamento de uso do solo, recursos hídricos, ecossistemas aquáticos e terrestres, ou qualquer entidade distribuída espacialmente (Calijuri et al., 1998).

O termo SIG refere-se àqueles sistemas que efetuam tratamento computacional de dados geográficos. Armazenando a geometria e os atributos dos dados

georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e numa projeção cartográfica qualquer. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados (Câmara & Medeiros, 1998).

Ainda segundo os autores existem três principais maneiras de utilizar um SIG:

- como ferramenta para produção de mapas;
- como suporte para análise espacial de fenômenos; e
- como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação da informação espacial.

Num SIG, dados de variabilidade espacial de rendimento de cultura podem ser analisados conjuntamente com outros dados (ex.: solos, modelos digitais de elevação, restrições) para se modelar cenários futuros e se avaliar a efetividade de manejo, monitorado para cada área (Rocha & Lamparelli, 1998). Além disso, as informações podem ser armazenadas e manipuladas de uma maneira flexível e os resultados podem ser documentados num formato mais adequado para tomadores de decisão como, produtor, consultores e prestadores de serviço.

Ainda segundo os autores, o SIG possui a plataforma ideal para tratamento de dados derivados de agricultura de precisão, pois seu conjunto de ferramentas possibilita uma ampla análise de dados. Embora os SIGs já existam desde a década de 60 e tenham apresentado uma evolução expressiva desde então, é consenso que ainda existe muito a fazer para tornar o seu uso mais acessível e confiável.

Segundo Christofletti (1999), o SIG foi desenvolvido a partir da dificuldade que alguns pesquisadores encontraram para manipular diferentes tipos de dados em grande escala. A partir desta dificuldade, o SIG foi desenvolvido como um sistema capaz

de extrair os dados adequados a partir de banco de dados, tornando-os acessíveis para análise e podendo apresentar os resultados sob a forma de mapas.

Discutindo novas técnicas de avaliação ambiental Crestana, 1994, citado por Ranieri (2000), afirma que é possível observar, modelar, avaliar e simular o comportamento local de variáveis ambientais pela utilização do SIG.

É intensa a utilização da informática no SIG devido ao fato de o mesmo utilizar meios digitais de informação. Deve existir uma base de dados integrada, georreferenciados e com controle de erro. O SIG deve conter funções de análise destes dados, variando de álgebra cumulativa (soma, subtração, multiplicação e divisão) até álgebra não cumulativa (operações lógicas). Dessa maneira, segundo Silva (2000) os sistemas que compõem os SIGs podem ser divididos em:

- sistemas de entrada de dados: sistema de processamento digital de imagens, digitalização de mapas, sistema de posicionamento global, dados tabulares e dados estatísticos;
- sistemas de armazenamento de dados: banco de dados espacial (mapas digitais) e banco de dados de atributos (alfanuméricos);
- sistemas de análise de dados: sistema de análise geográfica (operações algébricas), sistema de análise estatística e sistema de gerenciamento de banco de dados; e
- sistema de saída de dados: sistema de exibição cartográfica (saída de mapas para a tela, impressora, plotter e arquivos digitais).

De acordo com Campos (2001), com a utilização do SIG é possível a elaboração de projetos de conservação de determinadas áreas. Os SIGs utilizam como bases de dados os mapas de solos, mapas topográficos, fotografias aéreas além de imagens de satélites.

Ainda segundo o autor, os SIGs vêm sendo utilizados não apenas para substituir os trabalhos que antes eram realizados manualmente, mas sim, devido a sua grande eficiência.

De acordo com Dainese (2001), atualmente existe um grande número de SIGs, diferenciando-se com relação aos tipos de estrutura de dados, modelos de banco de dados, sistemas de análise e outras. Entretanto, a maioria dos SIGs possui alguns módulos em comum:

- sistema de aquisição e conversão dos dados;
- banco de dados espaciais e de atributos;
- sistema de gerenciamento de banco de dados;
- sistema de análise geográfica;
- sistema de processamento de imagens;
- sistema de modelagem digital do terreno (MDT);
- sistema de análises estatísticas; e
- sistema de apresentação cartográfica.

De acordo com Eastman (1999) e Bonham-Carter (1994), a representação de dados espaciais em um SIG pode ser feita de dois formatos: o vetorial e o *raster*. No formato vetorial, os limites das feições são definidos por uma série de pontos que se agrupam formando linhas ou polígonos. Os pontos possuem coordenadas geográficas (X e Y). Os atributos das feições são armazenados separadamente no programa e a ligação entre ambos pode ser feita através de um número identificador. No formato *raster* a representação gráfica das feições e atributos é unificada. A área de estudo é dividida em uma malha de células ou pixels que armazenam os atributos da área. A cada célula é dado um valor numérico que pode representar tanto o identificador da feição quanto atributos qualitativos e quantitativos.

Independentemente do formato utilizado, a principal função de um SIG é aumentar a velocidade de tomada de decisões.

Segundo Teixeira et al. (1992), a principal vantagem dos sistemas *raster* está em sua relativa simplicidade, não exigindo programas muito complexos para a manipulação dos dados, facilitando a elaboração de aplicações específicas. Além disso, as exigências em termos de equipamentos são menores, o que diminui os custos de implantação. Por outro lado, o sistema vetorial, além da qualidade visual da informação, apresenta um maior nível de precisão. Nesse caso, as formas de saída convencionais como as impressoras permitem uma apresentação mais adequada dos resultados, não só do ponto de vista estético mas também pelo fato de que o produto final assemelha-se muito mais à forma convencional (analógica) de elaboração de mapas. Nas técnicas vetoriais, o espaço geográfico é admitido como contínuo, seguindo a geometria Euclidiana enquanto que, nas técnicas matriciais o espaço geográfico é dividido em elementos discretos, o pixel.

Segundo Castro (1996), da manipulação e análise dos dados ocorrem operações que visam o tratamento, gerenciamento, confecção de modelos digitais do terreno, processamento de imagens, geração e confecção de mapas por computador.

McNamara et al. (1999) utilizaram o modelo digital de elevação do terreno (MDT) explorando a declividade do canal, a distribuição espacial de massa pela distribuição de área cumulativa e as características fractais da rede de canais na bacia.

Star & Estes (1990), Langran (1993) e Elias et al. (1998) estudaram a aplicação de Sistema de Informação Geográfica na área agrícola, principalmente em mapeamento de características dos solos.

Os SIGs além de melhorar a organização e integração de dados, podem ser utilizados para estudos de variabilidade espacial e temporal bem como na avaliação da rede de drenagem de bacias hidrográficas (Petersen et al., 1991). O autor comenta ainda que, a análise do modelo digital de elevação do terreno (MDT), produz informações que são importantes para descrever e modelar a paisagem geométrica, sendo de suma importância para eventuais processos envolvendo superfície e subsuperfície. Com a exploração do MDT são produzidos parâmetros importantes para aplicação em hidrologia.

O SIG tem se revelado uma importante ferramenta na integração de dados temáticos como solo, ocupação, vegetação, aptidão agrícola, declividade, clima dentre outros. Pela grande integração que o SIG apresenta, o mesmo proporciona uma maior produtividade da atividade agropecuária, diminuindo os riscos ao meio ambiente (Oliveira & Sano, 1993).

Visando o planejamento, manejo, conservação e exploração racional dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica, Calijuri et al. (1994) utilizaram o SIG na bacia hidrográfica do Ribeirão e Represa do Lobo, em Itirapina, SP.

Em estudo sobre a aplicação de SIG em microbacia hidrográfica, Assad et al. (1998) puderam concluir que para pequenas áreas as principais vantagens decorrentes da utilização do SIG são a elevada precisão do produto final e a economia de tempo em relação aos métodos tradicionais de análise. Assim sendo, os planejamentos de manejo e de conservação de solo e água de uma microbacia hidrográfica, maior ou menor, podem ser executados com precisão e rapidez com a utilização de SIGs.

A implementação de um SIG, que visa diagnosticar e gerenciar estudos hidrológicos e hidrogeológicos, exige a obtenção e manipulação de uma grande variedade de

informações, tais como, parâmetros hidrológicos básicos, geologia, cobertura vegetal, climatologia, uso da água, dentre outras. Estes bancos de dados devem incluir características como, rede de transportes, limites municipais, erosão, escoamento de água subterrânea, produtividade de culturas, etc. Para o sucesso da implementação destes, é importante considerar as características fundamentais de um banco de dados ambientais que são a natureza normalmente estatística dos dados, o processo de atualização pouco freqüente e a resolução espacial relativamente baixa. Estes estudos normalmente cobrem grandes áreas a custos razoáveis e os requisitos de equipamentos de informática são modestos para implementação desses sistemas (Calijuri et al., 1998).

Muitos métodos tradicionais de levantamento do uso do solo podem ser melhorados ou até novas metodologias podem surgir, em decorrência da disponibilidade de informações sobre o meio ambiente (Ribeiro, 1998).

Silva (1998) ressalta que, quando apoiados em Sistemas de Informações Geográficas, os cenários ambientais ganham grande complexidade e uma enorme aplicabilidade. Análises de redes de drenagem, uso de modelos tridimensionais para visualização do terreno e estimativas de impactos ambientais são alguns exemplos do uso integrado de conhecimentos geomorfológicos em SIGs.

Segundo Becker & Braun (1999), a utilização do sensoriamento remoto na identificação das formas de uso da terra mostrou-se eficiente, particularmente quanto ao emprego combinado das classificações digitais e do geoprocessamento. As imagens do sensor digital dos satélites possibilitaram a classificação digital do uso da terra na microbacia de forma rápida, confiável e atual, tendo em vista a deficiência de informações sobre este tema na carta topográfica.

Segundo Ranieri (2000), em trabalhos de planejamento ou previsão de impactos ambientais cujo enfoque é a erosão do solo, percebe-se o crescente uso dos SIGs. Além da rapidez na manipulação dos dados, os SIGs permitem um diagnóstico mais criterioso da situação da área, por tratar as informações de forma espacial. No caso da erosão, a posição geográfica das áreas de maior perda ou acúmulo de terra, principalmente em bacias hidrográficas, é uma informação de suma importância para apoiar decisões de intervenção na área.

Mellerowicz et al., 1994, citados por Ranieri (2000), enfatizam a importância do SIG para o planejamento do solo e da água. Os autores mostram ter havido um aumento da aplicação do SIG para este fim devido a diversos fatores como a melhora da qualidade, facilidade de manipulação dos sistemas, o aumento da disponibilidade de informações básicas para alimentar o sistema e o aumento da demanda por trabalhos de planejamento que exijam eficiência e rapidez. Semelhante opinião é dada por Gomes et al. (1993) que descreveram que a busca de maior agilidade na manipulação de dados propiciou o surgimento dos sistemas computacionais para aplicações gráficas, como os SIGs, que imprimem maior dinâmica, objetividade e rapidez na obtenção dos resultados.

Para se executar o monitoramento agrícola de uma região é necessário o mapeamento das áreas em estudo, o qual se constitui instrumento imprescindível para representar as diferentes informações temáticas, as potencialidades naturais relativas ao meio físico e o uso atual do solo (Bucene, 2002).

Portanto, para que se obtenha êxito na implementação de um SIG, é fundamental a participação de profissionais de áreas específicas e qualificados, em todas as

etapas do processo, desde a estruturação de um banco de dados, que caracterize da forma mais fiel possível a realidade, até a interpretação e implementação adequadas dos produtos gerados.

Diante do exposto, o estudo e elaboração de um diagnóstico de uma microbacia, apoiado em mapas com características das áreas, de modo científico, prático e com comprovação no campo, irá contribuir para a caracterização fisiográfica da bacia em estudo, bem como, irá de encontro às necessidades municipais na confecção de acervos de informações ambientais, que possam viabilizar um uso mais planejado e adequado dos recursos naturais.

4.3. Modelagem Hidrológica

Modelagem é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso. O modelo hidrológico é uma das ferramentas que melhor representa o comportamento de uma bacia hidrográfica, em diferentes condições observadas. O modelo é utilizado para se antecipar aos eventos podendo representar o impacto da urbanização de uma bacia ou a previsão de uma enchente (Tucci, 1998).

Karvonen et al. (1999) modelaram a influência do uso do solo em escoamento na área de captação da bacia. O modelo é baseado na subdivisão da área de captação da bacia em unidades menores, para geração das chamadas unidades hidrológicas semelhantes (UHSs). As UHSs agregam áreas de comportamento hidrológicos semelhantes de acordo com o uso e tipo de solo, declividade e vegetação. Cada UHS é representada pelo uso de um corte transversal chamado “perfil característico”. O perfil característico é a maior

unidade que pode ser controlada, ainda mantendo matematicamente a idéia de um regime hidrológico semelhante.

Motovilov et al. (1999), em um estudo comparativo entre modelagem hidrológica e observação espacial, ressaltaram na validação do modelo os principais processos do ciclo hidrológico da superfície do solo como, por exemplo: infiltração, evapotranspiração, regime de água do solo, clima, escoamento dos canais e da bacia hidrográfica e formação da superfície e da subsuperfície.

Avaliando a qualidade da modelagem do fluxo subsuperficial, variando as condições hidrológicas para diferentes escalas espaciais, Wade et al. (1999) utilizaram o SIG para descrever a composição final do fluxo subsuperficial, além da geologia e das características do solo.

Dawen et al. (2000) observaram que a maioria dos modelos hidrológicos usam distribuição espacial, caracterizações de topografia e outras variações espaciais.

4.4. Investigação Hidrológica x SIG - BASINS 3.0

O programa BASINS 3.0 (Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint) é um SIG de análise ambiental para uso em bacias hidrográficas. Este sistema é configurado para trabalhar dando suporte ambiental em estudos envolvendo bacias hidrográficas (Environmental Protection Agency, 1998). O sistema é flexível, realizando análises que utilizam ferramentas das mais simples, às mais sofisticadas. Foi originalmente

desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) dos EUA, em setembro de 1996, tendo como principais objetivos:

- facilitar a análise de informações ambientais;
- oferecer suporte às análises de sistemas ambientais; e
- oferecer estrutura para examinar alternativas de manejo adequadas.

Este sistema integra o SIG com dados de bacias hidrográficas em vários ambientes, avaliando e modelando suas ferramentas dentro de um único programa. O BASINS 3.0 possui um banco de dados extenso e ferramentas robustas de manipulação de dados, que permitem ao usuário executar inúmeras avaliações hidrológicas, comparações qualitativas e quantitativas, impactos no uso do solo, podendo representar estes dados na forma de tabelas, gráficos e mapas. A extração dos dados pelo BASINS 3.0 é de fácil manipulação, permitindo a avaliação da qualidade da água em bacias inteiras ou em locais com fluxo selecionados. O sistema BASINS 3.0 consiste em cinco categorias de componentes integrados, segundo (Environmental Protection Agency, 1998):

- diferentes formatos de banco de dados;
- ferramentas para avaliar a qualidade da água em cada ponto do sistema;
- utilitários para importar dados de uso do solo, reclassificação do MDT, delimitação da bacia e manejo da qualidade da água para verificação dos dados;
- modelos de qualidade de água, incluindo os modelos *HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran)*, *Qual2E (Enhanced Stream Water Quality Model)*, *Pload (Pollutant Loading Application Overview)* e *SWAT (Soil Water Assessment Tool)*; e
- possui também ferramentas para processamento de saída dos dados, interpretando os resultados do modelo.

Todos os componentes do sistema BASINS 3.0 são integrados dentro de um único SIG, o ArcView GIS 3.2 (Environmental Systems Research Institute, 1996). Devido à sua integração com o SIG, o BASINS 3.0 possui uma maior flexibilidade para integrar e exibir uma extensa gama de informações como, por exemplo, uso e cobertura do solo. A distribuição espacial dos dados disponíveis inclui o uso e cobertura do solo, dados do solo, MDT além dos limites hidrológicos. O monitoramento dos dados ambientais inclui dados de observação da qualidade da água e das estações de observação meteorológicas (Environmental Protection Agency, 1998).

O BASINS 3.0 utiliza o modelo SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) que é um modelo matemático, desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*, objetivando a análise dos impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água, (Figura 3). O modelo SWAT surgiu da junção de dois modelos: o *modelo Simulator for Water Resources in Rural Basins* – SWRRB (Williams et al. 1985 e Arnold et al. 1990), desenvolvido com o objetivo de simular o impacto do manejo do solo sobre a produção de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas e o modelo *Routing Outputs to Outlet* – ROTO (Arnold et al. 1995), que propaga através do canal e reservatório a produção de água e sedimentos das diversas sub-bacias simuladas.

Para satisfazer a estes objetivos, o modelo é baseado em características físicas da bacia utilizando dados de entrada normalmente disponíveis, sendo computacionalmente eficiente para operar sobre médias e grandes bacias além de ser contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (>50 anos) de forma a computar os efeitos das alterações no uso do solo (Neitsch et al., 2000).

