

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
Programa de Pós-graduação em Geografia Física

**Modelo Hidrológico da Bacia Hidrográfica da
Represa Guarapiranga – São Paulo (SP)**

Rosiane da Silva Mateus

Dissertação apresentada à Faculdade de
Filosofia, Letras e Ciências Humanas como
parte das exigências para obtenção do Título
de Mestre em Geografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Tarik Rezende de Azevedo

Outubro de 2006

Aos alunos,
Aos professores,
E funcionários
da escola brasileira.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo financiamento da pesquisa, na forma de uma bolsa.

À Universidade de São Paulo por ter garantido acesso aos recursos materiais e humanos disponíveis.

Ao Departamento de Geografia/USP pela formação obtida e pela oportunidade de realizar o mestrado contando com sua infraestrutura.

Ao Laboratório de Climatologia e Biogeografia que disponibilizou seu espaço e recursos.

À SABESP que nas pessoas do Sr. Amauri Pollachi, Sr. Almir Andrade, Sr. Ademir Tavares, Sr. Gustavo Doratioto Albano e Sr. Álvaro Fernandes Júnior, forneceu dados e informações imprescindíveis.

À EMAE que nas pessoas do Sr. Antonio Bolognesi, Sra. Teresa Maria Lana, e sua secretária Sra. Carmem, forneceu dados e informações fundamentais.

Aos professores do Departamento de Geografia pela participação em minha formação e incentivo recebido desde os anos de graduação. Agradeço também pela acolhida que ofereceram quando assumi a função de representante discente.

Aos professores que gentilmente atenderam nosso convite para participarem da banca examinadora da dissertação.

Ao Professor Dr. Tarik Rezende de Azevedo pelo altruísmo tornado por ele um dos valores centrais ao longo destes três anos de convivência. Manifestou isto cotidianamente. Por exemplo, ao ser cauteloso na escolha das palavras e do tom durante nossos colóquios e a atenção para estes aspectos foi redobrada, sobretudo, quando percebeu minhas limitações. Entretanto, houve sempre grande dose de bom senso para manter-me “lúcida” diante dos propósitos da pesquisa. Também manifestou por sua generosidade ao compartilhar o seu conhecimento científico e técnico, motivando-me a descobertas metodológicas e até mesmo sobre minhas possibilidades cognitivas. Agir de um otimista que acredita na capacidade transformadora das possibilidades latentes. A ele rendo meu sincero agradecimento pelas lições de geografia e lições de um viver pautado em valores claros e definidos no (e para o) coletivo.

Aos professores Dra. Cleide Rodrigues e Dr. Wagner Ribeiro, que participaram da banca do exame de qualificação, pela leitura do relatório, idéias discutidas, sugestões e, pelo constante apoio de ambos desde as aulas de graduação.

Ao professor Dr. Néelson F. Fernandes pelas idéias discutidas, sugestões bibliográficas, incentivo e amizade.

Ao professor Dr. José Roberto Tarifa por ter sempre incentivado a confiar na minha percepção e apostar no meu ponto de vista, e assim germinou esta pesquisa.

À professora Dra. Lylian Coltrinari pelas palavras de incentivo durante os três anos, e por ter me socorrido no momento de impressão dos mapas.

Ao professor e amigo Dr. Mário de Biasi pelo incentivo para ingressar no mestrado, pela confiança e apoio, pelos casos que contou e ouviu, e por seu bom humor constante tornando nossas conversas agradáveis momentos de riso e alegria.

Ao Sr. Mário Izumi Saito que gentilmente forneceu informações sobre o sistema de operação da SABESP indicando as unidades e pessoas a quem eu deveria procurar.

Às “meninas” da secretaria da Pós Graduação do DG Ana, Rosângela, Jurema e Cida pelas informações e gentileza com que sempre me atenderam.

Ao Rogério do Laboratório de Clima por todos os favores e sua gentileza incondicional.

Aos colegas de pós-graduação pela oportunidade de aprender com eles e, especialmente:

À Luiza Bricalli porque soube em pouco tempo tornar-se uma nova velha amiga, e à Débora Carvalho por longas conversas de assuntos tão diversificados (de pesquisa à maternidade) e pelo incentivo,

À Juliana de Paula Silva por ter cedido o arquivo digital contendo mapas da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga e pelo incentivo,

Ao Nabil Alameddine que cuidou dos mapas necessários ao modelo dispensando longas horas no Laboratório de Clima depois de ter trabalhado o dia todo! Agradeço imensamente pela gentileza, atenção e bondade com que se disponibilizou gratuitamente (aliás, por isso mesmo é bondade!).

Ao Antônio Jaschke Machado com quem pude aprender muito; espontaneamente se prontificou a me auxiliar com a matemática e com a modelagem. Obrigada por idéias discutidas, pela ajuda no campo, pela leitura do texto, pelas valiosas sugestões e pela amizade demonstrada por gestos tão nobres.

Ao amigo Edmilson que me ajudou na preparação para o exame de proficiência e sempre me incentivou com grande alegria.

Ao Michiel pela “assessoria” no Excel, por idéias discutidas, pelo incentivo à matemática que me assustava, pelas piadas.

Aos amigos Sérgio e Wal pelos pequenos e grandes favores e principalmente pela oportunidade preciosa de chamá-los meus amigos.

A todos os meus amigos que com seu carinho me impulsionaram até aqui.

Aos tios e primos que me mimaram agradeço o aconchego que tantas vezes foi necessário nestes três anos.

Ao meu avô Henrique que no natal/2005 foi encontrar-se com minha avó Dilza, (ao menos na minha memória), lá onde não há televisão, geladeira ou sofá, mas tem fogão à lenha e um figo no pé à minha espera... A eles agradeço pelas lições de discernimento e autenticidade.

Aos meus irmãos Meire e Regi que com suas famílias me permitem viver em plenitude o amor fraterno.

Agradeço a quem me permitiu percorrer o Bom Caminho...

Meus pais, José e Maria, que me amam,

Claudio, que por amor me permitiu ver novamente...

Deus, que não permitiu que eu desviasse.

Muito obrigada!

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo hidrológico da Bacia da Represa Guarapiranga. Localizada na porção Sudoeste da Região Metropolitana de São Paulo, ela fornece água para abastecimento de cerca de 20% da população. Pode ser considerada uma bacia urbana apesar da diversidade de uso e ocupação da terra.

A partir de pesquisa bibliográfica, de informações das empresas que administram o sistema de abastecimento público e de investigação de campo, foi elaborado um modelo conceitual do sistema hidrológico da bacia. O modelo conceitual foi então representado sinteticamente em um diagrama de fluxos e armazenagem hídrica. Finalmente, o diagrama foi representado através de um sistema de equações.

Foram identificados e reunidos todos os parâmetros e dados necessários para o teste e eventual calibragem do modelo proposto. Isto torna, desde agora, factível o teste e eventual calibragem, em etapa futura, tendo em vista a simulação de diversos cenários do impacto da variação da precipitação pluvial na bacia sobre o estoque de água para o abastecimento público.

Palavras-chave:

1. Modelo hidrológico
2. Bacia hidrográfica
3. Bacia urbana
4. Abastecimento público
5. Região Metropolitana de São Paulo

Abstract

This text presents a hydrological model of Guarapiranga's Basin. Localized on southwest portion of Metropolitan Region of São Paulo, it gives water for public supply of almost 20% of the population. It can be considered an urban basin in spite of the diversity of its land use and occupation.

Based on bibliographic research, information from the companies that administrate the public system, and field observation, it was made a conceptual model of the hydrological system of the basin. The conceptual model was then synthetically represented on a fluxes and stocks diagram. Finally, the diagram was represented through an equation system.

All the parameters and data necessary for test and calibration of the model proposed were identified and assembled. This made, yet now, possible the test and eventual calibration for simulating, in a future stage, various scenarios of pluvial precipitation variability in the basin on the public water supply.