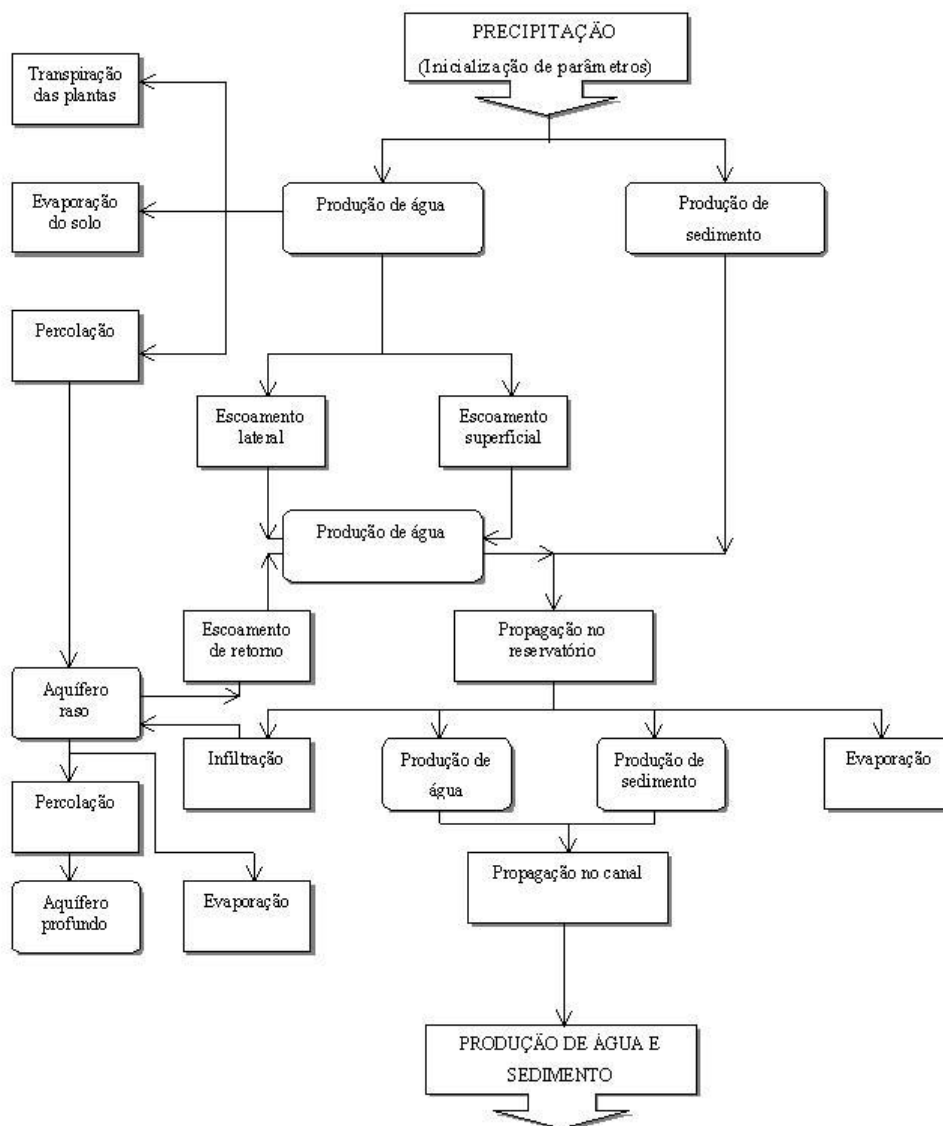


Figura 3. Fluxograma de processamento do SWAT, modificado de (King et al. 1996).

O modelo hidrológico SWAT foi desenvolvido para prever o impacto das práticas de manejo do solo na água, ocasionado pelo transporte de resíduos e sedimentos, sendo aplicado em bacias hidrográficas, podendo ou não, variar o uso e tipo de solo e condições de manejo por longos períodos de tempo (Arnold et al., 1993).

Aplicando o modelo SWAT em uma bacia hidrográfica de aproximadamente 78 km², Heidenreich et al. (1996) puderam concluir que o modelo fornece bons resultados no que diz respeito à simulação do fluxo da bacia e também parâmetros de qualidade da água. O modelo é útil para determinar qual sub-bacia, dentro de uma bacia, pode ser particularmente vulnerável à contaminação da sua rede de drenagem.

Alguns modelos hidrológicos têm buscado representar não apenas a quantidade de água, mas também a qualidade da água e a produção de sedimento nas bacias, como o modelo SWAT (King et al., 1996).

Arnold et al. (1999) integraram um SIG com um parâmetro de distribuição contínua, o modelo SWAT, para o manejo dos recursos hídricos. Esta integração provou ser efetiva e eficiente para a coleta e visualização dos dados e também para analisar a contribuição e produção dos modelos de simulação. Segundo o autor, o SWAT está sendo usado para modelar a hidrologia dos 18 principais sistemas hidrológicos dos Estados Unidos, sendo utilizado para o cálculo da média dos fluxos simulados mensalmente.

As informações espaciais que devem ser fornecidas ao modelo SWAT consistem no MDT, mapa digital do solo e informações sobre o uso do solo. As ferramentas das bases de dados do rendimento, uso e preparo do solo, podem ser substituídos por dados da bacia em estudo (Fohrer et al., 1999).

Segundo Oliveira (1999), a utilização do modelo SWAT associado a um SIG, permite uma aplicação mais rápida e precisa do modelo, melhorando a qualidade dos resultados, e permitindo uma comparação dos impactos potenciais, decorrentes da alteração das características hidrossedimentológicas destas bacias e suas conseqüências no assoreamento das redes de drenagem e reservatórios.

Fohrer et al. (2001) utilizaram o modelo SWAT para quantificar a resposta hidrológica de bacias hidrográficas agrícolas com diferentes usos do solo.

O modelo SWAT é do tipo distribuído e a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir as diferenças do uso e tipo de solo, cobertura vegetal e topografia. Como o modelo SWAT é baseado em características físicas da bacia, é necessário por parte do usuário conhecer dados sobre condições meteorológicas, propriedades físicas e químicas do solo, topografia e práticas de manejo realizadas na bacia. Usando estes dados como entrada, o modelo SWAT é capaz de avaliar o transporte de sedimentos, fluxo de água e cobertura vegetal. Isto permitirá ao usuário modelar bacias hidrográficas e quantificar o impacto das mudanças na qualidade da água, permitindo simular vários processos físicos diferentes em uma mesma bacia hidrográfica (Shaw, 2001).

A calibração do modelo é necessária para se reduzir as incertezas dos resultados obtidos através da simulação. Os métodos de calibração automática podem melhorar estes resultados. Os modelos podem ser automaticamente calibrados por meio de algoritmos. O modelo SWAT foi calibrado utilizando esta técnica, sendo constatada uma alta eficiência do modelo (Duan et al., 1994).

O modelo SWAT foi escolhido como ferramenta para este trabalho pelo fato de o mesmo ter sido desenvolvido objetivando a verificação dos efeitos resultantes das modificações no uso do solo, e também por estar sendo utilizado em diversas partes do mundo, com resultados satisfatórios.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Descrição geral da área de estudo

Localizada na região centro sul do Estado de São Paulo, a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP abrange áreas dos municípios de Botucatu e Pardinho. A nascente do Rio Pardo, seu principal curso de água, está localizada no município de Pardinho. A área estudada tem início na nascente do Rio Pardo (Figura 4) até o local de captação da SABESP, (Figura 5) no município de Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil.



Figura 4. Vista da nascente do Rio Pardo em Pardinho-SP.



Figura 5. Área de captação da SABESP em Botucatu-SP.

A Bacia Experimental do Rio Pardo-SP possui uma área de 148,76 km², sendo que o Rio Pardo, seu principal curso de água, percorre um trecho de aproximadamente 28,7 km desde a sua nascente até o ponto de captação de água pela SABESP (Conte, 1999). O Rio Pardo é afluente direito do Rio Paranapanema, que por sua vez integra a bacia hidrográfica do Rio Paraná.

O Estado de São Paulo está dividido em 11 grandes Grupos de Bacias Hidrográficas. O município de Botucatu está enquadrado no quinto grupo, ou seja, na Bacia do Sorocaba/Médio Tietê, visto que a sede do município está localizada na área da referida bacia (Conte, 1999). A divisão dos grupos de bacias hidrográficas do Estado de São Paulo foi feita conforme a divisão hidrográfica aprovada pelo CRH em 25/11/1993 e decreto n.º 38.455 de 21/03/1994 (São Paulo, 1994). Apesar de o município de Botucatu pertencer ao quinto grupo de bacias hidrográficas, sua principal fonte de abastecimento, o Rio Pardo, que nasce no município de Pardinho, pertence ao segundo grupo de bacias hidrográficas.

A Bacia Experimental do Rio Pardo-SP está geograficamente localizada entre as coordenadas 23°06'14" e 22°56'07" de latitude sul e, 48°28'37" e 48°20'40" de longitude oeste de Greenwich, com altitudes variando entre 840 e 1.000 (Figura 6) (IBGE, 1969 e IBGE, 1982).



Figura 6. Localização da área de estudo (sem escala definida).

Vários municípios da região, dentre os quais, Botucatu e Pardinho, bem como parte da área da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, encontram-se protegidos pela A.P.A. de Botucatu (Área de Proteção Ambiental), criada pelo Decreto Estadual n.º 20.960 de 8 de junho de 1983. O objetivo da A.P.A., é proteger os recursos naturais de áreas compreendidas nas 3 regiões fisiográficas existentes, sendo elas: Depressão Periférica, Frente e Reverso da “Cuesta” de Botucatu (Souza et al., 1985).

De acordo com Zimback (1997), a área é composta pelos solos: Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Roxo, Podzólico Vermelho-Amarelo, Solos Litólicos, Solos Hidromórficos Indiscriminados e Solos Aluviais, todos distróficos e textura variando de média a muito argilosa. Estes mesmos solos, segundo normas da Embrapa (1999), podem ser reclassificados como: Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférrico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Neossolo Lítico Distrófico, Gleissolo Distrófico e Neossolo Flúvico Distrófico, respectivamente.

Os solos acima são provenientes de rochas dos Grupos Bauru, Formação Marília e do Grupo Passa Dois, Formação Serra Geral (IPT, 1981).

Com relação ao clima, a região pode ser enquadrada como tendo um clima mesotérmico, com estação mais seca no inverno e identificada como Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais em torno de 20°C e o índice pluviométrico entre 1.100 e 1.700 mm anuais (Carvalho & Jim, 1983), podendo, segundo Leopoldo et al. (1998), atingir valores superiores a 1.800 mm anuais.

5.2. MATERIAL

5.2.1. Material cartográfico

Para a vetorização das curvas de nível e da rede de drenagem, foram utilizadas as cartas planialtimétricas do IBGE em escala 1:50.000, com equidistância vertical entre as curvas de nível de 20 m. As cartas foram editadas em 1969 pelo Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE, 1969), expostas no Quadro 1.

Quadro 1. Cartas planialtimétricas.

Codificação Internacional	Nome da folha
SF-22-Z-D-III-1-NE-C	Pardinho
SF-22-R- IV-3	Botucatu

5.2.2. Mapa de solos

Foram utilizados como base de dados para a vetorização na tela do computador o mapa semidetalhado de solos, escala 1:10.000 (Zimback, 1997), mostrado na Figura 7.

5.2.3. Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5, bandas TM 3, 4 e 5.

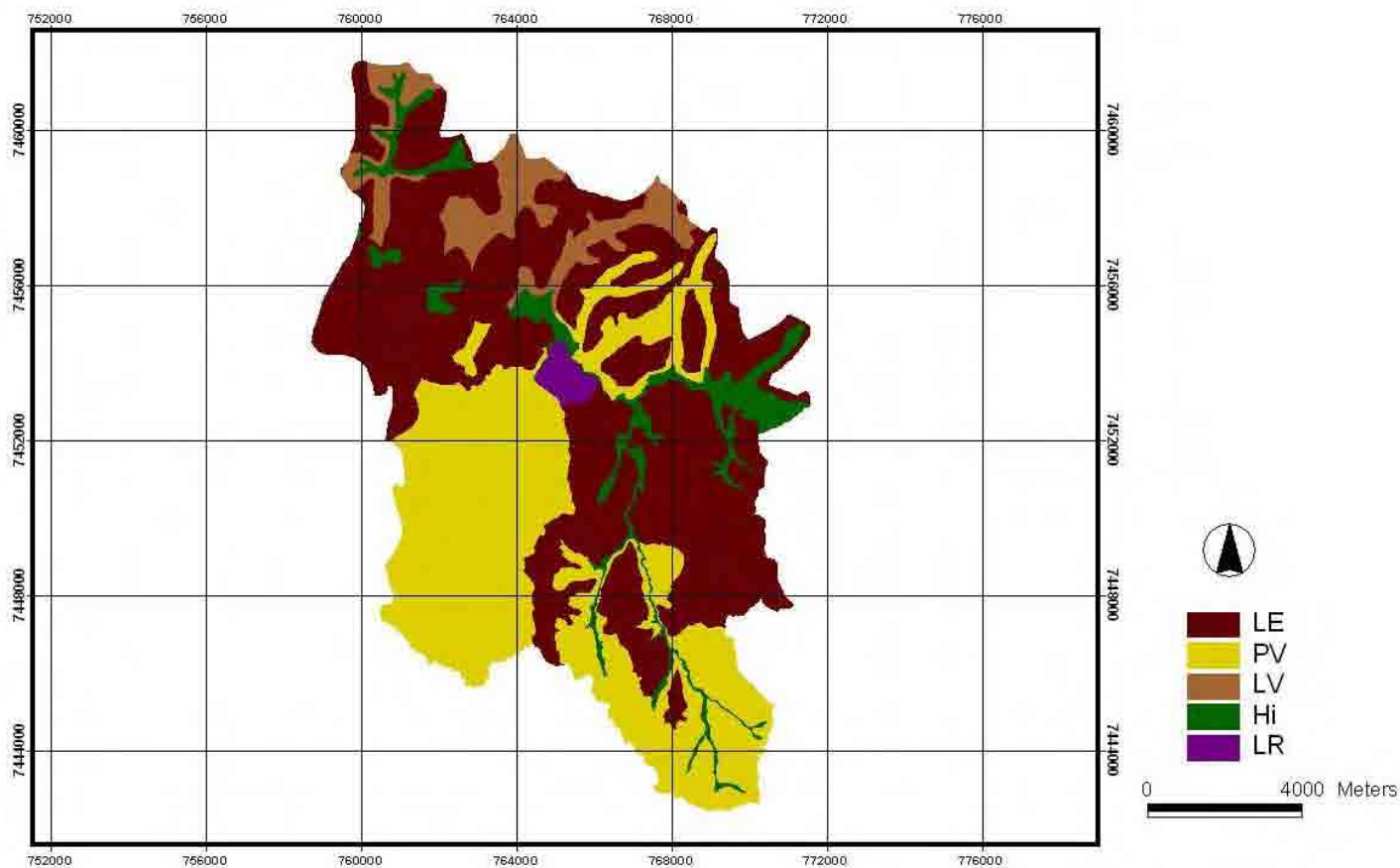


Figura 7. Mapa de solos da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP (Zimback, 1997).

5.2.4. Equipamentos

Neste trabalho todos os procedimentos envolvidos para a entrada, manipulação e armazenamento dos dados foram realizados através dos seguintes equipamentos: Computador Pentium-III, 750 Mhz, 128 MB de memória RAM, disco rígido de 20.4 GB, monitor SVGA 17", impressora HP Deskjet 840 C, scanner HP Scanjet 3400 C e um GPS de navegação Garmin Emap.

5.2.5. Programas utilizados

Foram utilizados os seguintes programas computacionais: Adobe Photoshop 5.0 (Adobe Systems Incorporated, 1998) para a junção das cartas planialtimétricas; IDRISI 32 (Eastman, 1999) para o georreferenciamento das cartas e mapas; AutoCAD Map 2000 (Autodesk, 1999) para a vetorização das curvas de nível e rede de drenagem; BASINS 3.0 (Environmental Protection Agency, 1998) para a manipulação e armazenamento dos dados das sub-bacias e o ArcView GIS 3.2 (Environmental Systems Research Institute, 1996) como plataforma para a utilização do BASINS 3.0.

5.3. MÉTODOS

As cartas planialtimétricas foram digitalizadas, ou seja, transferidas do formato analógico para o formato digital utilizando-se um scanner. No programa Adobe Photoshop 5.0 as mesmas foram unidas formando uma única carta como pode ser visto na Figura 8.