Keywords:

1. Hydrological Model
2. Hydrographic Basin
3. Urban basin
4. Public water supply
5. Metropolitan Region of São Paulo

(...) O homem das fronteiras suporta uma tensão que poderia matar outros: ele está ao mesmo tempo dentro e fora, incluído e excluído, sem, por isso, dilacerar-se. Vivida, essa contradição se acrescenta a todas as que esse homem descobre. O homem das fronteiras segue veredas que inicialmente surpreendem, tornam-se depois caminhos, para por fim passarem por evidências. Ele caminha ao longo dos divisores de águas e escolhe a via que vai em direção ao horizonte. Às vezes passa ao longo das terras prometidas, sem entrar nelas. Essa é sua prova. Sempre vai para outras terras, para o horizonte dos horizontes, de momentos em momentos, até vislumbrar as linhas longínquas de continente inexplorado. Descobrir é sua paixão. Só pode caminhar de descoberta em descoberta, sabendo que para avançar é preciso vencer uma necessidade de aprofundar o saber, que lhe sugerisse parar aqui ou ali...”¹

¹ LEFEBVRE (1996).

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Delimitação do Problema: universo de análise, objeto e área de estudo	13
1.2	Objetivos e justificativas	15
2	Revisão Bibliográfica	18
2.1	A questão da água	19
2.2	Apropriação dos recursos hídricos e questão ambiental	20
2.3	O ciclo hidrológico na cidade	23
3	Demanda de Água e Recursos Hídricos na RMSP	30
3.1	A demanda de água na RMSP	31
3.2	Bacias hidrográficas na RMSP	32
3.2.1	A Bacia do Alto Tietê	33
3.3	Água subterrânea	37
3.4	Abastecimento de água da RMSP	38
3.5	Tratamento de esgotos da RMSP	41
4	Área de Estudo: A Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga	44
4.1	Localização e abrangência da área de estudo	45
4.2	Aspectos da geomorfologia e hidrografia	45
4.3	Aspectos climáticos	48
4.4	A construção da represa e suas funções	49
4.4.1	Sistema produtor de água	50
4.5	Uso e ocupação da terra da BHG	52
5	Referencial Teórico Metodológico	55
5.1	Notas introdutórias sobre modelagem e geografia	56
5.2	Teoria dos sistemas e modelagem	57
5.3	Modelagem hidrológica: conceitos e aplicações	61
5.3.1	O ciclo hidrológico global	61
5.3.2	Tipologias de modelos hidrológicos, potencialidades e limitações	63
5.3.3	Questão escalar em modelos hidrológicos	69
5.4	Bacia hidrográfica como unidade de análise na modelagem hidrológica	72
5.5	Subsistemas (elementos) do ciclo hidrológico	75
5.5.1	Áreas de contribuição	76
5.5.2	O papel da vegetação no ciclo hidrológico	77
5.5.3	Água subterrânea	80
5.5.4	Rede hidrográfica	82
5.6	Processos elementares do Ciclo Hidrológico	83
5.6.1	Precipitação	83
5.6.2	Evaporação e Transpiração	84
5.6.3	Infiltração	85
5.6.4	Escoamento superficial	86
6	Procedimentos Metodológicos	88
6.1	Levantamento bibliográfico	89
6.2	Modelagem da BHG	89
6.2.1	Representação gráfica do modelo	89
6.2.2	Representação matemática do modelo	91
7	Modelo Hidrológico da Bacia da Represa Guarapiranga	93
7.1	O modelo conceitual	94
7.2	Níveis de observação	94
7.3	O balanço hídrico elementar da represa	95

7.4	O modelo	96
7.4.1	O detalhamento do balanço da Represa Guarapiranga	96
7.4.2	Tempo de integração do modelo	99
7.4.3	Discretização das superfícies da BHG	102
7.5	Os termos do balanço	106
7.5.1	A precipitação (termo P)	106
7.5.1.1	Estimativa do volume precipitado diariamente	106
7.5.1.2	Distribuição espacial da chuva	108
7.5.2	Circulação de água na área de contribuição	109
7.5.2.1	Simplificação da circulação de água em A_c	109
7.5.2.2	Interceptação vegetal	111
7.5.2.3	Capacidade de infiltração	112
7.5.2.4	Retenção superficial	112
7.5.3	Drenagem urbana (termos E_{gg} e E_{rg})	113
7.5.3.1	Escoamento em galerias	113
7.5.3.2	Escoamento superficial	115
7.5.4	Água subterrânea	115
7.5.5	Escoamento fluvial (termo q)	118
7.5.5.1	Dados fluviométricos	118
7.5.5.2	Estoque nos canais fluviais	120
7.5.6	Abastecimento de água na BHG (termo A_{bg})	121
7.5.6.1	Adução de água bruta da Represa Guarapiranga	121
7.5.6.2	Distribuição de água tratada na BHG	121
7.5.6.3	Usuários de água tratada da Represa Guarapiranga	122
7.5.6.4	Perdas por vazamentos	122
7.5.7	Produção de efluentes na BHG (termo E_{fg})	123
7.5.7.1	Outros usuários de água na BHG	123
7.5.8	Evaporação na Represa Guarapiranga (termo E_{vg})	124
8.	Considerações Finais	125
9.	Referências	128
10.	Anexos	138
10.1	Lista de equações	139
10.2	Diagrama de fluxos hídricos da BHG	140
10.3	Componentes do Modelo Hidrológico da BHG	141
10.4	Registro fotográfico da BHG	144
10.5.	Área da Represa Guarapiranga em função do nível.	150

Lista de figuras

Figura 1	Perdas por Armazenamento em Depressões e por Detenção	24
Figura 2	Inundação do pavimento conforme classificação de ruas	25
Figura 3	Áreas impermeáveis da Região Metropolitana de São Paulo	26
Figura 4	Áreas impermeáveis da Região Metropolitana de Curitiba	26
Figura 5	Hidrogramas simulados para Arroio Dilúvio, RS	27
Figura 6	Hidrogramas simulados para Arroio Dilúvio, RS	27
Figura 7	Variação do coeficiente de escoamento superficial C_r com a urbanização	28
Figura 8	Estimativas de material sólido depositado na rede de drenagem de bacias urbanas brasileiras	29
Figura 9	Demanda Média por Sub-Bacias do Alto Tietê (m^3/s)	31
Figura 10	Mancha Urbana da Bacia do Alto Tietê	33
Figura 11	Bacia Hidrográfica do Tietê na região de São Paulo	35
Figura 12	Áreas de Proteção aos Mananciais	36
Figura 13	Disponibilidade de água e capacidade de produção por sistema	40
Figura 14	Sistemas Principais de Esgotos da RMSP	41
Figura 15	Participação dos Municípios da Bacia Hidrográfica do Guarapiranga	45
Figura 16	Mapa de localização da Área de Estudo	46
Figura 17	Definições de Sistemas	58
Figura 18	Etapas para escolha e aplicação de um modelo hidrológico	66
Figura 19	Classificação sobre a mudança e uso do solo	79
Figura 20	Curva cota X volume da Represa Guarapiranga	98
Figura 21	Mapa de Isócronas	101
Figura 22	Classes de permeabilidade da BHG	103
Figura 23	Mapeamento das classes de permeabilidade da BHG	105
Figura 24	Polígonos de Thiessen	107
Figura 25	Coeficientes de infiltração na BHG	111
Figura 26	Postos fluviométricos na BHG	118
Figura 27	Régua do posto fluviométrico G13 no Rio Embu-Guaçu	118
Figura 28	Localização dos postos fluviométricos da BHG	119

1. Introdução

1. Introdução

O uso de modelos hidrológicos, mais recentemente associados com os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), tem ampliado descrições e simulações dos processos de entrada, saída e circulação de matéria e energia em sistemas físicos, favorecendo o desenvolvimento de diagnósticos e prognósticos para áreas rurais e urbanas.

Neste estudo apresenta-se uma proposta de modelo hidrológico conceitual da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga (SP). O objetivo é construir uma ferramenta para analisar a relação chuvas-abastecimento de água na RMSP.