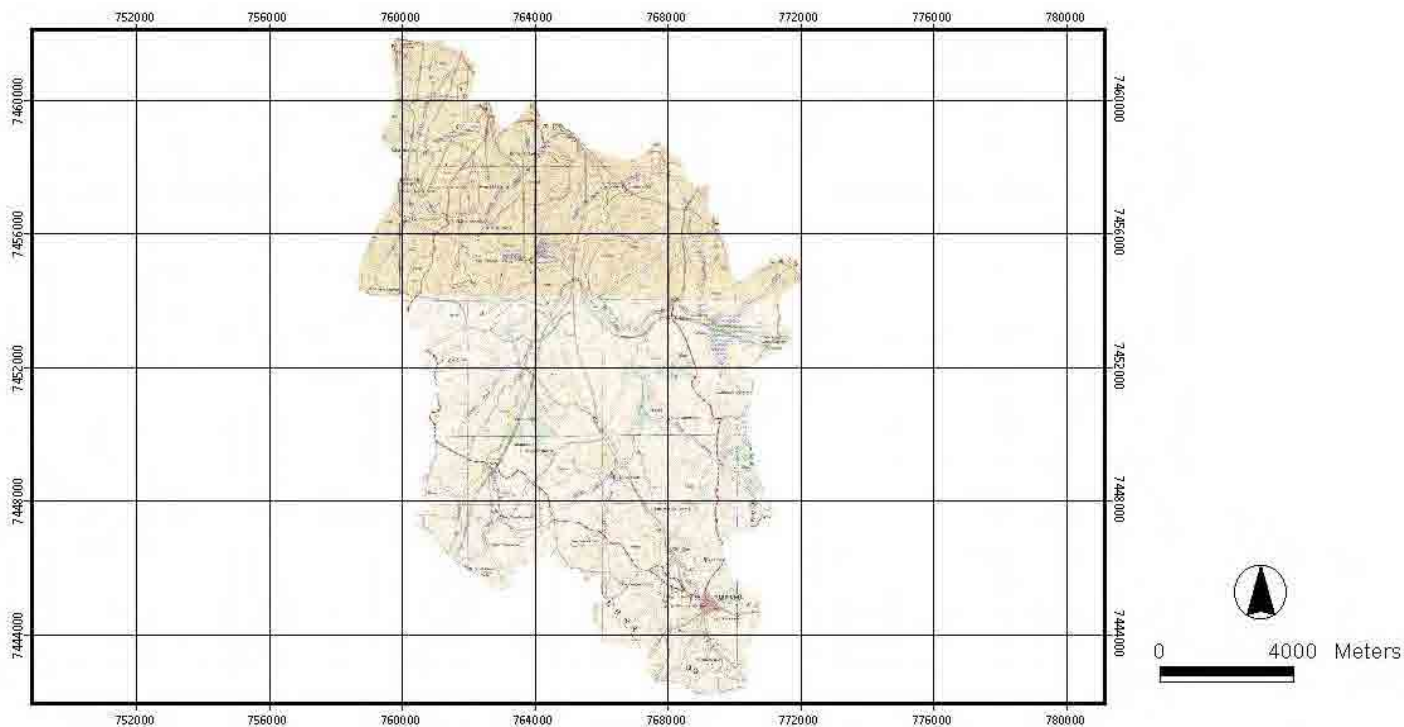


Figura 8. Cartas planialtimétricas da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

A vetorização das curvas de nível e da rede de drenagem foi realizada no AutoCAD Map 2000, sendo que os arquivos foram introduzidos através do menu *Insert / Raster Image*. Após a vetorização, os arquivos foram convertidos no formato DXF, versão 12 do AutoCAD Map 2000 e exportados para o IDRISI 32 for Windows, onde a área de estudo foi georreferenciada, ou seja, as informações foram transferidas do formato plano para a projeção UTM. No IDRISI 32 for Windows os arquivos foram importados no módulo *File / Import / Desktop Publishing Formats / DXFIDRIS*. O georreferenciamento foi realizado utilizando uma base cartográfica em conjunto com um sistema de referencia adequado.

Após o georreferenciamento da área, os arquivos foram introduzidos no BASINS 3.0, onde foram realizados todos os processos envolvendo a área de estudo, como será visto mais adiante.

5.3.1. Parâmetros dos solos

Parte dos dados físicos e químicos da área em estudo foram obtidos de Zimback (1997) com informações de 20 pontos amostrais em 2 profundidades, de 0-20 cm e de 60-80 cm. Como estes dados não cobriam toda a extensão da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, foi necessário a complementação do mapa de solos.

Obteve-se na tela do computador as coordenadas geográficas das sub-bacias que necessitavam de amostragem, e, em seguida foi realizado o trabalho de campo, com o auxílio de um GPS. Foram determinados mais 19 pontos de amostragem de solo, completando a cobertura das 39 sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Os parâmetros químicos e físicos levantados foram: análise granulométrica, densidade do solo, condutividade hidráulica, capacidade de água disponível, profundidade efetiva, erodibilidade, albedo e carbono orgânico.

5.3.1.1. Análise granulométrica (%)

A análise granulométrica baseia-se no cálculo das porcentagens de areia, silte e argila presentes no solo. O método utilizado foi o do Densímetro de Bouyoucos,

onde a argila é determinada pela leitura no densímetro, a areia por tamizamento e o silte pela diferença, complementando-se o percentual para 100% (Embrapa, 1997).

5.3.1.2. Densidade do solo (g/cm^3)

Foi determinada através do método do Anel Volumétrico (Embrapa, 1997). As amostras foram coletadas com estrutura indeformada através de um anel de aço de bordas cortantes e volume interno de 50 cm^3 e transferidas para latas de alumínio de peso conhecido. As amostras permaneceram em estufa a 105°C e após 36 horas foram retiradas, deixadas esfriar e pesadas.

$$Densidade = \frac{\text{Peso da Amostra Seca a } 105^\circ\text{C}}{\text{Volume}} \quad (1)$$

5.3.1.3. Condutividade hidráulica (mm/mm)

Esta determinação foi feita através de um Permeâmetro de Guelph, baseada na teoria da infiltração constante em solo insaturado (Reinolds & Elrich, 1985) dada pela equação:

$$k = G_2 Q_2 - G_1 Q_1 \quad (2)$$

Onde:

Gn: fator dependente da geometria do poço;

Q: vazão.

5.3.1.4. Capacidade de água disponível

O conceito de Capacidade de Água Disponível é definido como os teores de umidade do solo compreendidos entre a capacidade de campo (CC) e a porcentagem de murchamento permanente (PMP). O teor de umidade do solo da capacidade de campo ocorre depois de uma chuva ou irrigação intensa ter cessado e a força ou potencial gravitacional ter deixado de predominar sobre a água do solo, o que faz com que o movimento da água decresça substancialmente no sentido vertical descendente (Klar, 1984). A Capacidade de Água Disponível foi calculada pela expressão abaixo (Embrapa, 1997).

$$AD = U_{cc} - U_{pmp} \quad (3)$$

Onde:

U_{cc} : umidade na capacidade de campo

U_{pmp} : umidade no ponto de murcha permanente

5.3.1.5. Profundidade efetiva (m)

Refere-se à espessura máxima do solo em que as raízes não encontram impedimento físico para penetrar livremente, facilitando a fixação da planta e servindo como meio para a absorção de água e nutrientes.

No Quadro 2 estão expostas as profundidades efetivas dos solos presentes na Bacia Experimental do Rio Pardo-SP:

Quadro 2. Profundidades efetivas dos solos.

Unidades	Profundidade efetiva
Hidromórfico (Hi)	0,50m
Latossolo Roxo (LR)	+3,00m
Latossolo Vermelho Amarelo (LV)	3,00m
Latossolo Vermelho Escuro (LE)	+3,00m
Podzólico Vermelho Amarelo (PV)	2,00m

Adaptado de (Bertolini & Bellinazzi Jr., 1991).

5.3.1.6. Erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo refere-se a suscetibilidade do solo à erosão. Determinados solos têm maior facilidade de se desgastarem do que outros, mesmo com condições de cobertura vegetal, declives, chuvas e manejo iguais (Lombardi & Bertoni, 1975). A erodibilidade referente aos solos presentes na bacia foram obtidas da relação exposta em Bertoni & Lombardi Neto (1990).

5.3.1.7. Albedo (%)

O albedo é definido como sendo a quantidade de radiação solar refletida sobre uma superfície, expresso em porcentagem. Os fatores que influenciam o albedo são a natureza e cobertura do solo. As áreas claras refletem mais radiação solar, portanto apresentam albedo maior, as áreas escuras absorvem mais o calor, portanto possuem albedo menor. O Quadro 3 mostra o albedo de vários alvos da natureza (Tucci, 1998).

Quadro 3. Albedo para algumas coberturas do solo.

Natureza e cobertura do solo	Albedo(%)
Florestas coníferas	0,10 - 0,15
Florestas temporárias	0,15 - 0,20
Cereais	0,10 - 0,25
Batatas	0,15 - 0,25
Algodão	0,20 - 0,25
Campo	0,15 - 0,20
Água	0,03 - 0,10
Solos escuros	0,05 - 0,20
Argila seca	0,20 - 0,35
Solos arenosos (secos)	0,15 - 0,45

5.3.1.8. Carbono orgânico (%)

O carbono orgânico foi determinado a partir da quantidade de matéria orgânica encontrada nas amostras de solo. A porcentagem de carbono orgânico é calculada dividindo-se o resultado da análise de matéria orgânica por 1,724. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média da matéria orgânica, o carbono participa com 58% do peso da matéria orgânica (Embrapa, 1997).

$$\text{Carbono Orgânico} = \frac{\text{Matéria Orgânica}}{1,724} \quad (4)$$

5.3.2. Parâmetros climatológicos

Para a determinação dos parâmetros climatológicos foram utilizados dados do período de janeiro de 1997 à dezembro de 2001. Os dados levantados foram: temperatura mínima, temperatura máxima, precipitação, radiação solar, velocidade do vento, dias secos e dias úmidos. Os equipamentos onde foram realizadas as leituras encontram-se instalados na FCA/UNESP, Campus de Botucatu, com as seguintes coordenadas; latitude 22°51'S, longitude 48°26'W e altitude de 786 metros.

5.3.2.1. Temperaturas máxima e mínima (°C)

As leituras das temperaturas máximas e mínimas foram realizadas através de um termômetro convencional, sendo o da temperatura máxima de mercúrio e o da temperatura mínima de álcool, ambos da marca R. Fuess com resolução de 0,2°C.

5.3.2.2. Precipitação (mm)

A precipitação pluviométrica foi determinada através de um pluviógrafo da marca Otta, sendo os registros semanais.

5.3.2.3. Quantidade máxima de chuva em 30 minutos (mm)

A quantidade máxima de chuva em 30 minutos foi determinada em função da duração e intensidade da precipitação. Foram consideradas para cada mês do período, as chuvas com duração de no máximo 30 minutos que apresentaram a maior intensidade.

5.3.2.4. Radiação solar ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}$)

A radiação solar foi determinada através de um actinógrafo bimetálico marca Otta, modelo 44 com rotação regulável para 24 horas ou 7 dias.

5.3.2.5. Ponto de orvalho (%)

Orvalho é a condensação de vapor de água atmosférico sobre uma superfície sólida. Essa condensação se inicia quando a temperatura da superfície torna-se igual ou inferior à temperatura do ponto de orvalho do ar. A sua determinação deu-se segundo as seguintes equações:

$$es = 4,58.10 \left(\frac{7,5.t}{237,5 + t} \right) \quad (5)$$

Onde:

es: Pressão de vapor saturado

t: Temperatura média

$$UR = \left(\frac{e}{es} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

UR: Umidade relativa do ar

es: Pressão de vapor saturado

$$e = 4,58 \cdot 10^3 \left(\frac{7,5 \cdot to}{237,5 + to} \right) \quad (7)$$

Onde:

to: Temperatura do ponto de orvalho

e: Pressão de vapor

5.3.2.6. Velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

A velocidade do vento foi calculada por um anemômetro da marca *Wilh Lambrecht KG Gottingen*, modelo 1440, integrador, instalado a uma altura de 2 metros do solo.

5.4. Modelo digital de elevação do terreno

As cartas planialtimétricas do IBGE (1969) utilizadas no estudo, com uma equidistância vertical das curvas de nível de 20 metros, não permitem uma visualização

contínua das altitudes da área de estudo. Devido a este fator, é necessário a geração de uma superfície com valores que variam continuamente no espaço, cujo valor em um determinado ponto depende dos valores vizinhos (Eastman, 1999). Esta superfície é conhecida como Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT). O MDT é utilizado para modelagem de informações de altimetria ou propriedades do solo, sendo importante, dentre outros fatores, para análises da superfície e subsuperfície do terreno.

A determinação dos valores entre as curvas de nível é possível através da interpolação dos dados. A modelagem *Triangulated Irregular Network* (TIN) é a estrutura mais comum utilizada para modelagem de superfícies contínuas usando dados vetoriais. Através da triangulação, os valores das altitudes serão utilizados como vértices na geração de triângulos, resultando na triangulação da área da bacia hidrográfica. Finalmente, é gerado um modelo *raster* da superfície onde os topos de morros e depressões são modeladas de acordo com as tendências dos dados mais próximos.

Na geração e aplicação dos MDT a resolução espacial é um aspecto muito importante. Resoluções espaciais entre 5 e 50 metros são as mais indicadas para modelagem hidrológica distribuída segundo Beven & Binley, 1992, citados por Simões (2001). Na geração do MDT da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP utilizou-se uma resolução espacial de 10 metros.

No programa BASINS 3.0, através do módulo Surface, utilizou-se o comando *Create Tin From Features* para a geração do MDT referente à altimetria. Para que o MDT seja gerado é necessário que a extensão *3D Analyst* seja ativada no módulo *File*, comando *Extensions*.

5.5. Divisão da área de estudo em sub-bacias

Visando facilitar o manejo em toda a área de estudo, a mesma foi dividida em várias sub-bacias. A área de estudo foi dividida em 39 sub-bacias com uma área de drenagem mínima de 200 ha cada. Essa divisão foi realizada utilizando-se do MDT associado à rede de drenagem. Esse processo foi executado através do módulo *Automatic*, utilizando o comando *Delineate*.

5.6. Criação do banco de dados do solo

Os dados de solo utilizados pelo modelo SWAT foram divididos em dois grupos: propriedades físicas e químicas. As propriedades físicas do solo atuam no movimento de água e ar dentro dos perfis do solo, tendo um maior impacto no ciclo hidrológico do solo. Enquanto que as propriedades físicas do solo são imprescindíveis para a execução do modelo, as propriedades químicas são opcionais.

Os dados foram fornecidos ao BASINS 3.0, através do módulo *Utilitários*, comando *SWAT Databases, User Soils*. Para cada sub-bacia foi criado um banco de dados com todas as informações exigidas nas duas profundidades estudadas.

5.7. Definição do uso dos solos

Para o início da modelagem hidrológica são necessários os dados das propriedades físicas e químicas do solo, e também, do uso do solo para cada sub-bacia. A

definição do uso do solo para cada sub-bacia foi realizada através da classificação supervisionada da imagem do satélite Landsat 5, bandas TM 3,4 e 5 em conjunto com o conhecimento da área (Figura 9). No módulo *Utilities*, através do comando *Land Use and Soil Definition*, estes dados são fornecidos ao programa.



Figura 9. Imagem do satélite Landsat 5, bandas TM 3,4 e 5, com a definição da área de estudo (sem escala definida).

5.8. O modelo SWAT

No presente estudo foram levantados somente os procedimentos de interesse na predição da produção de água e de sedimentos, excluindo-se alguns módulos como o de produção de nutrientes, produção de neve, qualidade de água e propagação em reservatórios, presentes como opção no programa SWAT.

A rotina de funcionamento do modelo SWAT considerou os seguintes parâmetros:

5.8.1. Produção de água

O modelo SWAT determina a produção de água superficial na bacia hidrográfica baseada na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - q_{lat} - q) \quad (8)$$

Onde:

SW: umidade do solo, em mm, conforme Embrapa (1997);

t: tempo, em dias;

R: precipitação diária, em mm, obtida através do pluviômetro;

Q: escoamento superficial, em mm, determinada segundo USDA (1972);

ET: evapotranspiração, em mm, determinada segundo Hargreaves & Samani (1985);

P: percolação, em mm;

q_{lat} : escoamento lateral, em mm, determinada segundo Sloan et al. (1983);

q: escoamento de retorno, em mm, determinada segundo Smedema & Rycroft (1983);

i: passo de tempo, em dias.

5.8.2. Escoamento superficial

O escoamento superficial é estimado utilizando-se a equação proposta por *Soil Conservation Service-SCS* (USDA-SCS, 1972).

$$Q = \left(\frac{R - 0,2s}{R + 0,8s} \right)^2 \quad (9)$$

Onde:

Q: escoamento superficial diário, em mm;

R: precipitação diária, em mm;

S: parâmetro de retenção, em mm.

O parâmetro de retenção varia de acordo com a sub-bacia, em função do solo, uso do solo, declividade e também com o tempo, devido às alterações ocorridas com a umidade do solo. Este parâmetro está relacionado com a curva número (CN) pela seguinte equação:

$$s = 254 \left(\frac{100}{CN} \right) - 1 \quad (10)$$

A escala de CN não é linear, variando entre 1 (cobertura permeável) e 100 (cobertura impermeável).