Em meados dos anos de 2000 e 2001, durante as estações outono e inverno, ocorreu uma forte estiagem em diversas partes do país gerando diferentes resultados tanto em áreas urbanas como em áreas rurais. Na RMSP, particularmente, as principais conseqüências foram o racionamento energético e o rodízio de abastecimento público de água entre bairros (Fotos 17 e 18, anexo 10.4).

As explicações que chegavam à população, por intermédio dos meios de comunicação, comumente atribuíam à “ausência de chuvas” a causa dos problemas enfrentados já que diversas de suas atividades são muito dependentes da oferta de água. E, assim, ficou evidente que problemas decorrentes da escassez hídrica não estão restritos ao domínio semi-árido nordestino.

Este quadro apresentou-se de maneira muito preocupante e tornou-se tema do Trabalho de Graduação Individual (TGI) apresentado ao Departamento de Geografia da USP no final de dezembro de 2002. O problema investigado foi enunciado pela seguinte questão: como o ritmo das chuvas, que é um fato natural, interfere no abastecimento de água que é uma prática social?

Realizou-se um estudo (MATEUS, 2002) que adotou como unidade espacial de análise a bacia hidrográfica da Represa Guarapiranga. Objetivou-se identificar e avaliar possíveis relações entre ritmo climático e abastecimento de água na RMSP. Da análise de gráficos da evolução temporal foram correlacionadas as seguintes variáveis:

1. Variação do nível da Represa Guarapiranga no intervalo histórico de 1909-2002, esta informação é fundamental porque se refere à disponibilidade de água bruta a ser tratada e distribuída pelo sistema de abastecimento público e expressa, também, o ritmo sazonal das chuvas;

2. Pluviometria comparada à variação do nível da represa, sendo que as chuvas foram registradas a partir das médias representativas para o período compreendido entre 1939-1998 e para os anos de 2000 e 2001;
3. Produção de água do Sistema Guarapiranga referente ao período de 2000-2001. Trata-se da água retirada do reservatório e que passou pelos processos de tratamento na Estação de Tratamento Alto da Boa Vista representando sua vazão em m³/s.

Concluiu-se que há uma relação entre os totais de chuva que precipitam na bacia hidrográfica do reservatório e o nível de suas águas. Verificou-se que, geralmente a variação do nível da represa expressa a sazonalidade regional, de maneira que nos meses mais chuvosos (outubro-março) o nível da represa eleva-se enquanto no período de estiagem (abril-setembro) o nível da represa diminui. Entretanto, tal relação não é tão simples porque se trata de uma área urbana onde há constante aumento da demanda por água e, concomitantemente, ocorre a degradação dos recursos hídricos que se concretiza pelo inadequado uso e ocupação da terra da bacia hidrográfica, que pode comprometer a quantidade e a qualidade de água disponível para uso.

Na interface entre atmosfera e processos (naturais e sociais) que ocorrem na bacia hidrográfica surgem diversos problemas. A ocorrência das chuvas é determinada por propriedades e leis da natureza, mas o uso da água no decorrer da História se multiplica, diversifica e intensifica e imprime ritmos diferentes: o ritmo de renovação natural da água e o ritmo dos processos sociais. É possível afirmar que há um descompasso entre estes ritmos e que, deste fato, surgem os problemas do abastecimento de água.

O desenvolvimento do Trabalho de Graduação Individual (MATEUS, 2002) não encerrou o tema, ao contrário, tornou necessária uma explicação melhor da relação chuvas-abastecimento público de água. O problema é aqui redefinido nos termos de entradas (chuvas) e saídas de água da represa (adução de água bruta para tratamento).

1.1. Delimitação do problema: universo de análise, objeto e área de estudo

O universo de análise é a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que, “na forma como foi estabelecida pela Lei Complementar Federal nº 14, tem uma superfície de 8051km², que abriga uma população de cerca de 16 milhões de

habitantes. Seu território está atualmente subdividido em 39 municípios e 137 distritos” (EMPLASA, 1994, p. 30).

O objeto de estudo é o funcionamento hidrológico da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga, a qual apresenta características urbanas e não-urbanas e é voltada ao abastecimento público de água.

Considera-se com igual relevância a importância da água como um atributo espacial que tem sua existência ligada às leis naturais e aos processos sociais e técnicos que se desenrolam até que o abastecimento se efetive. No entanto a ênfase neste trabalho está nos processos naturais e operacionais da circulação hídrica. A análise é feita por meio da espacialização do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica específica. Daí optou-se pelo estudo de caso.

Convém esclarecer três expressões recorrentes no trabalho:

Represa Guarapiranga: represa formada durante os anos 1906-1909 pela empresa canadense *Light* a partir do barramento das águas do rio Guarapiranga. Seus principais contribuintes são os rios Embu Guaçu, Embu Mirim, Parelheiros. Foi formada visando o atendimento da demanda energética crescente da capital paulista. Somente a partir de 1929 que passou a integrar o sistema de abastecimento de água de São Paulo.

Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga: região drenada pela rede hidrográfica da Represa Guarapiranga. É considerada a área deste estudo, definindo-se como unidade de análise sobre a qual se desenvolveu a proposta de modelagem conceitual e que passará a ser identificada pela sigla BHG.

Sistema Produtor Guarapiranga: é o sistema que envolve captação de água no manancial, processos de tratamento de água bruta e adução de água tratada até os reservatórios de distribuição.

A relevância de um estudo voltado para modelagem hidrológica da BHG é demonstrada pelos seguintes aspectos:

- Trata-se de uma bacia hidrográfica localizada na porção sul-sudoeste da RMSP, com as especificidades da maior área urbano-industrial da América Latina;
- É responsável pelo abastecimento de cerca de 30% do município de São Paulo e 25% da RMSP (DIÁRIO OFICIAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2003).

Para Christofolletti (1979) uma abordagem detalhada do ciclo hidrológico considera os subsistemas vegetação, superfície, solo, zona de aeração, zona de água subterrânea e canal fluvial. Na área de estudo observa-se que tais subsistemas são alterados e muitas vezes suprimidos, ao mesmo tempo em que são integrados à bacia novos elementos. São exemplos a própria represa e a infraestrutura de abastecimento público de água e de coleta e tratamento de esgotos que trazem consigo mecanismos próprios de drenagem, caracterizados basicamente pelas canalizações.

As alterações na morfologia da bacia hidrográfica têm impactos sobre os processos que nela ocorrem. Deste modo, infiltração, escoamento, evapotranspiração, filtragem de nutrientes passam a ocorrer sob novas condições mudando as características hidrológicas da bacia hidrográfica.

1.2. Objetivos e justificativas

Neste trabalho pretendeu-se a construção de um modelo conceitual do sistema que determina o estoque de água da Represa Guarapiranga na Região Metropolitana de São Paulo, identificando os fluxos de entrada e saída, os elementos de controle dos mesmos, assim como suas inter-relações. Num segundo momento realizou-se um levantamento dos fluxos e controles dos quais há registro instrumental, freqüência deste registro, início das séries e agentes que detêm a informação. Com este levantamento, face ao modelo conceitual, procedeu-se a avaliação da viabilidade da construção de um modelo matemático para representar a dinâmica temporal do estoque de água da represa em questão, identificando fluxos e elementos de controle que necessitariam de monitoramento complementar.

Espera-se que este modelo se constitua como um instrumento de planejamento para que, em etapa futura, fora do escopo deste trabalho, possa subsidiar uma possível implantação de rede de monitoramento complementar à existente e a construção do modelo numérico, sua alimentação com os dados necessários e a avaliação do papel do ritmo climático sobre o nível baixo da represa em eventos significativos como o de 2001, por exemplo, risco de repetição do episódio num futuro próximo e possíveis medidas mitigadoras.

O enunciado expressa a opção pela abordagem metodológica da Teoria Geral dos Sistemas e a sua operacionalização define alguns objetivos específicos de relevância neste estudo:

- uso de uma linguagem gráfica que permite a representação visual de um modelo conceitual, que não pretende ser conclusivo e nem estanque, mas que tenha consistência suficiente para elucidar as respostas buscadas;
- a possibilidade de associar uma descrição quantitativa ao modelo conceitual, o que define um caráter preditivo para o próprio modelo. Neste caso deve-se atentar para a escolha das variáveis a serem analisadas e para as técnicas de mensuração adotadas (CHRISTOFOLETTI, 1979).

A orientação deste trabalho é determinar até que ponto as variações próprias do clima, com ênfase para a precipitação, constituem o fator sobre o qual deve recair a responsabilidade pelo abastecimento deficitário da RMSP. Para tanto se procurou reconstruir ou construir os instrumentos que permitem fazer a avaliação mais precisa e realista possível dos estoques e fluxos de água que envolvem o abastecimento da Grande São Paulo.

Apoiando-se em algumas evidências apontam-se justificativas que reafirmam a necessidade de pesquisa no sentido aqui desenvolvido.

Primeiro, a RMSP está situada numa área de transição entre o Brasil Meridional permanentemente úmido e o Brasil Central, com os períodos secos bem definidos e há ocorrência de totais anuais superiores a 1000mm (MONTEIRO, 1973), portanto, demonstra-se que se trata de uma área com considerável “entrada” de água. Além disso, não há registros sistematizados sobre as chuvas de toda a RMSP, o que torna ainda mais difícil estabelecer tais relações imediatas. Sabe-se que o trajeto definido desde a entrada de água na represa, sua transferência até as caixas de água dos usuários e sua saída daí há diversos caminhos percorridos pela água que implicam em interferências quantitativas e qualitativas neste fluxo. A esta circulação da água que é bastante específica dada às peculiaridades da bacia hidrográfica, soma-se o fato da crescente demanda por água.

Desde a década de 1970 o abastecimento de água está centralizado no governo estadual, que atua por intermédio de empresas que podem ter capital privado e público. Trata-se de um processo relacionado ao início do Plano Nacional de Águas (PLANASA), constituído em 1971. Assim, a operação do sistema de abastecimento, além do dever de disponibilizar água para todos os cidadãos, se realiza mediante situações políticas e visa também auferir lucro.

Com o desenvolvimento deste trabalho espera-se como resultado que o modelo conceitual possa ser adotado para análise da relação entre chuvas e

abastecimento de forma isenta destas interferências. Certamente a sua elaboração, como a de qualquer outro modelo, implica em simplificações, portanto, sabe-se que escolhas não estão ausentes no trabalho. Contudo, importa ressaltar que os critérios que norteiam as opções se pautam na possibilidade de interpretação e análise dos processos hidrológicos face ao problema já referido.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. A questão da água

Uma breve revisão bibliográfica permite identificar que os problemas oriundos da qualidade e quantidade de água disponível para uso humano despertam o interesse da comunidade científica que tem se motivado para o desenvolvimento do conhecimento referente às diversas questões que sejam levantadas a propósito da água.

Parte destes pesquisadores tem se dedicado a compreender a relação da água e a saúde humana, sobretudo no que se refere às doenças veiculadas pela água, por exemplo, Branco (2002). Mas esta é uma questão presente no escopo de trabalhos que apresentam outro foco como é o caso de Tundisi (2003) e Ribeiro (2004). A propagação de doenças por intermédio da água, seja por via oral ou cutânea, se deve à contaminação hídrica em decorrência da disposição inadequada dos resíduos resultantes de atividades humanas (agricultura, pecuária, mineração, industrialização), além das descargas de esgotos domésticos não tratados nos corpos hídricos (TUNDISI, 2003).

Por outro lado, a pesquisa também avança sobre os múltiplos usos da água identificando o seu valor econômico e buscando explicações à luz do desenvolvimento das atividades econômicas dependentes da água. Trata-se da agricultura, atividade em que o consumo de água é muito elevado devido às técnicas de irrigação comumente adotadas; pecuária; indústria, com a participação da água como matéria-prima, no processo produtivo e até mesmo como mercadoria, com um mercado em expansão para o consumo da “água mineral”. Destaca-se ainda o papel da hidroeletricidade como principal modelo na produção de eletricidade do país, além do uso das redes hidrográficas para a navegação, cita-se Telles (2002), Silva e Simões (2002), Kelman *et al.* (2002), Brighetti e Santos (2002), Lanna (2002).

Há pesquisadores preocupados com questões vinculadas à Legislação e Gerenciamento dos Recursos Hídricos, por exemplo Tundisi (2003), Leal (2003), Ferreira e Francisco (2003) e Rebouças (2004). Destaca-se o realce dado às relações de poder envolvidas no tratamento do recurso hídrico, em que pese este ser considerado como recurso estratégico impulsionando o desenvolvimento de mecanismos para seu domínio e apropriação nas mais diversas esferas de poder – municipal, estadual, nacional e internacional em que a soberania dos Estados-nações muitas vezes passa a se estabelecer nos limiares destas relações, Ribeiro (2004). O trabalho de Seabra (1987) demonstra ainda como tais relações de poder engendram a construção espacial.

Outra linha de pesquisa está preocupada com o abastecimento de água e saneamento básico. Nestes casos importa avaliar a potencialidade hídrica, que está relacionada com as características naturais de dada bacia de captação. Os processos de apropriação, uso e ocupação da terra costumam ser relacionadas aos impactos sobre as condições quantitativas e qualitativas da água e à demanda de água tratada e de tratamento de efluentes, Ribeiro (1975), Custódio (1994), Abreu (1999), A. Fernandes (2001), Rezende e Heller (2002) e Mateus (2002, 2003).

Custódio (1994) propõe uma geografia das águas urbanas, formada de dois aspectos: um relacionado ao abastecimento populacional de água, e o outro à drenagem de águas pluviais urbanas. Conforme a autora, problemas ecológico-ambientais são decorrentes do ambiente construído pelo homem organizado em sociedade (CUSTÓDIO, 2001).

Na cidade, as condições qualitativas e quantitativas dos recursos hídricos são conseqüência do seu processo de construção espacial, e seu uso envolve simultaneamente o funcionamento da natureza e das relações sociais (Mateus, 2002).

Neste contexto de múltiplas abordagens teóricas, no próximo capítulo, apresentam-se alguns aspectos considerados relevantes para o entendimento do processo de apropriação dos recursos hídricos na cidade.

2.2. Apropriação dos recursos hídricos e questão ambiental

Não há dúvidas de que a apropriação dos recursos hídricos pela sociedade traz impactos sobre os processos hidrológicos naturais e sobre as bacias hidrográficas tanto em termos quantitativos como qualitativos. Sobretudo em áreas urbanas, as conseqüências tendem a maiores proporções. Assim, o estudo das águas que drenam áreas urbanas apresenta a perspectiva de uma análise relacionada à, então denominada, questão ambiental urbana.

O interesse sobre questões ambientais tem sido um tema muito freqüente nos mais diferentes setores, envolvendo desde grupos ecológicos, de industriais, governantes de países, entre outros. Apesar de não ser o objetivo desta pesquisa, se reconhece como necessário o questionamento sério e pautado em informações confiáveis a respeito das reais preocupações em relação aos recursos naturais enquanto patrimônio da humanidade.

As conseqüências da qualidade do ar, da água, dos episódios de enchentes, dos resíduos sólidos e líquidos diariamente produzidos, da esparsa

presença de vegetação, entre tantos outros fatos presentes em muitas cidades, se manifestam na escala cotidiana. Revela-se, portanto, a questão da qualidade de vida das pessoas².

O domínio dos recursos da natureza realiza-se de acordo com interesses diferentes e a sua apropriação estabelece (e aprofunda) grandes desigualdades sociais. No entanto, o discurso ambientalista invade o cotidiano e permeia as mentes escamoteando as diferenças que o geraram e que ele mesmo reproduz.