5.8.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é determinada pela soma da evaporação do solo e a transpiração das plantas, ambas determinadas em função da evaporação potencial.

5.8.3.1. Evaporação potencial

O modelo SWAT possibilita a escolha entre três métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial: Penman & Monteith, Hargreaves & Samani e Priestley & Taylor. O método adotado para o presente estudo foi o de Penman & Monteith, elaborado em 1965, o qual, segundo Smith et al. (1991) é o mais adequado e descreve melhor o fenômeno.

O método pode ser descrito pela equação, segundo Smith et al. (1991):

$$PM = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (Rn - G) \cdot \frac{1}{\gamma} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \cdot \frac{900}{(Tm + 275)} \cdot v_2 \cdot (es - ea) \quad (11)$$

Onde:

PM: evapotranspiração de referência segundo Penman-Monteith, em mm/dia;

Δ : inclinação da curva de pressão vapor versus temperatura do ar, em kpa/°C;

es: pressão de saturação de vapor, em kpa;

Tm: temperatura média do ar, em °C;

γ^* : constante psicrométrica modificada, em kpa/°C;

Rn: radiação líquida na superfície do solo, em MJ.m⁻².dia;

G: fluxo de calor no solo, em MJ.m⁻².dia.

5.8.3.2. Evaporação do solo

A evaporação da água no solo é simulada considerando a cobertura no solo, de acordo com a seguinte equação:

$$E_s = (E_0)(EA) \quad (12)$$

Onde:

E_s : evaporação no solo, em mm/dia;

E_0 : evaporação potencial, em mm;

EA: índice de cobertura do solo, sendo função da biomassa sobre o terreno e determinado a partir das informações de cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

5.8.4. Transpiração das plantas

A transpiração das plantas é computada a partir das seguintes equações:

$$E_p = \frac{(E_0)(LAI)}{3} \quad (13)$$

Onde:

E_p : transpiração das plantas, em mm/dia;

E_0 : evaporação potencial, em mm;

LAI: índice de área de folha, simulado em função das temperaturas máximas diárias e da cobertura do solo.

5.8.5. Percolação

A componente de percolação do SWAT usa uma técnica de propagação do armazenamento, combinado com um modelo de fluxo em fendas para simular o escoamento através de cada camada de solo. Uma vez que a água percolou abaixo da zona de raiz, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. A técnica de propagação é baseada na equação:

$$SW = SW_o \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (14)$$

Onde:

SW e SW_o :umidade do solo no começo e fim do dia, em mm;

Δt: intervalo de tempo (24 h);

TT: tempo de propagação através da camada i, em h;

i: índice de identificação da camada de solo.

Assim, a percolação pode ser computada pela seguinte relação:

$$P_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (15)$$

Onde P_i é a percolação, em mm/dia.

O tempo de propagação, TT_i, é computado para cada camada de solo i, através da equação linear de armazenamento:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{H_i} \quad (16)$$

Onde:

H_i : condutividade hidráulica, em mm/h;

FC: capacidade de campo menos a lâmina de água do ponto de murchamento para a camada i , em mm.

5.8.6. Escoamento lateral

O escoamento lateral é calculado simultaneamente com a percolação, utilizando o modelo de armazenamento cinemático desenvolvido por Sloan et al. (1983). O escoamento lateral de saída é representado por:

$$q_{lat} = H_0^{vw} \quad (17)$$

Onde:

H_0 : espessura da camada saturada do comprimento de rampa (projeção) em m;

V: velocidade do escoamento de saída, em m/h;

W: largura do declive, em m.

A projeção da espessura da camada saturada do comprimento de rampa, H_0 , foi obtida por:

$$H_0 = \frac{2S}{\theta_d \lambda} \quad (18)$$

Onde:

S: volume drenável na zona saturada, em m³;

θ_d : porosidade do solo, em %;

γ : comprimento de rampa, em m.

A velocidade de saída é estimada por:

$$v = K_s \sin(\alpha) \quad (19)$$

Onde:

K_s : condutividade na saturação, em m/h;

$\sin(a)$: parâmetro adimensional que expressa a proporção do total de chuva que ocorre durante o tempo de concentração da bacia

Substituindo as equações 17 e 18 na equação 16 temos:

$$qlat = 0,024 \frac{2SK_s \sin(\alpha)}{\theta_d \lambda} \quad (20)$$

O tempo de concentração na bacia é estimado pela soma do tempo de concentração do escoamento na superfície da bacia e o tempo de concentração do escoamento no canal, sendo totalizado por:

$$t_c = t_{cc} + t_{cs} \quad (21)$$

Onde:

t_{cc} : tempo de concentração para o escoamento no canal, em h;

t_{cs} : tempo de concentração para o escoamento na superfície, em h.

O tcc pode ser computado usando a seguinte equação:

$$t_{cc} = \frac{L_c}{3,6(V_c)} \quad (22)$$

Onde:

L_c :comprimento médio do canal para a bacia, em km;

V_c : velocidade média do canal, em m/s.

A velocidade média é estimada usando a equação de Manning (Chow, 1964), dada por:

$$q = \frac{A}{n} RI \quad (23)$$

Onde:

q: taxa de escoamento média, em m³/s;

A: área molhada, em m²;

R: raio hidráulico, em m;

n: coeficiente de rugosidade do canal;

I: declividade do canal.

O modelo assume a seção de canal trapezoidal com 2:1 de declividade lateral e taxa de largura/profundidade de 10:1. A taxa de escoamento média é calculada para uma chuva com duração dada pela seguinte equação:

$$DUR = \frac{4,605}{-2 \ln(1 - \alpha_{0,5})} \quad (24)$$

Onde $\alpha_{0,5}$ é o fator de proporção entre a chuva de 24 h e a chuva de 0,5 h.

Uma abordagem similar é usada para estimar tcs:

$$t_{cs} = \frac{\lambda}{V_s} \quad (25)$$

Onde:

λ : comprimento da rampa, em m;

V_s : velocidade do escoamento de superfície, em m/s;

A velocidade do escoamento na superfície é calculada aplicando a equação de Manning (Chow, 1964) para uma faixa de 1 m de largura da rampa, assumindo que o escoamento está concentrado dentro de um canal trapezoidal, com 1:1 de declividade lateral e taxa de largura/profundidade 5:1.

5.8.7. Escoamento de retorno

O escoamento de retorno é determinado a partir do balanço hídrico no aquífero raso, definido da seguinte forma:

$$Vsa_i = Vsa_{i-1} + Rc - revap - q_r - perc_{gw} - WU_{sa} \quad (26)$$

Onde:

Vsa_i : volume de água do aquífero raso, em m³;

Rc : recarga, em m³;

$Revap$: escoamento que retorna ao perfil do solo, em m³;

q_r : escoamento de retorno, em mm;

$perc_{gw}$: infiltração para o aquífero profundo, em mm;

WU_{sa} : uso da água, em m³;

I : passo de tempo, em dias.

Smedema & Rycrof (1983) apresentam a seguinte formulação para o cálculo do escoamento de retorno:

$$q_r = \frac{8Kd}{L^2} h \quad (27)$$

Onde:

q_r : escoamento de retorno, em m^3 ;

Kd : condutividade hidráulica, em mm/mm;

L : comprimento do dreno, em m;

H : cota piezométrica, em m.

O parâmetro revap representa a água que retorna para o perfil do solo e é perdida para a atmosfera pela evaporação do solo ou raiz das plantas. O volume perdido é estimado pela seguinte equação:

$$revap = \beta_r ET \quad (28)$$

Onde:

ET : evapotranspiração, em mm;

β_r : coeficiente revap-parâmetro de ajuste do modelo.

O balanço do aquífero profundo é dado por:

$$Vda_i = Vda_{i-1} + perc_{gw} - WU \quad (29)$$

Onde:

Vda : armazenamento do aquífero profundo, em m^3 ;

$perc_{gw}$: infiltração para o aquífero profundo, em mm;

WU_{DA} : uso da água, em m^3 ;

I : passo de tempo, em dias.

5.8.8. Produção de sedimentos

Será calculada para cada sub-bacia a produção de sedimentos através da Equação USLE modificada (MUSLE), alterada por Williams & Berndt (1977), definida como:

$$y = 11,8(Vq_p)^{0,56} KCPELS \quad (30)$$

Onde:

Y: produção de sedimento, em t;

V: escoamento de superfície, em m³, determinado segundo USDA (1972);

q_p: taxa de escoamento de pico, em m³.s⁻¹, cálculo segundo descrito por Fleming (1975);

K: fator de erodibilidade do solo, segundo tabela exposta por Bertoni & Lombardi Neto (1990);

C: fator de uso e manejo do solo, segundo tabela exposta por Bertoni & Lombardi Neto(1990);

PE: fator de práticas conservacionistas, segundo tabela exposta por Bertoni & Lombardi Neto (1990);

LS: fator topográfico, calculado segundo Wischmeier & Smith (1978).

5.8.9. Propagação no canal

Água e sedimentos chegam até os canais da rede de drenagem.

O cálculo da contribuição da bacia com material líquido é dado pela expressão:

$$O_i = SC(I_i + S_{i-1}) \quad (31)$$

Onde:

O: escoamento de saída, em m³;

SC: coeficiente de armazenamento, em m³, cálculo segundo Williams & Hann (1973);

I: escoamento de entrada, em m³, determinado segundo USDA (1972);

S_{i-1}: armazenamento no trecho do dia anterior, em m³, cálculo segundo Williams & Hann (1973).

O material sólido (sedimentos) pode ser calculado por:

$$SED_{out} = SED_{in} - DEP + DEG \quad (32)$$

Onde:

SED_{out}: escoamento de saída;

SED_{in}: escoamento de entrada, segundo Williams & Berndt (1977);

DEP: deposição, cálculo segundo Arnold et al. (1990);

DEG: degradação, cálculo segundo Williams (1980).

Pelas equações 31 e 32 são obtidas as contribuições de água e sedimentos para a represa de captação de água da SABESP em Botucatu-SP.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Modelagem espacial

Com a digitalização das cartas planialtimétricas e a vetorização da área de estudo foram obtidas informações importantes para a análise espacial da bacia. A vetorização das curvas de nível (Figura 10) e da rede de drenagem (Figura 11) permitiu que fosse criado o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT) (Figura 12), importante ferramenta na análise da superfície do terreno. O MDT possibilitou que fossem levantadas as altitudes em todos os pontos da bacia. Além de ser importante instrumento na análise da superfície do terreno, o MDT também foi utilizado como base para a geração de diversos mapas temáticos, como por exemplo o mapa de declividade (Figura 13).

Na Figura 10 estão representadas as cotas altimétricas do terreno, obtidas das cartas do IBGE (1969), escala 1:50000, com altitudes variando de 840 a 1000m.

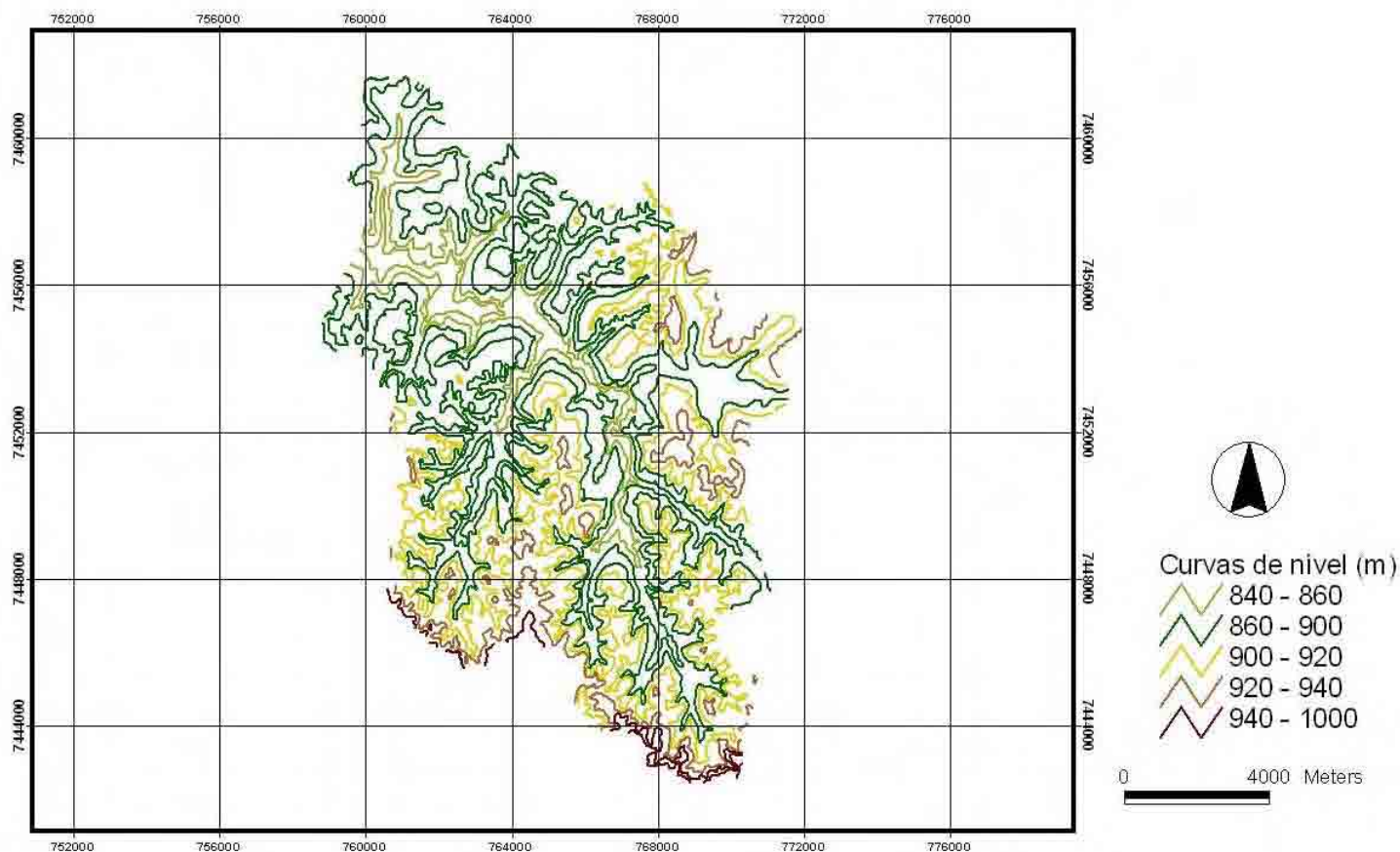


Figura 10. Curvas de nível da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

A partir das mesmas cartas foi vetorizada a rede de drenagem e o limite da bacia (Figura 11).