Por isso é necessário diluir os equívocos presentes nos discursos ambientalistas que são constantemente divulgados pela mídia e envolvem distorção de informações que induzem a um consenso cultural com base ideológica individualista que desloca o problema para o cidadão. Este deveria supostamente ter uma nova prática social fundada no consumo dirigido de produtos ecologicamente corretos. Onça (2004), por exemplo, analisou estas questões a partir do conteúdo de diversos artigos publicados sobre mudanças climáticas globais. A autora verificou pouco conhecimento a respeito dos temas abordados, uso de dados contraditórios, interesse pelo sensacionalismo e dificuldade para checagem da autenticidade das informações.

Quando a questão ambiental refere-se à cidade, as confusões são ainda mais comuns porque a paisagem urbana pode ocultar a existência e o funcionamento dos processos naturais já que manifesta intensamente as transformações e construções espaciais pelo trabalho humano.

A paisagem revela a dimensão das formas, das cores, do aparente e do imediato que constituem o espaço geográfico. Aspectos que se transformam no decorrer do tempo. O entendimento da paisagem não se prende na percepção dos fenômenos, mas inegavelmente é um ponto de partida possível e viável.

A leitura da paisagem urbana é complexa, pois revela a maneira pela qual ocorrem a dominação e a apropriação dos recursos naturais e suas implicações econômicas, sociais e políticas. Em outras palavras, a paisagem urbana expressa o processo de produção da cidade.

Para Milton Santos (1997) *“a paisagem urbana se dá como um conjunto de objetos reais-concretos. Nesse sentido, a paisagem é transtemporal, juntando objetos passados e presentes, uma construção transversal. O espaço é sempre um Presente, uma construção horizontal, uma situação única. Cada paisagem se*

² Entende-se que a qualidade de vida das pessoas, além de questões psicológicas, biológicas, de hábitos está também relacionada à capacidade de se apropriar dos recursos naturais e todo tipo de benefício disponível no grupo social em que o indivíduo está inserido.

*caracteriza por uma dada distribuição de formas-objetos, providas de um conteúdo técnico específico.*³

Portanto, que a própria paisagem apresenta os elementos necessários à compreensão dos processos de apropriação espacial, o que propiciaria uma interpretação mais realista dos discursos produzidos. Scarim (1999) comentou o papel da industrialização e das técnicas na transformação de bens raros em abundantes. Inversamente novas raridades são elaboradas ameaçando provocar crises originais. Essas crises seriam resultantes da apropriação e construção espacial. Em resposta, produz-se o discurso ambientalista-ecológico que não explicita o interesse de certos grupos em dar continuidade às diferenças de apropriação do espaço e dos recursos naturais que são representados nas desigualdades sociais (MATEUS, 2002).

No caso específico dos recursos hídricos, identificam-se facilmente na paisagem as marcas da dominação, da transformação e do uso. Por exemplo, o Rio Tietê e toda a sua rede hidrográfica drenavam originalmente a área hoje conhecida como Grande São Paulo⁴ através de planícies fluviais. Em seu curso, os processos de transporte e deposição geravam as formas típicas de um sistema fluvial meândrico. Atualmente, a maior parte desta rede hidrográfica encontra-se retificada, canalizada, e ainda conta com trechos que foram transformados em reservatórios para geração de hidroeletricidade e abastecimento público de água.

Para Custódio (1994) *“a água tornou-se cada vez mais insumo e infraestrutura para diversas atividades econômicas, tornou-se progressivamente recurso econômico sem deixar de ser recurso vital. (...) Na cidade a água aparece como uma das organizações espaciais específicas (compõe centros administrativos, técnicos, financeiro; reservatórios, estações de tratamento, tubulações, etc.), como um sistema de abastecimento, como um serviço público, como saneamento básico, enfim como fator de saúde e de desenvolvimento econômico, exigindo uma gama enorme de atividades estruturais (obras) e não estruturais (legislação, planejamento, etc.) para mediatizar a relação entre água e cidade”* (pp. 5 e 6).

As transformações e construções nas formas e nos usos atribuídos aos recursos hídricos na cidade demonstram a constituição de uma nova hidrologia com características típicas das intervenções elaboradas no ciclo hidrológico na cidade.

³ O autor destaca que a difusão dos objetos técnicos não é homogênea no tempo e no espaço (SANTOS, 1996). E ainda sobre o papel das técnicas na constituição espacial, ver também Santos, 1994.

⁴ A rigor Bacia do Alto Tietê. Os limites são muito próximos.

2.3. O ciclo hidrológico na cidade

Os processos naturais do ciclo hidrológico na cidade são alterados quanto à quantidade e qualidade de água disponível nos diferentes fluxos e armazenagens, bem como incorporando formas, materiais e processos sobre as características hidrológicas naturais da bacia hidrográfica.

A urbanização implica em alterações na cobertura vegetal original associada à impermeabilização das superfícies da bacia. Tais mudanças geram conseqüências como redução da evapotranspiração e infiltração, enquanto há aumento do escoamento superficial, as vazões máximas aumentam e ocorre antecipação dos seus picos no tempo, fatores que intensificam os processos naturais de transbordamento dos rios, provocando ou intensificando as enchentes. O aquífero tende a diminuir reduzindo o escoamento subterrâneo e ocorre redução da evapotranspiração. A relação entre cobertura vegetal e processos hidrológicos é explorada mais adiante.

Outra mudança no sistema hidrológico na cidade decorre da infra-estrutura para captação, tratamento e distribuição de água para abastecimento público, além da captação e tratamento de efluentes domésticos e industriais. Grimmond et al (1986) ressaltam a importância da circulação das águas canalizadas no sistema hidrológico urbano.

O sistema de drenagem de águas pluviais é mais uma intervenção direta sobre o sistema hidrológico urbano. Fundamenta-se em planos, projetos, obras e legislação, cujo objetivo é a prevenção de inundações. Envolve aspectos hidrológicos (intensidade-freqüência das chuvas e deflúvio direto) e hidráulicos (características dos dispositivos hidráulicos e dos materiais empregados) (DAEE e CETESB, 1980).

Conforme DAEE e CETESB (1980) o sistema de drenagem é composto por dois sistemas distintos:

- (a) *sistema de drenagem inicial, ou de micro-drenagem, ou coletor de águas pluviais*: composto pelos pavimentos das ruas, guias e sarjetas, bocas de lobo, galerias de águas pluviais e canais de pequenas dimensões. É projetado para chuvas de período de retorno de 2-10 anos;
- (b) *sistema de macro-drenagem*: constituído geralmente por canais de maiores dimensões, projetado para cheias de período de retorno de aproximadamente 10 anos.

A inadequação do sistema de drenagem envolve grandes riscos de prejuízos materiais, e de perdas de vidas humanas. “A qualidade desse sistema é que determinará se os benefícios à população serão maiores ou menores” (DAEE e CETESB, 1980, p.3). Frequentemente, a canalização é usada para transferir a enchente de um ponto a outro na bacia, muitas vezes sem avaliação adequada dos efeitos à jusante e reais benefícios da obra (TUCCI, 2002).

Morfologias e materiais comuns na cidade, como ruas, telhados, asfalto, gramados, por exemplo, desempenham papel importante na drenagem de águas pluviais. A água retida nas depressões de telhados e ruas, ou outras superfícies, até ser evaporada é considerada como perda do sistema (figura 1).

Figura 1. Perdas por Armazenamento em Depressões e por Detenção

COBERTURA DO SOLO	PERDAS POR ARMAZENAMENTO EM DEPRESSÕES E POR DETENÇÃO (mm)	RECOMENDADO (mm)
<i>Impermeável</i>		
Grandes Áreas Pavimentadas	1,3 – 3,8	2,5
Telhados (planos)	2,5 – 7,6	2,5
Telhados (inclinados)	1,3 – 2,5	1,3
<i>Permeável</i>		
Terrenos Gramados	5,1 – 12,7	7,6
Área de Florestas e Campos Abertos	5,1 – 15,2	10,2

Fonte: DAEE e CETESB (1980).

A tabela da figura 1 apresenta valores usados em modelos para cálculos de *runoff* discriminando-se superfícies impermeáveis e permeáveis. Pode-se notar a participação destas superfícies na distribuição da água precipitada entre a parcela que evapora e a que gera *runoff*.