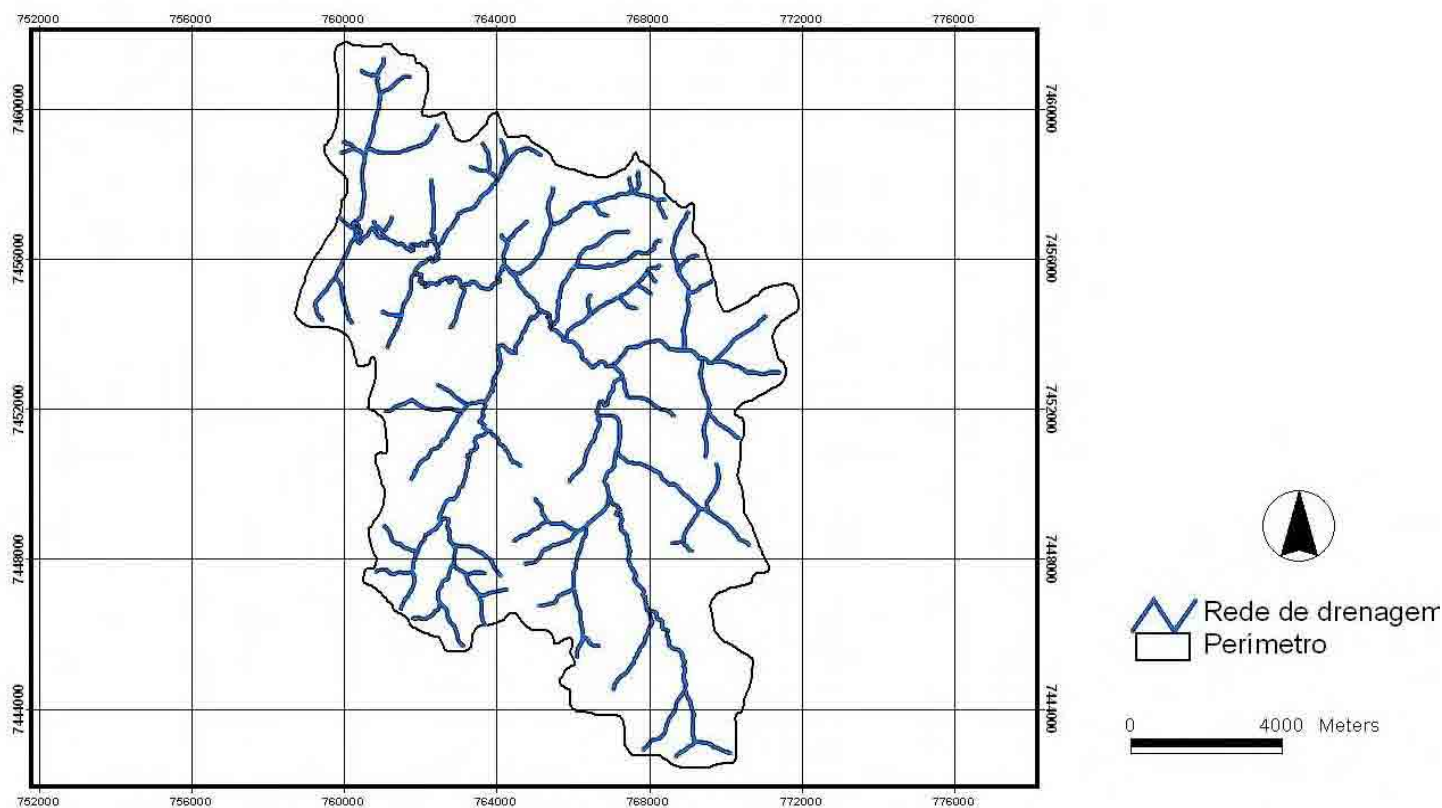


Figura 11. Rede de drenagem da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Na vetorização da rede de drenagem foram considerados os cursos de água perenes. Foram vetorizados 69 cursos de água, totalizando uma extensão de aproximadamente 151 km. O Rio Pardo, principal curso de água da bacia percorre um trecho de aproximadamente 27,6 km, da sua nascente até o ponto de captação de água pela SABESP. A Bacia Experimental do Rio Pardo-SP foi classificada como sendo uma bacia de 4ª Ordem de Ramificação, possuindo uma distribuição espacial da sua rede de drenagem do tipo Dendrítica ou Arborescente, com valores de densidade de drenagem, fator de forma e coeficiente de compacidade de 1,16, 0,44 e 1,72, respectivamente.

A Figura 12 mostra o Modelo Digital de Elevação do Terreno da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

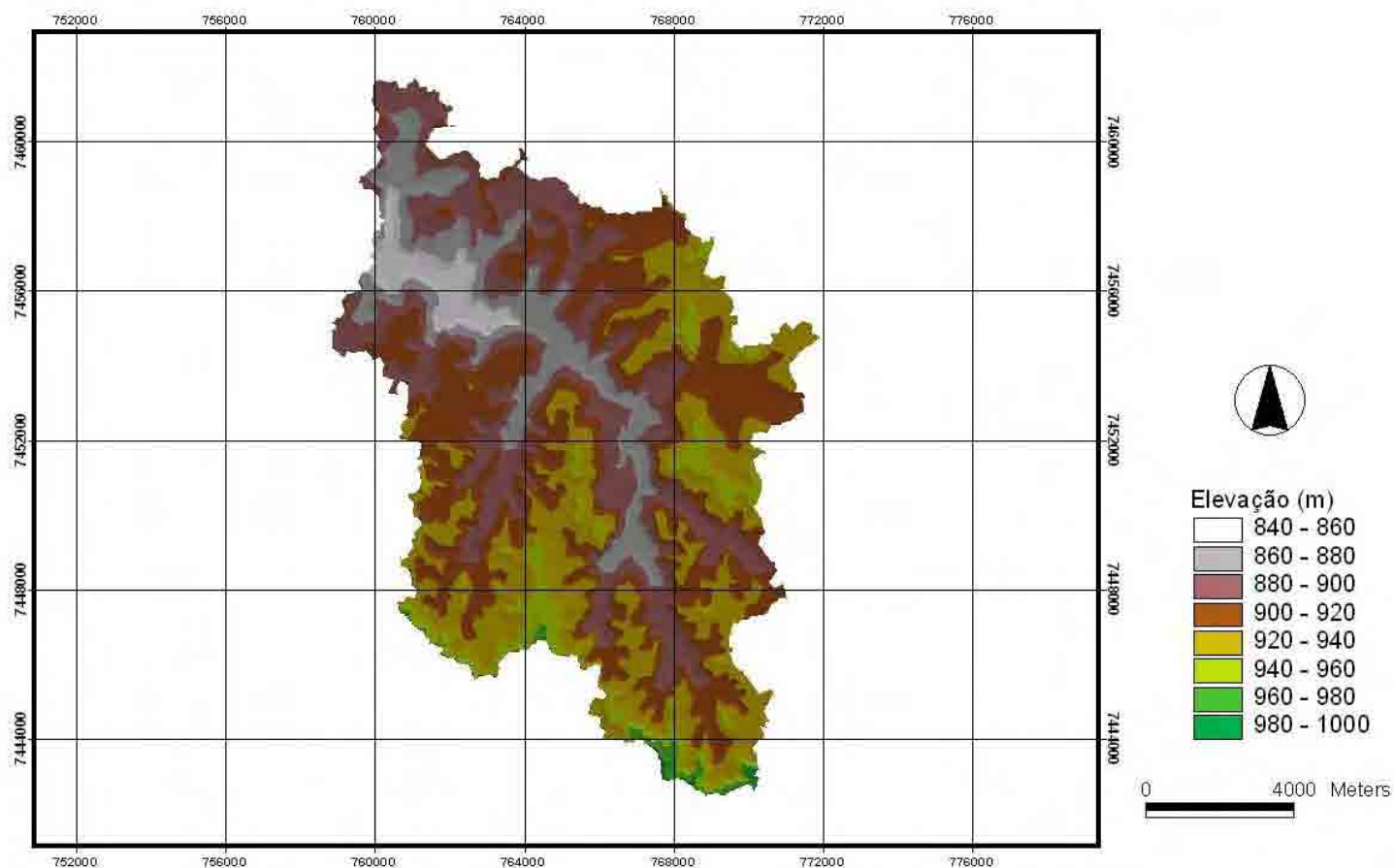


Figura 12. Modelo Digital de Elevação do Terreno da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

O MDT foi obtido a partir da interpolação dos dados de altimetria, em metros. Como as curvas de nível apresentam uma equidistância vertical de 20 metros, se faz necessário levantar a altitude em todos os pontos da bacia. O método de interpolação utilizado foi o TIN, *Triangulated Irregular Network*, estrutura mais indicada para a modelagem de superfícies contínuas utilizando dados vetoriais.

Na Figura 13, o mapa de classes de declividade apresenta classes de declividade de 6 em 6%, parâmetro determinado pelo próprio programa.

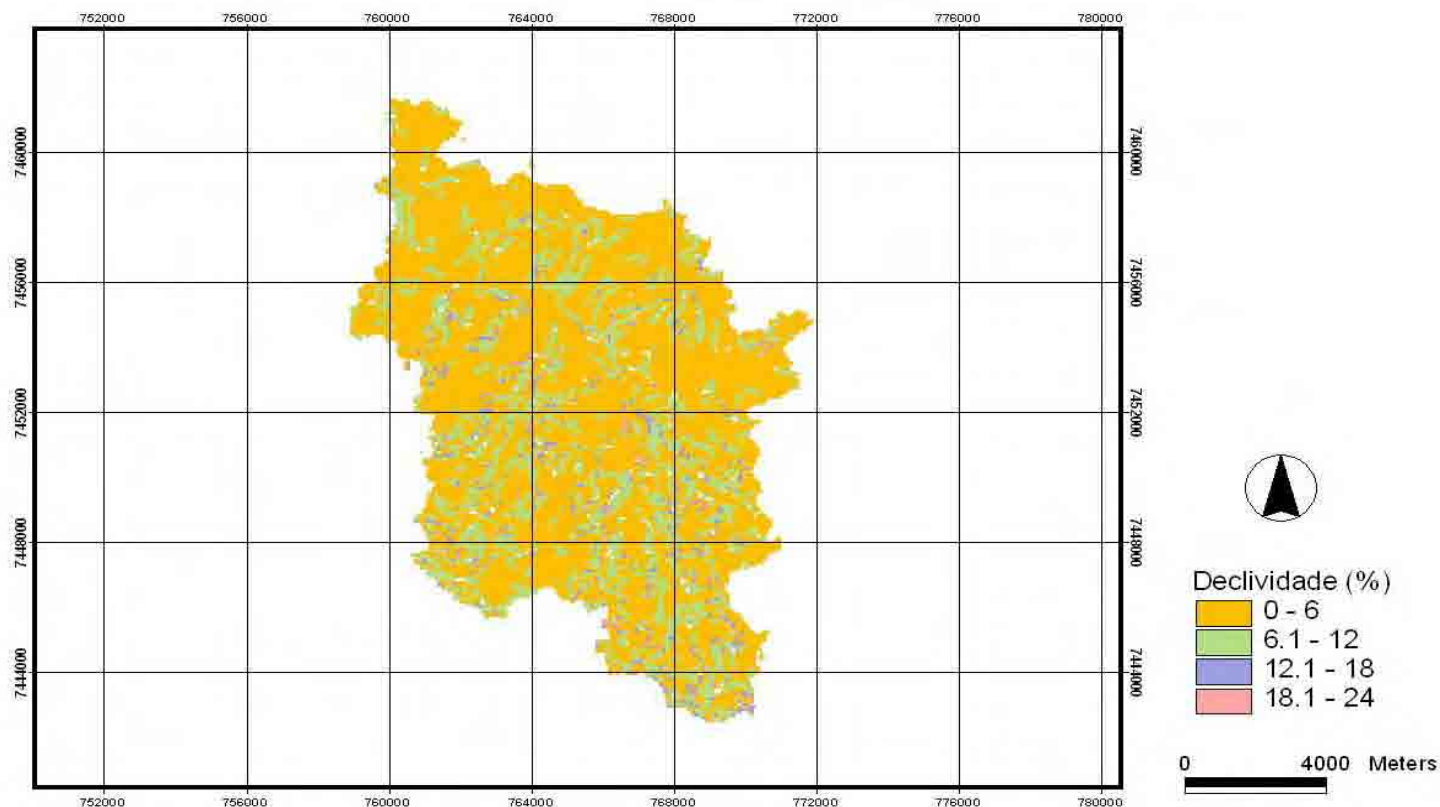


Figura 13. Classes de declividade da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Da área total, cerca de 90% tem uma declividade variando de 0 até 12%. As maiores declividades são encontradas ao longo do Front da Cuesta, na faixa leste e sul, nas proximidades da nascente do Rio Pardo, em Pardinho-SP, sendo que não é mostrada nenhuma área com declividade maior a 24%.

Na Figura 14 está exposta a bacia em visão tridimensional.

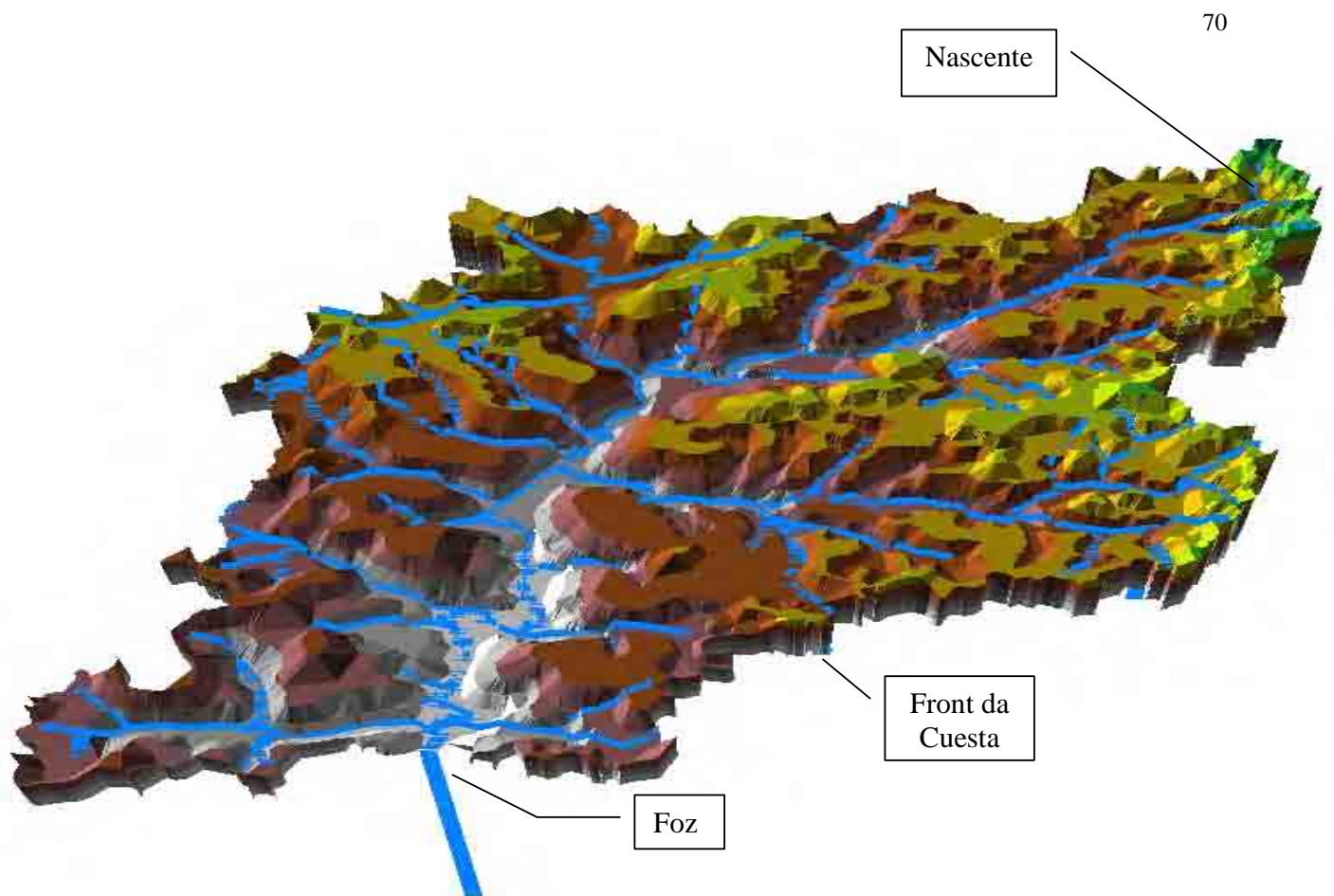


Figura 14. Bacia Experimental do Rio Pardo-SP em 3D.

Com a imagem da Bacia Experimental do Rio Pardo em 3D, pode-se observar com clareza as formações rochosas do Front da Cuesta próximas à nascente do Rio Pardo em Pardinho-SP, onde foram encontradas as declividades mais acentuadas da bacia. A bacia foi rotacionada para melhor visão da nascente, na parte superior e a captação na parte inferior.

6.2. Divisão da bacia hidrográfica

A bacia em estudo foi reclassificada, passando de 148,76 km² para uma área de 129,22 km², sendo dividida em 39 sub-bacias com uma área de drenagem mínima

de 200 ha cada. A divisão foi efetuada com base na análise da rede de drenagem principal, em conjunto com as altitudes distribuídas em toda a área, utilizando para isso o MDT. Esta divisão visou identificar eventuais áreas de risco facilitando o diagnóstico e o manejo da área. A subdivisão está sendo apresentada na Figura 15, com a rede de drenagem principal e o ponto de saída de cada sub-bacia.