A função primordial das ruas⁵ é o tráfego de veículos e pedestres, mas servem também à drenagem das águas pluviais. Logo, “o projeto de drenagem é subserviente às necessidades do tráfego” (DAEE e CETESB, 1980, p. 280).

A construção de ruas deve levar em consideração o tráfego, as condições que favoreçam a drenagem e a proteção do pavimento contra sua deterioração, visando minimizar os prejuízos das pessoas e dos poderes públicos, e otimizar o uso das ruas, portanto a sua projeção deve prever as possibilidades de escoamento da água e geração de acúmulo no pavimento e na sarjeta⁶.

⁵ Em DAEE e CETESB (1980) “o termo rua é utilizado no sentido genérico de via pública, podendo significar uma simples rua secundária ou uma via expressa” (p. 252).

⁶ Sarjeta: canal triangular longitudinal destinado a coletar e conduzir as águas superficiais da faixa pavimentada da via pública à boca de lobo ou sarjetão (DAEE e CETESB, 1980).

A tabela da figura 2 apresenta os critérios que fixam a inundação máxima do pavimento permitida segundo a classificação das ruas.

Figura 2 - Inundação do pavimento conforme classificação de ruas

Tipo de Rua	Caracterização	Inundação Máxima
Secundária	Destinada ao tráfego local, geralmente caracterizada por duas faixas de trânsito.	Sem transbordamento sobre a guia. O escoamento pode atingir até a crista da rua.
Principal	Sua função é coletar e distribuir o tráfego de vias de maior movimento para a secundária. Pode ter duas ou quatro faixas de trânsito.	Sem transbordamento sobre a guia. O escoamento deve preservar, pelo menos, uma faixa de trânsito livre.
Avenida	Devem permitir um trânsito rápido e relativamente desimpedido. Pode ter de quatro a seis faixas.	Sem transbordamento sobre a guia. O escoamento deve preservar, pelo menos, uma faixa de trânsito livre em cada direção.
Expressa	Devem permitir tráfego rápido e desimpedido. Pode ter até oito faixas de trânsito.	Nenhuma inundação é permitida em qualquer faixa de trânsito

Adaptado de: DAEE e CETESB. Drenagem Urbana. Manual de Projeto. São Paulo: 1980.

Tucci (2002, p. 474) sintetizou os problemas hidrológicos mais frequentes nas cidades do Brasil: *“O desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido aumento significativo na freqüência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água”*. E salientou outros impactos decorrentes da infra-estrutura instalada nas cidades, como pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento, redução de seção do escoamento de aterros, deposição e obstrução de rios, canais e condutos por lixo e sedimentos.

Uma série de estudos com a aplicação de modelos hidrológicos têm permitido a formação de um conjunto de evidências sobre as condições hidrológicas em bacias urbanas (por exemplo, MOTTA e TUCCI, 1984; TUCCI et al, 1989; CAMPANA e TUCCI, 1994, 2000; TUCCI e COLLISCHONN, 2000; PEDROLLO e LANNA, 1991; SILVEIRA, 2000; SILVEIRA e DESBORDES, 2000a,b).

A hipótese de que ao aumento da densidade da população corresponda um incremento na taxa de impermeabilização do solo da bacia hidrográfica é plausível. Campana e Tucci (1994), visando estimar áreas impermeáveis em macrobacias urbanas, aplicaram um algoritmo usando uma curva média que relaciona densidade habitacional e área impermeável. Nas figuras 3 e 4 são apresentados os valores obtidos para taxas de áreas impermeáveis e densidade populacional para algumas áreas das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba. Observar que neste estudo foram usados para São Paulo a imagem Landsat TM de 16/06/1984 e os dados de densidade populacional do censo de 1980, enquanto, para Curitiba, foram usados a imagem Landsat TM de 16/05/85 e as densidades populacionais de 1988.

Figura 3. Áreas impermeáveis da Região Metropolitana de São Paulo

Localização da área (bairro)	Taxa de áreas impermeáveis (%)	Densidade Populacional
Santo André	37,8	71,4
V Floresta	45,0	88,1
Planalto	27,4	58,3
Jordanópolis	24,4	44,9
Rudge Ramos	44,6	82,3
Baeta Neves	58,9	110,5
Assunção	41,7	82,2
São Caetano	64,7	141,8
Diadema	30,0	62,5
Vila Alice	61,5	124,5
Piraporinha	59,6	117,3

Fonte: CAMPANA; TUCCI (1994).

Figura 4. Áreas impermeáveis da Região Metropolitana de Curitiba

Localização da área (bairro)	Taxa de áreas impermeáveis (%)	Densidade Populacional
Água Verde	46,3	>90
Centro	57,9	>90
Rebouças	36,4	70-90
Prado Velho	22,0	35-50
J. das Américas	24,3	35-50
Bairro Alto	21,7	35-50
Xaxim	32,6	50-70
C. Comprido	5,3	10-20
Uberaba	14,0	20-35
Boqueirão	23,6	50-70

Fonte: CAMPANA; TUCCI (1994).

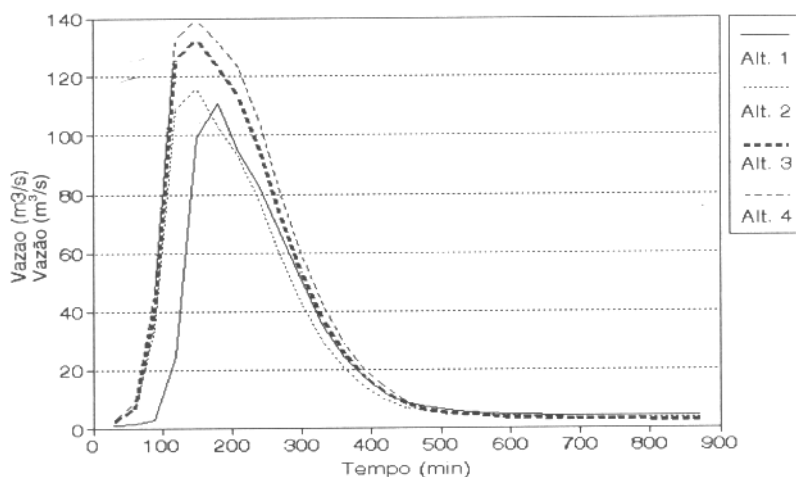
Os resultados alcançados por Campana e Tucci (1994) revelaram que o procedimento adotado é viável para áreas maiores que 2 km², onde não seja necessário levantamento detalhado das condições de uso e ocupação da terra. Os autores destacam a necessidade de cuidados em relação a possíveis distorções do modelo devido às características do relevo e da ocupação. Por exemplo, a população tende a ocupar áreas com menor declividade provocando maior adensamento nestes trechos. Uma mesma taxa de impermeabilização pode apresentar diferentes densidades de ocupação em função do tipo de ocupação, por exemplo, edifícios de apartamentos, indústrias, residências térreas.

Os principais impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem são: o aumento do pico de vazão de cheias, a antecipação no tempo de vazão máxima e aumento do escoamento superficial. Estudos voltados para o prognóstico das condições de drenagem de uma bacia hidrográfica urbanizada requerem dados sobre a precipitação, características físicas (área, comprimento, tipo de solo, cobertura natural) e condições da urbanização (sistema de canalização e áreas impermeáveis) (CAMPANA e TUCCI, 2000).

Campana e Tucci (2000) analisaram as condições de drenagem da bacia urbana do Arroio Dilúvio, localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre – RS. Foi aplicado o modelo hidrológico-hidrodinâmico denominado IPH IV para quatro alternativas: (1) urbanização observada em 1979 (situação de referência para comparação); (2) urbanização observada em 1990; (3) ocupação máxima fixada pelo I PDDU⁷, com recuo permeável; (4) ocupação máxima fixada pelo I PDDU, com 50% do recuo impermeável.

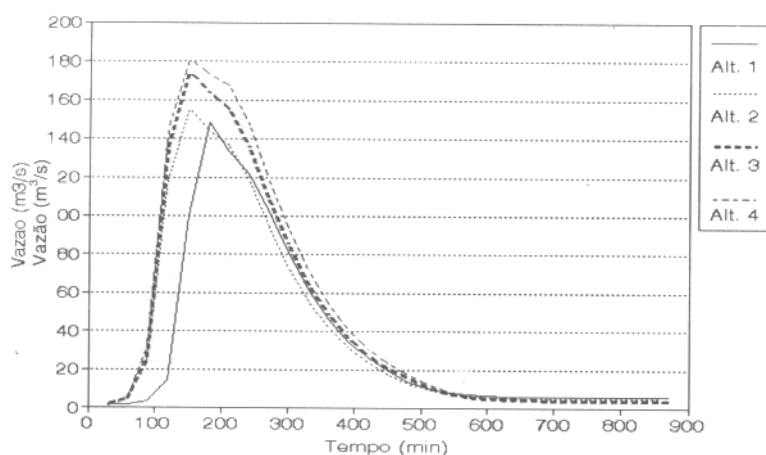
As figuras 5 e 6 mostram os hidrogramas simulados para as quatro alternativas de condição urbana nas duas seções observadas, PUC e CPRM, respectivamente. As simulações reafirmaram o que seria esperado: aumento do pico de vazão e antecipação no tempo de sua ocorrência.

Figura 5. Hidrogramas simulados para Arroio Dilúvio, RS



Fonte: CAMPANA e TUCCI (2000)

Figura 6. Hidrogramas simulados Arroio Dilúvio, RS

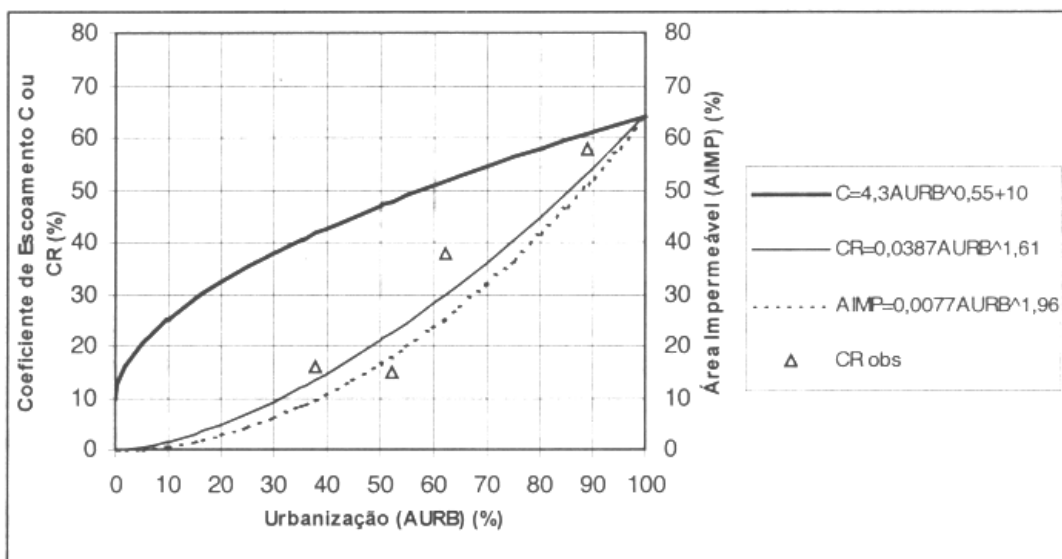


Fonte: CAMPANA e TUCCI (2000)

⁷ PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana.

Silveira (2000) realizou uma quantificação do impacto da urbanização sobre coeficientes de escoamento também na bacia do Arroio Dilúvio. O autor concluiu que as simulações reproduziram o funcionamento físico esperado, isto é, houve crescimento dos coeficientes de escoamento com a urbanização (figura 7).

Figura 7. Variação do coeficiente de escoamento superficial C_r com a urbanização



Fonte: SILVEIRA e DESBORDES (2000)

Outro aspecto importante é a produção de sedimentos que provoca o assoreamento de canais e condutos gerando aumento na frequência e intensidade das enchentes. O crescimento da produção de sedimentos acompanha o desenvolvimento urbano graças aos loteamentos, construções e implementação dos sistemas viários. Com a diminuição destas atividades a produção de sedimentos tende a decrescer. Normalmente, a produção de sedimentos está localizada em áreas restritas, entretanto tem impactos mais amplos quando são depositados nos leitos dos rios e condutos. A medida corretiva mais freqüente é a dragagem do material. Esta operação envolve altos custos, necessita de lugar para depositar o material dragado, provoca degradação das margens do canal e pode ainda gerar problemas no trânsito de veículos. A deposição de sedimentos também provoca redução da capacidade de escoamento dos condutos pluviais e a sua limpeza é difícil e acarreta altos custos. Além disso, os sedimentos acumulam poluentes, nutrientes, metais, hidrocarbonetos e bactérias prejudicando a qualidade das águas (TUCCI e COLLISCHONN, 2000).

Figura 8. Estimativas de material sólido depositado na rede de drenagem de bacias urbanas brasileiras

Local	Tipo de estimativa	Volume (m³/km².ano)	Referência
Rio Tietê em São Paulo	Material dragado	393	Nakae e Brighetti (1993)
Rio Tietê em São Paulo	Material do leito dos afluentes	1400	Lloret Ramos et al. (1993)
Pampulha em Belo Horizonte	Assoreamento 57 a 94	2436	Oliveira e Baptista (1997)
Arroio Dilúvio em Porto alegre	Material dragado	750	DEP (1993)

Fonte: TUCCI e COLLISHONN (2000)

Em muitos trechos das bacias dos rios Tietê e Pinheiros, a combinação de solos frágeis, morfologia irregular do relevo e ocupação desordenada acarretam aumento da intensidade e frequência das cheias e da produção de sedimentos. O rio Pinheiros apresenta uma condição bastante especial devido a implantação de estruturas hidráulicas que possibilitam a reversão do seu fluxo. Houve redução da velocidade de escoamento e capacidade de transporte do rio, resultando na deposição de grande parte do material aportado. A dragagem é constante neste rio (TUCCI e COLLISCHONN, 2000).

3. Demanda de Água e Recursos Hídricos na RMSP

3.1. A demanda de água na RMSP

A demanda de água na RMSP é decorrente da necessidade de cerca de 18 milhões de pessoas concentradas no maior pólo urbano-industrial do país. A demanda urbana de água é constituída pelos consumos doméstico, industrial, comercial e institucional, e deve atender prioritariamente à saúde pública, denominada demanda essencial, e, secundariamente às demais demandas, consideradas periféricas (CUSTÓDIO, 1994).

A demanda de água é caracterizada por usos consuntivos e não-consuntivos. Nos usos consuntivos há derivação da água, implicando em maior conflito entre os usos que são: abastecimento urbano, rural, industrial e irrigação. Nos usos não-consuntivos, não há derivação da água, por exemplo, produção de energia, recreação e lazer, navegação fluvial, piscicultura, usos ecológicos, outros (CUSTÓDIO, 1994).

Cerca de 17% da disponibilidade hídrica do Estado de São Paulo é usada para atender a demanda consuntiva. Estimativas para 2010 prevêm que de 42% a 60% da disponibilidade no Estado estará sendo aproveitada, revelando um quadro futuro preocupante (CUSTÓDIO, 1994).

Figura 9. Demanda Média por Sub-Bacias do Alto Tietê (m³/s)

Sub-Bacia	Cenário Tendencial			Cenário Induzido		
	2000	2004	2010	2000	2004	2010
Alto Tamanduateí	5,46	5,62	6,16	5,46	5,58	5,72
Billings	2,14	2,69	3,48	2,14	2,56	3,07
Cabeceiras	12,58	14,31	17,72	12,58	13,53	15,36
Cotia-Guarapiranga	4,19	5,04	6,61	4,19	4,78	5,82
Juqueri-Cantareira	2,82	3,47	4,78	2,82	3,28	4,15
Penha-Pinheiros	31,93	32,05	32,17	31,93	30,68	28,88
Pinheiros-Pirapora	4,96	5,79	7,64	4,96	5,51	6,76
Total Bacia Alto Tietê	64,08	68,97	78,56	64,08	65,92	69,76

Fonte: PORTO (2003).