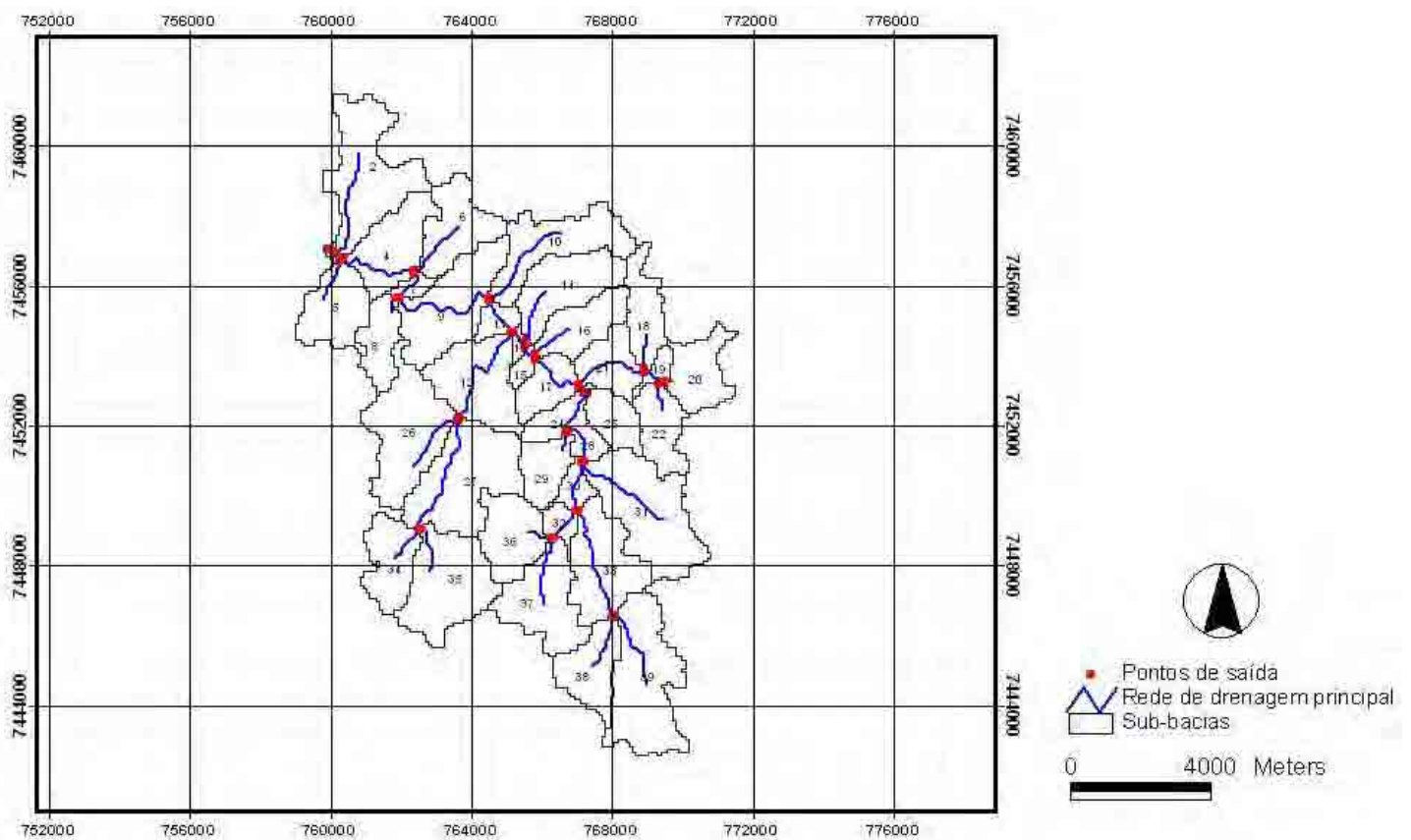


Figura 15. Divisão da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP em sub-bacias.

A divisão da área de estudo em sub-bacias visou principalmente o levantamento dos dados fisiográficos de cada sub-bacia para que eventuais problemas pudessem ser analisados e solucionados individualmente.

Utilizando o mapa de solos de Zimback (1997) foi atribuído para cada sub-bacia apenas um tipo de solo, sendo discriminado aquele que predomina na bacia (Figura 16). No Quadro 4 foi representada a distribuição ao longo da bacia.

Quadro 4. Distribuição dos tipos de solos.

Solos presentes na Bacia Experimental do	Porcentagem
Rio Pardo	
Latossolo Vermelho-Escuro (LE)	53
Podzólico Vermelho-Amarelo (PV)	35
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)	8
Hidromórfico (Hi)	3
Latossolo Roxo (LR)	1
Total	100 %

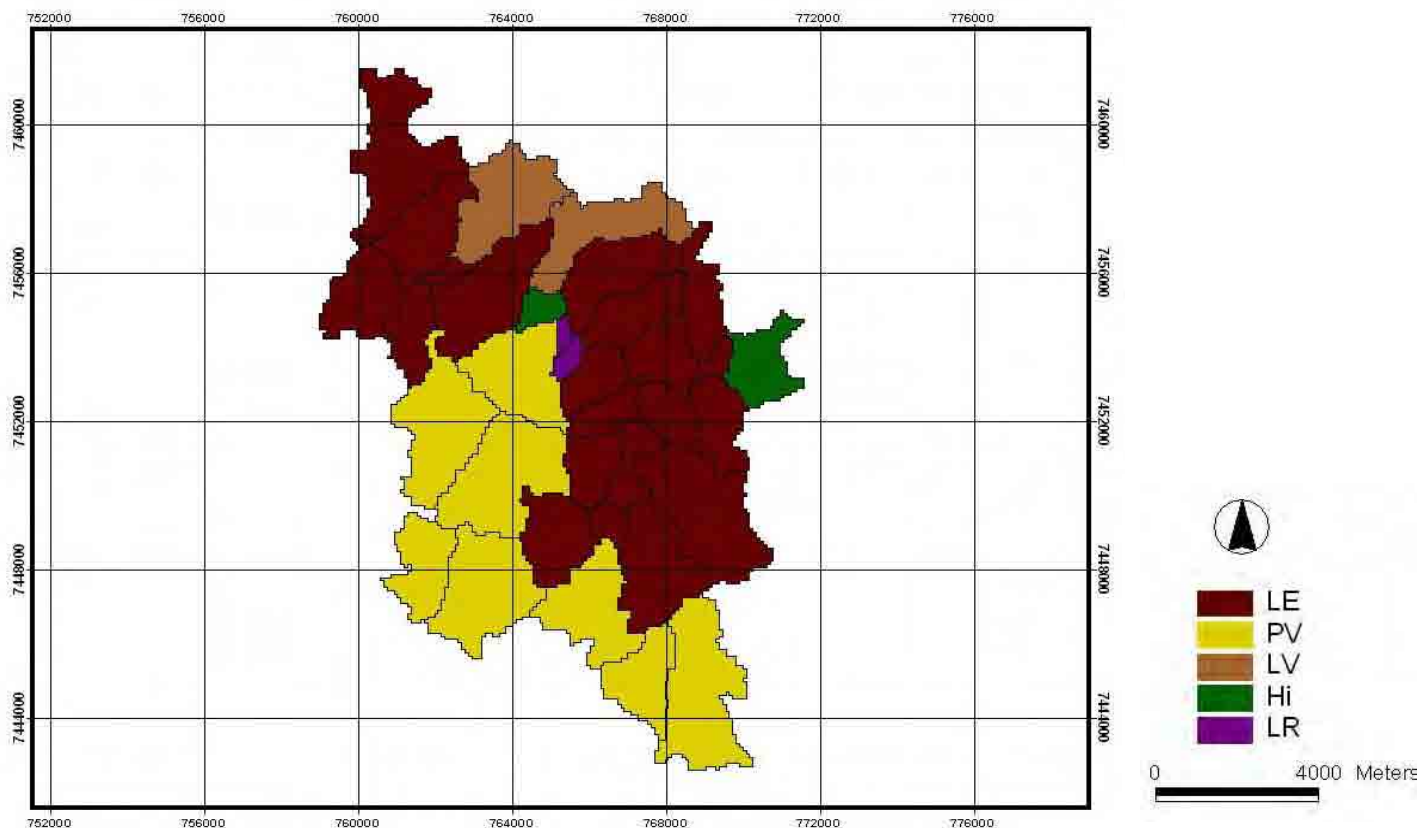


Figura 16. Mapa de solos predominante das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Pelo mapa de solos (Figura 16) pode-se perceber que na região mais alta da bacia, onde está localizada a nascente do Rio Pardo, existe a predominância de solo Podzólico Vermelho-Amarelo. Por se tratar de um solo extremamente suscetível à processos erosivos, que apresentam grandes perdas de solos (Bertoni & Lombardi Neto, 1990) estas sub-bacias merecem especial atenção, para que a nascente do Rio Pardo não seja comprometida por processos de assoreamento.

Tendo como ferramenta a imagem do satélite Landsat5, bandas TM 3, 4 e 5, foi efetuada a classificação supervisionada do uso do solo para as 39 sub-bacias. Em toda a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, foram determinados 3 tipos de uso do solo predominantes. Na Figura 17, está exposta a distribuição do uso do solo na área de estudo.

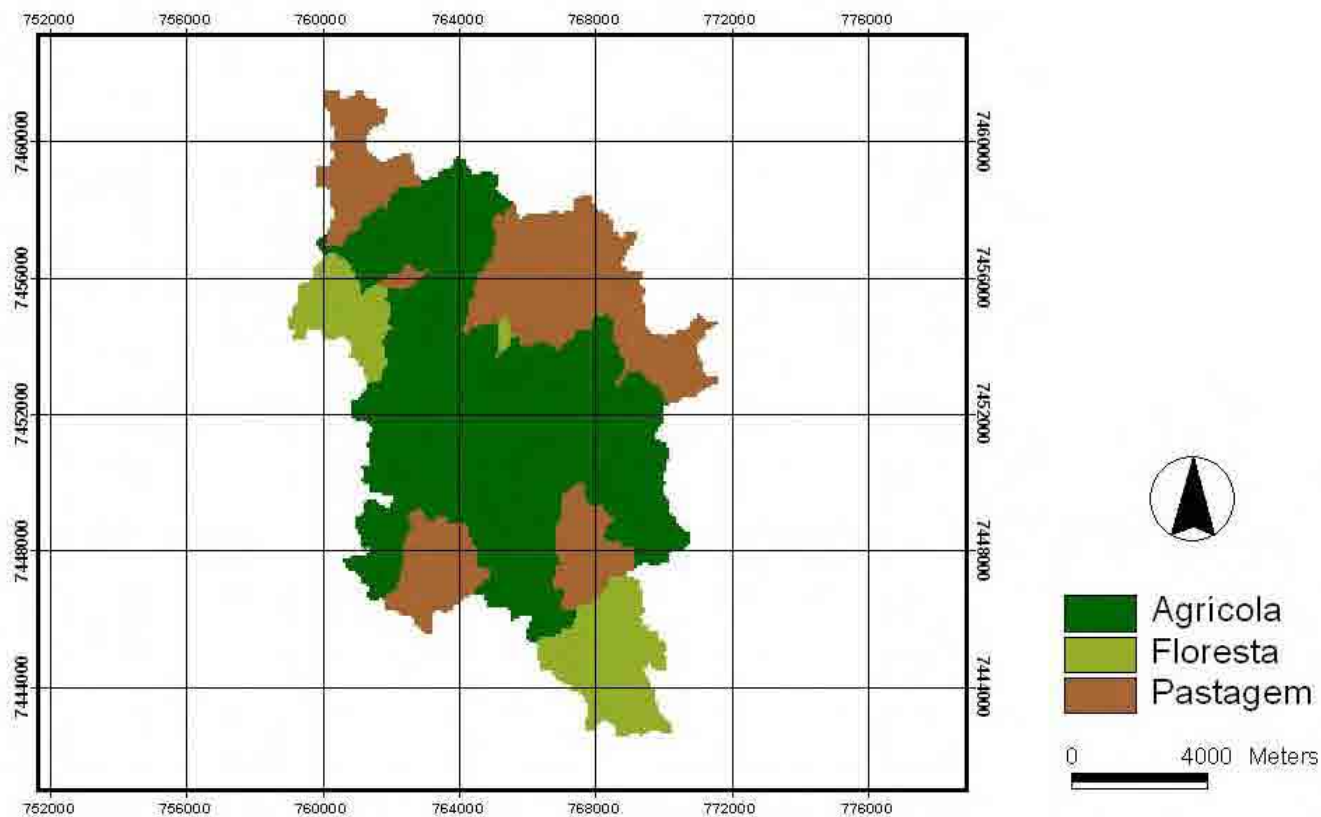


Figura 17. Mapa da distribuição do uso do solo da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

No Quadro 5, está exibida a distribuição do uso do solo.

Quadro 5. Distribuição do uso dos solos e área.

Uso do Solo	Área (ha)	Área da Bacia (%)
Agrícola	7218.18	55.86
Floresta	1728.46	13.38
Pastagem	3975.00	30.76
Total	12921.64	100%

Apesar das florestas representarem apenas cerca de 13% da cobertura de toda a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, deve-se ressaltar que esta distribuição ocorre principalmente nas sub-bacias onde está localizada a nascente do Rio Pardo. Fator relevante, visto que a cobertura vegetal, principalmente quando composta de florestas, segundo Netto (1998), apresentam os maiores valores de infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial e protegendo assim, a nascente do Rio Pardo.

Pela distribuição dos usos na bacia detectou-se que a maior parte dela está sendo utilizada com culturas agrícolas, fator que pode determinar maiores perdas de solo devido à grande mobilização deste. Isso ocorre devido à mecanização das lavouras, causando diminuição da espessura do solo, e conseqüentemente a diminuição do teor de matéria orgânica e de outros nutrientes. A diminuição no teor de matéria orgânica afeta não só a fertilidade natural do solo, mas também diminui a sua resistência ao impacto das gotas de chuva, ocasionando um aumento nas taxas de escoamento superficial (Guerra, 1998).

No Quadro 6, têm-se a distribuição do solo, uso do solo e área para cada sub-bacia. Pelo Quadro 6, pode-se classificar o uso dado para cada classe de solo, sendo que os solos PV e LE foram utilizados para os três tipos de uso: agrícola, floresta e pastagem, o solo LR foi utilizado com floresta e uso agrícola, o solo LV utilizado com pastagem e uso agrícola e o solo Hi foi apenas utilizado com pastagem.

Quadro 6. Distribuição do solo, uso dos solos e área para cada sub-bacia.

Sub-bacia	Solo	Uso do Solo	Área (ha)	Área daBacia (%)
1	LE	Agrícola	10.07	0.08
2	LE	Pastagem	702.38	5.44
3	LE	Agrícola	7.74	0.06
4	LE	Agrícola	420.50	3.25
5	LE	Floresta	381.00	2.95
6	LV	Agrícola	561.44	4.34
7	LE	Pastagem	59.63	0.46
8	LE	Floresta	237.74	1.84
9	LV	Agrícola	619.52	4.79
10	LV	Pastagem	521.95	4.04
11	Hi	Pastagem	100.67	0.78
12	PV	Agrícola	515.75	3.99
13	LR	Floresta	34.07	0.26
14	LE	Pastagem	451.48	3.49
15	LR	Agrícola	56.53	0.44
16	LE	Pastagem	309.76	2.40
17	LE	Agrícola	226.90	1.76
18	LE	Pastagem	283.43	2.19
19	LE	Pastagem	68.15	0.53
20	Hi	Pastagem	314.41	2.43
21	LE	Agrícola	264.84	2.05
22	LE	Agrícola	283.43	2.19
23	LE	Agrícola	9.29	0.07
24	LE	Agrícola	153.33	1.19
25	LE	Agrícola	207.54	1.61
26	PV	Agrícola	663.66	5.14
27	PV	Agrícola	729.48	5.65
28	LE	Agrícola	84.41	0.65
29	LE	Agrícola	233.09	1.80
30	LE	Agrícola	102.22	0.79
31	LE	Agrícola	740.33	5.73
32	LE	Agrícola	92.93	0.72
33	LE	Pastagem	529.69	4.10
34	PV	Agrícola	343.06	2.65
35	PV	Pastagem	633.46	4.90
36	LE	Agrícola	375.58	2.91
37	PV	Agrícola	516.52	4.00
38	PV	Floresta	337.64	2.61
39	PV	Floresta	738.00	5.71

6.3. Parâmetros fisiográficos

Com a reclassificação da bacia e conseqüentemente a sub-divisão em sub-bacias foi possível determinar características físicas das sub-bacias geradas pelo SIG-BASINS 3.0 (Quadros 7 e 8). As características determinadas são necessárias para os cálculos dos parâmetros hidrológicos das sub-bacias, a fim de que se possa detectar áreas com possíveis problemas.

Nos Quadros 7 e 8 são levantadas características que envolvem o aspecto físico das sub-bacias. Aspectos importantes como a área de drenagem de cada sub-bacia associada ao comprimento da rede de drenagem principal, permite uma real visão das sub-bacias que podem sofrer com problemas relacionados a enchentes. Sub-bacias que apresentam uma complexa área de drenagem podem ter o surgimento de novos canais, aumentando a densidade de drenagem durante a estação chuvosa.

As notações das declividades médias das sub-bacias mostram valores de 2,96% (relevo plano) a 16,36 (relevo forte ondulado) de declividade, com grande heterogeneidade ao longo da bacia, não mostrando predominância de áreas mais planas ou mais declivosas em pontos específicos e localizados.

Apenas o comprimento de rampa não é suficiente para a previsão de nenhum comportamento hidrológico das sub-bacias, necessitando também da declividade e, segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), multiplicando-se os dois valores, obtém-se o parâmetro LS, exposto no Quadro 9.

No Quadro 8 estão expostas as características físicas dos canais de drenagem em cada sub-bacia.

A sub-bacia de descarga refere-se à sub-bacia que recebe as águas das anteriores, assim, a área de drenagem de cada uma, também refere-se à somatória de todas as sub-bacias que contribuem com a drenagem.

O comprimento do canal principal representa apenas o canal que possui o ponto de descarga da sub-bacia.

O comprimento total da bacia foi calculado totalizando 17 km e a diferença entre a maior (1000 m) e a menor (840 m) cota resultou em 160 m, apresentando então razão de relevo de 0,001 m/m, ou 0,1%, com desnível de 0,001 m a cada metro de canal.

No Quadro 8 estão expostas as Razões de Relevo para cada sub-bacia, individualmente.

O modelo SWAT assume a forma do canal trapezoidal com 2:1 de declividade lateral e taxa de largura/profundidade de 10:1. Em função disso que no Quadro 8, as profundidades apresentam valores pequenos enquanto que mostram valores altos de largura. Segundo Tucci (1998), a maior parte dos modelos hidrológicos foram idealizados por planos de escoamento com pequena profundidade e grande largura, nem sempre representando fielmente a conformação da bacia e do canal.

Quadro 7. Características físicas das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Sub-bacias	Área (ha)	Comprimento da Sub-bacia (m)	Declividade Média da Sub-bacia (%)	Comprimento de Rampa (m)	Altitude Média (m)
1	10.07	319.23	3.83	91.46	840.00
2	702.38	5566.17	4.97	91.46	880.00
3	7.74	352.00	3.37	91.46	840.00
4	420.50	5280.88	4.52	91.46	860.00
5	381.00	4000.56	9.08	60.98	880.00
6	561.44	5211.64	16.36	18.29	876.11
7	59.63	1293.22	4.32	91.46	840.00
8	237.74	3239.16	6.36	60.98	880.00
9	619.52	5168.94	5.69	60.98	840.00
10	521.95	6070.47	10.87	36.59	920.00
11	100.67	1648.54	4.67	91.46	860.00
12	515.75	4660.50	6.01	60.98	860.00
13	34.07	1223.71	4.67	91.46	860.00
14	451.48	4657.41	3.92	91.46	900.25
15	56.53	1436.86	6.24	60.98	889.48
16	309.76	3490.98	5.42	60.98	900.00
17	226.90	283.67	6.84	60.98	880.00
18	283.43	4194.21	15.70	24.39	920.00
19	68.15	1696.95	2.96	91.46	900.00
20	314.41	2475.38	7.03	60.98	919.67
21	264.84	2972.18	5.49	60.98	880.00
22	283.43	401.13	4.49	91.46	920.00
23	9.29	532.01	6.36	60.98	880.00
24	153.33	2532.45	5.33	60.98	882.46
25	207.54	2990.48	5.37	60.98	908.20
26	663.66	3739.72	6.61	60.98	900.00
27	729.48	4261.74	6.72	60.98	884.21
28	84.41	1519.46	8.96	60.98	884.17
29	233.09	371.39	5.97	60.98	886.07
30	102.22	2140.45	8.03	60.98	880.00
31	740.33	367.61	8.67	60.98	886.66
32	92.93	1609.56	9.63	60.98	860.00
33	529.69	138.16	7.13	60.98	898.34
34	343.06	3271.29	15.20	24.39	920.00
35	633.46	540.58	8.55	60.98	922.53
36	375.58	2744.29	4.78	91.46	915.07
37	516.52	4947.13	8.36	60.98	880.00
38	337.64	3621.62	6.72	60.98	900.00
39	738.00	5129.37	10.41	36.59	900.00

Quadro 8. Características do canal de drenagem das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Sub-bacias	Sub-bacia de descarga	Área Drenagem (ha)	Canal Principal (m)	Razão de Relevo (%)	Largura (m)	Prof. (m)	Altitude Mínima (m)	Altitude Máxima (m)
1	0	12921.64	467.72	0.10	23.84	0.91	840.00	840.00
2	1	702.38	3415.66	0.59	4.15	0.28	840.00	860.00
3	1	12209.19	336.90	0.10	23.05	0.89	840.00	840.00
4	3	561.44	2493.66	1.32	3.63	0.26	840.00	872.96
5	3	11820.44	2461.41	0.10	22.60	0.88	840.00	840.00
6	4	10838.50	1047.16	0.10	21.46	0.85	840.00	840.00
7	4	381.00	1370.40	1.46	2.88	0.22	840.00	860.00
8	7	521.95	3179.37	1.00	3.48	0.25	860.00	891.79
9	7	237.74	556.90	0.10	2.17	0.18	840.00	840.00
10	9	10541.13	3435.72	0.58	21.10	0.84	840.00	860.00
11	9	9399.67	1171.61	0.10	19.70	0.80	860.00	860.00
12	11	6413.58	585.80	0.10	15.66	0.69	860.00	860.00
13	11	451.48	1937.93	1.03	3.19	0.24	860.00	880.00
14	13	5928.03	461.35	0.10	14.94	0.67	860.00	860.00
15	13	309.76	1428.33	1.94	2.54	0.20	860.00	887.76
16	15	283.43	1315.60	0.57	2.41	0.20	900.00	907.54
17	15	665.98	725.35	0.10	4.02	0.28	900.00	900.00
18	21	314.41	308.00	0.10	2.57	0.21	900.00	900.00
19	21	1214.26	2212.87	1.81	5.77	0.35	860.00	900.00
20	19	5561.74	1808.96	0.10	14.38	0.65	860.00	860.00
21	17	4120.58	336.90	0.10	12.01	0.58	860.00	860.00
22	19	207.54	256.45	0.10	2.00	0.17	860.00	860.00
23	17	283.43	908.90	0.10	2.41	0.20	900.00	900.00
24	23	2885.41	3450.76	0.10	9.70	0.50	860.00	860.00
25	23	3903.75	1435.61	0.10	11.63	0.56	860.00	860.00
26	12	233.09	608.49	1.19	2.14	0.18	860.00	867.26
27	12	3517.32	1165.35	0.10	10.92	0.54	860.00	860.00
28	24	663.66	2171.73	0.92	4.02	0.28	860.00	880.00
29	24	2692.59	1590.25	0.10	9.30	0.49	860.00	860.00
30	28	740.33	3127.73	0.64	4.29	0.29	860.00	880.00
31	28	1706.00	3802.81	0.53	7.08	0.40	860.00	880.00
32	30	985.04	1047.16	0.10	5.09	0.32	860.00	860.00
33	30	375.58	858.29	4.67	2.85	0.22	860.00	900.00
34	27	343.06	1197.55	1.67	2.70	0.21	880.00	900.00
35	27	633.46	1634.38	1.22	3.91	0.27	880.00	900.00
36	32	516.52	2338.34	0.86	3.46	0.25	860.00	880.00
37	32	1605.33	3502.37	0.57	6.82	0.39	860.00	880.00
38	33	337.64	1828.59	1.09	2.68	0.21	880.00	900.00
39	33	738.00	2520.59	0.79	4.28	0.29	880.00	900.00

6.4. Parâmetros hidrológicos e produção de sedimentos

A quantificação dos fluxos de água e produção de sedimentos da bacia, bem como os demais parâmetros hidrológicos têm importância significativa nos processos erosivos, que são responsáveis pelas transformações ocorridas no relevo sob diversas condições climáticas e geológicas. No Quadro 9 em uma simulação para cinco anos, estes parâmetros podem ser melhor analisados, tendo sido modelados e gerados pelo SWAT.

Com relação às características hidrológicas das sub-bacias apresentadas no Quadro 9, algumas informações devem ser analisadas com uma maior atenção. Nas sub-bacias com predominância de solo Podzólico Vermelho-Amarelo e uso agrícola, constatou-se que a produção de sedimentos foi bastante elevada, variando de 73,47 a 233,70 t/ha, podendo ser observado pelo assoreamento do canal (Figura 18).

Essa alta produção de sedimentos ocorre principalmente por se tratar de um solo extremamente suscetível a processos erosivos, em conjunto com outros agravantes. As sub-bacias que apresentaram essas características possuem um alto valor de CN (Curva Número), o que indica uma baixa taxa de infiltração e uma alta produção de escoamento superficial, produzindo assim, uma grande quantidade de sedimentos. O escoamento superficial é agravado em áreas que apresentam deficiência na ocorrência de mata ciliar, pois a quantidade de energia que chega ao solo durante uma chuva é maior. Com a presença de mata ciliar, ocorre uma minimização dos impactos das gotas, pois parte da água precipitada é interceptada pela vegetação, diminuindo a formação de crostas no solo, e reduzindo a erosão.

As matas ciliares são geralmente áreas de vegetação natural situadas entre áreas cultivadas e cursos de água. Podem ser definidas ainda, como a interface entre os ecossistemas aquático e terrestre e são identificadas, basicamente, pelas características do solo

e comunidades vegetais únicas, adaptadas a cheias de alta magnitude e curta duração (Simões, 2001).

Segundo Muscutt et al. (1993), as matas ciliares reduzem a relação entre a fonte poluidora e o curso de água, fornecendo uma barreira física e bioquímica contra a entrada de poluição de fontes distantes dos cursos de água.

Em situações onde ocorre o escoamento superficial, a mata ciliar atua como barreira vegetativa, diminuindo a capacidade de transporte de sedimentos. A maior parte dos sedimentos em suspensão nos rios provém das próprias margens, confirmando a importância da mata ciliar, como agente estabilizador. A presença de mata ciliar em áreas de pastagem atua como obstáculo ao acesso do gado às margens, reduzindo a destruição das mesmas (Simões, 2001).

Na Figura 19, pode-se constatar que a Bacia Experimental do Rio Pardo-SP apresenta, em vários pontos, ausência de mata ciliar ocasionando os problemas descritos anteriormente.

Quadro 9. Características hidrológicas das sub-bacias da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Sub-bacias	Uso	Solo	Curva Número	USLE (LS)	Escoamento Superficial (mm)	ET (mm)	Produção de Sedimento (t/ha)
1	Agrícola	LE	77.00	1.21	238.88	449.55	14.6
2	Pastagem	LE	69.00	0.93	182.49	588.18	6.02
3	Agrícola	LE	77.00	0.54	318.82	529.7	7.8
4	Agrícola	LE	77.00	0.80	317.11	527.76	19.54
5	Floresta	LE	60.00	1.82	93.47	528.49	2.27
6	Agrícola	LV	67.00	2.25	161.97	488.62	23.25
7	Pastagem	LE	69.00	0.75	184.17	589.68	4.81
8	Floresta	LE	60.00	1.08	93.49	528.77	1.26
9	Agrícola	LV	77.00	0.91	316.82	526.93	23.67
10	Pastagem	LV	49.00	1.78	30.04	555.9	1.96
11	Pastagem	Hi	49.00	0.85	27.79	563.46	0.59
12	Agrícola	PV	77.00	0.98	335.09	486.17	73.47
13	Floresta	LR	60.00	0.85	70.22	563.78	0.3
14	Pastagem	LE	69.00	0.65	182.52	588.16	3.83
15	Agrícola	LR	77.00	1.03	273.1	554.87	11.58
16	Pastagem	LE	69.00	0.84	179.77	586.94	7.68
17	Agrícola	LE	67.00	1.18	135.55	585.64	11.49
18	Pastagem	LE	69.00	2.49	181.04	583.66	18.59
19	Pastagem	LE	69.00	0.46	162.72	584.87	2.89
20	Pastagem	Hi	49.00	1.23	25.41	559.57	1.28
21	Agrícola	LE	77.00	0.87	270.6	588.41	18.01
22	Agrícola	LE	67.00	0.80	154.87	529.6	9.51
23	Agrícola	LE	77.00	1.08	308.94	495.19	16.6
24	Agrícola	LE	77.00	0.82	270.92	586.05	15.55
25	Agrícola	LE	77.00	0.84	294.03	584.84	18.26
26	Agrícola	PV	83.00	1.13	472.18	482.98	122.39
27	Agrícola	PV	83.00	1.15	472.2	482.87	126.59
28	Agrícola	LE	77.00	1.79	268.38	605.64	30.84
29	Agrícola	LE	77.00	0.98	298.57	531.65	22.95
30	Agrícola	LE	77.00	1.50	264.4	585.68	27.13
31	Agrícola	LE	77.00	1.70	290.58	544.71	41.39
32	Agrícola	LE	77.00	1.98	268.62	605.71	35.03
33	Pastagem	LE	69.00	1.25	127.89	674.57	7.96
34	Agrícola	PV	83.00	2.36	464.77	480.23	233.7
35	Pastagem	PV	79.00	1.67	359.72	545.42	63.98
36	Agrícola	LE	77.00	0.87	277.58	607.24	18.28
37	Agrícola	PV	83.00	1.61	465.84	480.87	165.89
38	Floresta	PV	73.00	1.15	268.54	490.26	14.71
39	Floresta	PV	73.00	1.66	267.11	445.86	23.34



Figura 18. Rio Pardo-SP, parcialmente assoreado.



Figura 19. Ausência de mata ciliar às margens do Rio Pardo.

A intensidade de erosão e produção de sedimentos são grandemente afetadas pelo comprimento da rampa e gradiente topográfico da bacia, sendo o fator LS o que melhor expressa esta tendência. Sub-bacias com maior fator LS apresentam maior suscetibilidade potencial à erosão. A sub-bacia 18 apresentou o maior fator LS, muito provavelmente devido a sua alta declividade.

A evapotranspiração potencial para cada sub-bacia está relacionada com a área de captação desta e do seu uso atual. A variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração não é tão grande, variando de 444,86 mm a 674,57 mm.

Outro fator importante quanto à mata ciliar é que sua presença aumenta a rugosidade da superfície da bacia, aumentando o tempo de permanência da água na superfície do solo, aumentando, assim, a sua infiltração (Bertoni & Lombardi Neto, 1990)

De uma maneira geral, quanto maior o volume de água escoado superficialmente, maior a produção de sedimentos que chegam até a calha da rede de drenagem, em cada sub-bacia. Em alguns casos, como nas sub-bacias 3 e 4, com o mesmo tipo de solo e mesmo fator CN, ocorreu o inverso, o maior escoamento superficial gerou menor produção de sedimentos (sub-bacia 3). O fato, citado por Bertoni & Lombardi Neto (1990), é justificado, neste caso porque a sub-bacia possui maior declividade. Assim, se a declividade da bacia aumenta quatro vezes, a velocidade do escoamento superficial aumenta duas vezes e a produção de sedimentos quadruplica.

No Quadro 10, os parâmetros foram calculados mensalmente para toda a bacia. Percebe-se que, na estação das chuvas, ocorre uma maior produção de água e conseqüentemente é gerada uma quantidade maior de sedimentos.

Quadro 10. Média mensal da simulação entre o período de 1997 a 2001 dos dados hidrológicos da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP.

Mês	Precipitação (mm)	Escoamento Superficial (mm)	Produção de Água (mm)	Produção de Sedimento (t/ha)
Jan	212.34	77.56	120.20	18.12
Fev	217.13	46.19	92.90	8.29
Mar	138.93	16.12	69.71	2.15
Abr	27.26	0.05	46.18	0.01
Mai	62.18	2.70	43.21	0.49
Jun	54.81	1.82	36.78	0.30
Jul	31.39	1.29	32.60	0.20
Ago	52.87	5.22	33.69	0.71
Set	98.97	20.05	48.50	2.80
Out	82.21	4.72	34.64	0.57
Nov	172.62	28.18	61.83	3.61
Dez	217.13	60.23	103.40	6.76
Média Anual	1367.84	264.13	723.64	44.01

A quantidade de água captada pela bacia foi de 1367,84 mm, mostrando que a somatória das precipitações equivale à pluviosidade média da região (1100 a 1700 mm, segundo Carvalho & Jim, 1983).

Da mesma maneira que para as sub-bacias (Quadro 9), para a bacia, quanto maior o escoamento superficial, maior a produção de sedimentos.

A produção total de sedimentos da bacia foi de 44 t/ha. Segundo dados obtidos por Lombardi Neto & Bertoni (1975), os valores de tolerância média de perdas de solo variam de 4,5 a 13,4 t/ha/ano, para B textural e de 9,6 a 15,0 t/ha/ano para B latossólico. No caso da bacia em estudo, as perdas excederam a tolerância, devendo a bacia ter seu uso e manejo readequados visando diminuir as perdas de solo.

7. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos no estudo da Bacia Experimental do Rio Pardo-SP, pode-se sumarizar as seguintes conclusões:

- o SIG-BASINS 3.0 propiciou a confecção de banco de dados completos e de fácil acesso;
- o SIG-BASINS 3.0 propiciou completo estudo fisiográfico da bacia;
- o modelo SWAT elaborou os cálculos para a produção de sedimentos para cada sub-bacia.

Quanto às perdas de solo ocorridas na bacia pode-se concluir:

- na maior parte das sub-bacias os limites de tolerância de perdas de solo foram superados;
- todas as sub-bacias com predominância de solos podzólicos apresentaram perdas de solo maiores que os limites tolerados;

- nas sub-bacias com predominância de latossolos, e mais próximas à nascente do Rio Pardo, as perdas de solo foram menores, nas demais as perdas superaram a tolerância;
- para o cálculo envolvendo toda a bacia, as perdas de solo foram quase que três vezes superiores ao limite admissível.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADOBE SYSTEMS INCORPORATED. *Adobe Photoshop 5.0*. San Jose, 1998.

ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., NICKS, A.D., SAMMONS, N.B. *SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management*. Texas: College Station, Texas A&M University Press, 1990. 255p.

ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.*, v.142, p.47-69, 1993.

ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., MAIDMENT, D.R. Continuous-time watershed sediment routing model for large basins. *J. Hydrol.*, v.2, p.121, 1995.

ARNOLD, J.G., SCRINIVASAN, R., RAMANARAYANAN, T.S., DiLUZIO, M. Water resources of the Texas Gulf Basin. *Water Sci. Techol.*, v.39, p.121-33, 1999.

ASSAD, E.D., SANO, E.E., MEIRELLES, M.L., MOREIRA, L. Estruturação de dados geoambientais no contexto de microbacia hidrográfica. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. *Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura*. 2.ed. Planaltina: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – Embrapa, 1998. p.119-37.

- ASSIS, J.C. Recursos hídricos: gestão participativa e descentralizada. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS, 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: CREA-RJ, 1997. p.4-7.
- AUTODESK. *AutoCAD Map 2000*. San Rafael, 1999
- BECKER, A., BRAUN, P. Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling. *J. Hidrol.*, v.217, p.239-52, 1999.
- BERTOLINI, D., BELLINAZZI JÚNIOR, R. *Levantamento do meio físico para determinação da capacidade de uso das terras*. 2.ed. Campinas: CATI, 1991. 29p.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. 2.ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.
- BONHAM-CARTER, G.F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Oxford: Pergamon Press, 1994. 414p.
- BRANCO, S.M. *Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária*. 3.ed. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 1986. 640p.
- BUCENE, L.C. *Sistema de informação geográfica na classificação de terras para irrigação, em Pardinho-SP*. Botucatu, 2002. 177p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- BURROUGH, P.A., McDONNELL, R.A. *Principles of geographical information systems*. Oxford: Oxford University Press, 1998. 356p.
- CALIJURI, M.L., CALIJURI, M.C., TUNDISI, J.G., RIOS, L. Implantação de um sistema de informação geográfica na bacia hidrográfica do ribeirão e Represa do Lobo (Broa) – Estado de São Paulo. In: GIS BRASIL 94: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO. 1, 1994, Curitiba. *Anais...*Curitiba: SAGRES, 1994. p.35-43.

- CALIJURI, M.L., MEIRA, A.D., PRUSKI, F.F. Geoprocessamento aplicado aos recursos hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Cartografia, sensoriamento e geoprocessamento. *Anais...*Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1998. p.167-225.
- CÂMARA, G., MEDEIROS, J.S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. *Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura*. 2.ed. Planaltina: Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – Embrapa, 1998. p.3-11.
- CÂMARA, G., ORTIZ, M.J. Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais: uma visão geral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA: CARTOGRAFIA, SENSORIAMENTO E GEOPROCESSAMENTO, 27, 1998, Poços de Caldas. *Anais...*Lavras: UFLA, 1998. p.59-88.
- CAMPOS, S.P. *Planejamento agroambiental de uma microbacia hidrográfica utilizando um sistema de informações geográficas*. Botucatu, 2001. 137p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- CARVALHO, N.O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1994. 372p.
- CARVALHO, W.A., JIM, J. *Áreas de proteção ambiental: Região da “Serra de Botucatu” e Região da “Serra de Fartura”*. Botucatu: Instituto Básico de Biologia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1983. 47p.
- CASTRO, J.F.M. *Princípios de cartografia sistemática, cartografia temática e sistema de informação geográfica (SIG)*. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1996. 40p.

- CHEVALLIER, P. Aquisição e processamento de dados. In: TUCCI, C.E.M. (Org) *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade do Rio Grande do Sul, Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p.485-90.
- CHOW, VEN TE. *Handbook of applied hydrology – a compendium of water-resources technology*. New York: McGraw-Hill, 1964. 174p.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Modelagem de sistemas ambientais*. 1.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.
- CONTE-CASTRO, A.M., CONTE, M.L., MARTINS, V.H. Qualidade da água em bacia hidrográfica de múltiplos usos, em dois períodos. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA RURAL, 2, CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERIA RURAL, 5, 1998, La Plata. *Libro de las Memórias... Libro de las memórias: avances en el manejo del surlo e água en la Ingeniería Rural Latinoamericana*, La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1998. p.296-301.
- CONTE, M.L. *Aspectos quantitativos e qualitativos das águas da Bacia Experimental do Rio Pardo – Região de Botucatu, SP*. Botucatu, 1999. 157p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- DAINESE, R.C. *Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não-supervisionada e análise visual*. Botucatu, 2001. 186p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- DAWEN, Y., SRIKANTHA, H., KATUNI, M. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. *Hydrol. Proc.*, v.14, p.403-16, 2000.

- DEFFUNE, G. *A avaliação dos recursos hídricos na geografia*. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 1994. 41p. (Apontamentos, 25)
- DUAN, Q., GUPTA, V.R., SOROOSHIAN, S. *Automatic calibration of the models SWAT 99.2 and SWAT-G with the SCE-VA algorithm*. University of Arizona, 1994. Disponível em: <http://www.eckhardt.metcon-umb.de/kalibrierung/anleitung.html>. Acesso em: 11 fev. 2003.
- EASTMAN, J.R. *IDRISI 32 for Windows: guide to GIS and image processing*. Massachusetts: Clark University, 1999. 2v.
- ELIAS, A.R., CARVALHO, W.A., FREIRE, O., ZIMBACK, C.R.L., SABINO, W.C. Mapa digital de erosão da Bacia do Alto Limoeiro. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4, 1998, Presidente Prudente. *Anais...Presidente Prudente: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia*, 1998. (CDRom).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA . Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de método de análises de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Office of Water. *Better assessment science integrating point and nonpoint sources – BASINS 3.0*. Washington, 1998. 349p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. *Arcview GIS 3.2*. California, 1996. 340p.
- FERRANTE, J.E.T. O uso de sensoriamento remoto e do sistema de informação geográfica no mapeamento geotécnico regional. *ITEM: Irrig. Tecnol. Mod.*, v.40, p.17-20, 1990.

- FLEMING, G. *Computer simulation techniques in hydrology*. New York: American Elsevier Publishing Company, 1975. 333p.
- FOHRER, N., ECKHARDT, K., HAVERKAMP, S., FREDE, H.G. Effects of land use changes on the water balance of a rural watershed in a peripheral region. *J. Rur.*, v.40, p.202-06, 1999.
- FOHRER, N., HAVERKAMP, S., ECKHARDT, K., FREDE, H.G. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *J. Phys. Chem. Earth.*, v.26, p.577-82, 2001.
- FRAISSE, C.W., CAMPBELL, K.L., JONES, J.W. Integração de SIG com modelos de qualidade da água e de crescimento vegetal para manejo de nutrientes em atividades agropecuárias. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 2, 1996, Curitiba. *Anais...*Curitiba: Sagres, 1996. p.331-40.
- FREITAS, P.L., KER, J.C. Manejo Integrado de solos em microbacias hidrográficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 8, 1990, Londrina. *Anais...*Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1996. p.43-57.
- GOMES, C.B.G., LEITE, F.R.B.L., CRUZ, M.L.B. Aptidão agrícola das terras através do sistema de informações geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, São José dos campos. *Anais...*São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993. p.132-39.
- GUERRA, A.J.T. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p.149-209.
- GUERRA, A.T. *Dicionário geológico-morfológico*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1993. 446p.

HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. Agric*, v.2, p.96-9, 1985.

HEIDENREICH, L.K., ZHOU, Y., PRATO, T. *Watershed scale water quality impacts of alternative farming systems*. Columbia: Center for Agricultural, Resource and Environmental Systems (CARES), University of Missouri, 1996. Disponível em: <http://www.epa.gov/owow/watershed/proceed/king.html>. Acesso em: 27 abr. 2001.

HENRY, R., GOUVEIA, L. Os fluxos de nutrientes e seston em cursos de água do Alto Paranapanema, SP: Sua relação com usos do solo, morfologia das bacias de drenagem. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, v.65, n.4, p.439-51, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Carta do Brasil*. Mapa color., 55,3 x 51,4 cm. (folha SF – 22 – R – IV – 3 - Botucatu). Escala 1:50.000, 1969.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Carta do Brasil*. Mapa color., 55,3 x 51,4 cm. (folha SF – 22 – Z – D – III - 1 – Pardinho). Escala 1:50.000, 1982.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Escala 1:500.000, 1981. 2v.

JENKINS, A., PETERS, N.E., RODHE, A. Hydrology. In: MOLDAN, B., CERNY, J. (Coords). *Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research*. Chichester: John Wiley & Sons, 1994, p.31-54.

JONYS, G.K. *Impact of erosion on environmental quality*. Toronto: Conservation council of Ontario, 1973. 13p.

KARVONEN, T., KOIVUSALO, H., JAUHAINEN, M., PALKO, J., WEPPLING, K.A. Hydrological model for predicting runoff from different land use areas. *J. Hidrol.*, v.217, p.253-65, 1999.

- KING, K.W., ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., SCRINIVASAN, R. *Soil and water assessment tool – SWAT*. Washington: United States Department of Agriculture, 1996. 450p.
- KLAR, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.
- KREBS, A.S.J., ZIM-ALEXANDRE, N., NOSSE, E.O. Zoneamento das disponibilidades e da qualidade dos recursos hídricos da bacia do Rio Araranguá. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12, 1997, Vitória. *Anais...Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. 7p. (072.DOC) (CD ROM)*.
- LANGRAN, G. *Time in geographic information systems*. Seattle: University of Washington, 1993. 189p.
- LÉON, G.S., CAVALLINI, J.M. *Tratamento e uso de águas residuárias*. Campina Grande: Universidade federal da Paraíba, 1996. 110p.
- LEOPOLDO, P.R., STERNBERG, S., SALATI, E. Tendências de alterações no regime pluviométrico da região central do Estado de São Paulo, Brasil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA RURAL, 2, CONGRESSO ARGENTINO DE INGENIERIA RURAL, 5, 1998, La Plata. *Libro de las Memórias...Avances en el manejo del suelo e água en la Ingeniería Rural Latinoamericana*, La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1998. 6p. (Paper ICR52) (CD-ROM).
- LOMBARDI NETO, F., BERTONI, J. *Erodibilidade de solos paulistas*. Campinas: IAC, 1975. 12p.
- MCNAMARA, J.P., KANE, D.L., HINZMAN, L.D. An analysis of an arctic channel network using a digital elevation model. *Geomorphology*, v.29, p.339-53, 1999.

- MOTOVILOV, Y.G., GOTTSCHALK, L., ENGELAND, K., RODHE, A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agric. For. Meteorol.*, v.98-99, p.257-77, 1999.
- MUSCUTT, A.D., HARRIS, G.L., BAILEY, S.W., DAVIES, D.B. Buffer zones to improve water quality: a review of their potential use in UK agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.45, p.59-77, 1993.
- NEITSCH, S.L., ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R. *Soil and water assessment tool (SWAT): user's manual*. Texas: United States Department of Agriculture, 2000. 468p.
- NETTO, A.L.C. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p.93-148.
- OLIVEIRA, H., SANO, E.E. Utilização de sistema de informação geográfica na avaliação da ocupação dos solos da bacia do Alto Taquari, MS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, 1993, Goiânia. *Resumos...Goiânia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 1993. p.363-4.
- OLIVEIRA, M.Q.C. *Impacto de mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas da bacia hidrográfica do rio Joanes e sua repercussão na zona costeira*. Salvador, 1999. 120p. Dissertação (Mestrado em Ciências-Geologia) – Universidade Federal da Bahia.
- PETERSEN, G.W., BELL, J.C., MCSWEENEY, K., NIELSEN, A.G., ROBERT, P.C. Geographic information systems in agronomy. *Adv. Agron.*, v.55, p.67-111, 1995.
- PETERSEN, G.W., NIELSEN, G.A., WILDING, L.P. Geographic information systems and remote sensing in land resources analysis and management. *Suelo y Planta*, v.1, p.531-43, 1991.

PROCHNOW, M.C.R. Recursos hídricos e metodologia de pesquisa. *Geografia*. v.10, n.19, 1985.

RANIERI, S.B.L. *Avaliação de modelos matemáticos (USLE e WEPP) para a determinação da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no município de Piracicaba-SP*. Piracicaba, 2000. 92p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. *Soil Sci.*, v.139, p.172-80, 1985.

RIBEIRO, F.L. *Sistemas de informações geográficas aplicados ao mapeamento dos usos atual e adequado da terra do alto Rio Pardo – Botucatu, SP*. Botucatu, 1998. 114p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

ROCHA, J.S.M. *Manejo integrado de bacias hidrográficas*. In: Manual de projetos ambientais. Santa Maria: Imprensa Universitária, 1997. p.71-141.

ROCHA, J.V., LAMPARELLI, R.A.C. Geoprocessamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Mecanização e agricultura de precisão. *Anais...*Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1998. p.1-30.

RODRIGUES, M. *Introdução ao Geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1990, São Paulo. *Resumos...*São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1990. p.1-26.

SÃO PAULO. *Legislação sobre recursos hídricos*. São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1994. 72p.

- SCHWAB, G.O., FANGMEIER, D.D., ELLIOT, W. J. *Soil and water management systems*. New York: John Willey e Sons, 1993. 371p.
- SHAW, K. *An evaluation of the BASINS 3.0 models including the procedural steps taken to evaluate the Barton Creek Watershed*. Lexington: University of Kentuck, 2001. 22p.
- SILVA, A.B. *Sistemas de informações geo-referenciados (SIG): conceitos e fundamentos*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000. 240p.
- SILVA, J.X. Geomorfologia e geoprocessamento. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B. *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 393-414.
- SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade do Rio Grande do Sul e Editora da Universidade de São Paulo, 1993. p.35-51.
- SIMÕES, L.B. *Integração entre um modelo de simulação hidrológica e Sistema de Informação Geográfica na delimitação de zonas ripárias*. Botucatu, 2001. 171p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- SLOAN, P.G., MORRE, I.D., COLTHARP, G.B., EIGEL, J.D. *Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds*. Lexington: University Kentucky, 1983. Technical Report 142.
- SMEDEMA, L.K., RYCROFT, D.W. *Land drainage – planning and design of agricultural drainage systems*. New York: Cornell University Press, 1983. 376p.

- SMITH, M., SEGEREN, A., PEREIRA, A., ALLEN, R. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements*. Roma: FAO, 1991. 45p.
- SOUZA, A.J., ANDRADE, F.C., TOLEDO PIZA, M.A.B., CONTE, M.L. Aspectos físicos do município de Botucatu. In: BOTUCATU: polo de desenvolvimento regional, 1985, Botucatu. *Mimeog...* Botucatu: 1985. 34p.
- STAR, J., ESTES, J. *Geographic Information Systems - An introduction*. New Jersey: Prentice Hall, 1990. 303p.
- TEIXEIRA, A.L.A., MORETTI, E., CHISTOFOLETTI, A. *Introdução aos sistemas de informação geográfica*. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1992. 70p.
- TORNERO, M.T. *Fotointerpretação da cobertura vegetal e da rede de drenagem da Bacia Experimental do Rio Pardo, no período de quinze anos*. Botucatu, 1996. 129p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 669p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, SOIL CONSERVATION SERVICE (USDA-SCS). *Engineering Handbook*: Washington: United States Department of Agriculture, 1972. 250p.
- VALÉRIO FILHO, M., ARAÚJO JÚNIOR, G.J.L. Técnicas de geoprocessamento e modelagem aplicadas ao monitoramento de áreas submetidas aos processos de erosão do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 5, 1995, Bauru. *Anais...* Bauru: s.n., 1995. p.279-82.

- WADE, A.J., NEAL, C., SOULSBY, C., SMART, R.P., LANGAN, S.J., CRESSER, M.S. Modelling streamwater quality under varying hydrological conditions at different spatial scales. *J. Hydrol.*, v.217, p.266-83, 1999.
- WILLIAMS, J.R., BERNDT, H.D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Am. Soc. Agric. Eng.*, v.6, n.20, p.1100-4, 1977.
- WILLIAMS, J.R., HANN, R.W. *HYMO*: Problem-oriented language for hydrology modeling-user's manual. New York: United States Department of Agriculture, ARS-S-9, 1973.
- WILLIAMS, J.R. SNPM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Am. Wat. Res. Ass.*, v.50, n.16, p.843-8, 1980.
- WILLIAMS, J.R., NICKS, A.D., ARNOLD, J.G. Simulator for Water Resources in Rural Basins. *J. Hidrol.*, v.111, p.970-86, 1985.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. New York: United States Department of Agriculture, Technical Report 537, 1978. 57p.
- ZIMBACK, C.R.L. *Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Pardo nos Municípios de Pardinho e Botucatu*. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1997. 55p.