O setor industrial constitui a segunda maior demanda de água na RMSP. Toda indústria exige água para fins sanitários e para o desenvolvimento do seu processo produtivo, sendo que uma pequena parcela é incorporada aos produtos ou evapora, enquanto a maior parte torna-se água residual. Na indústria também há usos consuntivos, quando há incorporação da água às mercadorias, e os usos não consuntivos, quando a água é usada nas lavagens e refrigeração dos equipamentos,

por exemplo. Assim, conforme o uso da água há variação quanto à quantidade e qualidade da água necessária. Comumente as indústrias possuem mais de uma fonte de abastecimento de acordo com as exigências do binômio qualidade-quantidade associado às questões de menor custo e frequência no abastecimento (CUSTÓDIO, 1994).

Segundo Porto (2003) a disponibilidade hídrica por habitante na RMSP é tão baixa que pode ser comparável às áreas de seca do Nordeste Brasileiro. A autora explica que isto se deve à sua localização numa área de cabeceiras associada ao fato de ser o maior aglomerado urbano do país.

O consumo de água total de água na BAT excede sua produção hídrica. A solução técnica adotada para responder ao fato é a importação de água de bacias vizinhas. Dos 63,1 m³/s de água tratada produzida para abastecimento da BAT, 31,0 m³/s são importados da Bacia do Rio Piracicaba, localizada ao norte da BAT (PORTO, 2003). Mas esta medida não é somente técnica, é parte de um modelo de gerenciamento e planejamento do uso dos recursos hídricos orientados por uma política de recursos hídricos que se viabiliza em leis, constituição de órgãos, concessão de serviços a prestadoras⁸.

3.2. Bacias hidrográficas na RMSP

A RMSP ocupa áreas que constituem as seguintes bacias hidrográficas: principalmente a Bacia do Alto Tietê, e secundariamente, as bacias do Rio Juquiá, do Rio Sorocaba, do Rio Jundiá, do Rio Paraíba do Sul e da Vertente Oceânica (EMPLASA, 1994).

A RMSP é drenada em quase toda sua extensão pelo Alto Curso do Rio Tietê e tributários. A área da RMSP é aproximadamente coincidente com a área da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT). Apenas os municípios de Guararema, Santa Isabel e Juquitiba não integram a BAT. Além disso, 99,5% da população da RMSP habita a área da BAT o que justifica o uso dos dados em tendências demográficas, sociais e econômicas (FUSP, 2001).

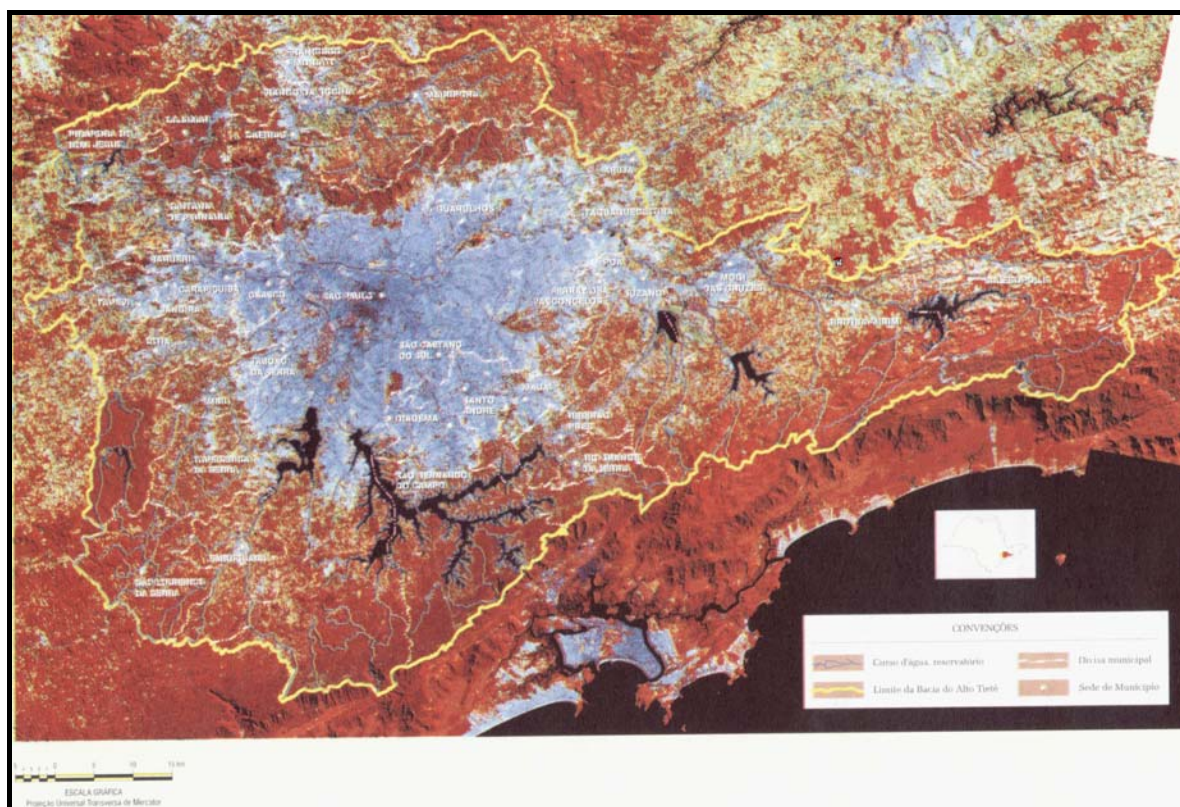
A Figura 10 é uma imagem de satélite que representa a extensão da mancha urbana da RMSP, que ocupa 37% do território da BAT (PORTO, 2003), e sua inserção na área da BAT.

⁸ Custódio (1994, 2001) apresentou uma análise sobre as diferentes relações que se estabelecem no processo de apropriação e domínio dos recursos hídricos na RMSP, identificou “atores sociais” e seu papel.

3.2.1. A Bacia do Alto Tietê

O Rio Tietê é considerado o rio paulista (SANTOS, 1958). Sua existência imprime aspectos marcantes na paisagem paulistana, bem como está relacionada à constituição dos processos de ocupação espacial que se desenvolveram regionalmente.

Figura 10. Mancha Urbana da Bacia do Alto Tietê



Fonte: PORTO (2003).

Em 1907, Prado Jr.⁹ destacou a rede hidrográfica do Rio Tietê como fator geográfico de desenvolvimento da cidade de São Paulo. O autor assinalou que, apesar não serem muito favoráveis à navegação, estes rios eles foram importantes para as expedições de reconhecimento e exploração do interior, e principalmente para o intercâmbio das populações que se estabeleceram no planalto. Assim, o povoamento do planalto seguiu basicamente duas direções: rio acima e rio abaixo. As terras próximas aos rios foram inicialmente procuradas, também, devido a maior fertilidade das terras, abundância de água e oferta de peixe, que constituía importante item de alimentação da época.

⁹ Obra reeditada em 1998.

No final da década de 1950, Santos (1958, p.46) sintetizou bem o papel do rio Tietê na vida da cidade de São Paulo:

“A rede de drenagem encontra-se intimamente ligada ao sítio urbano atual; é de sua bacia que procede a água que o paulistano bebe e a energia elétrica que a cidade utiliza; para o seu curso principal, como para o de seu afluente Pinheiros, encaminha-se a rede de esgotos da cidade; de seu leito e de sua extensa várzea extraem-se as areias, os cascalhos e as argilas, que vão facilitar o ritmo acelerado das construções urbanas; em suas planícies aluviais, como nas de seus tributários assentam-se áreas onde se praticam uma horticultura e uma floricultura intensivas (...)”.

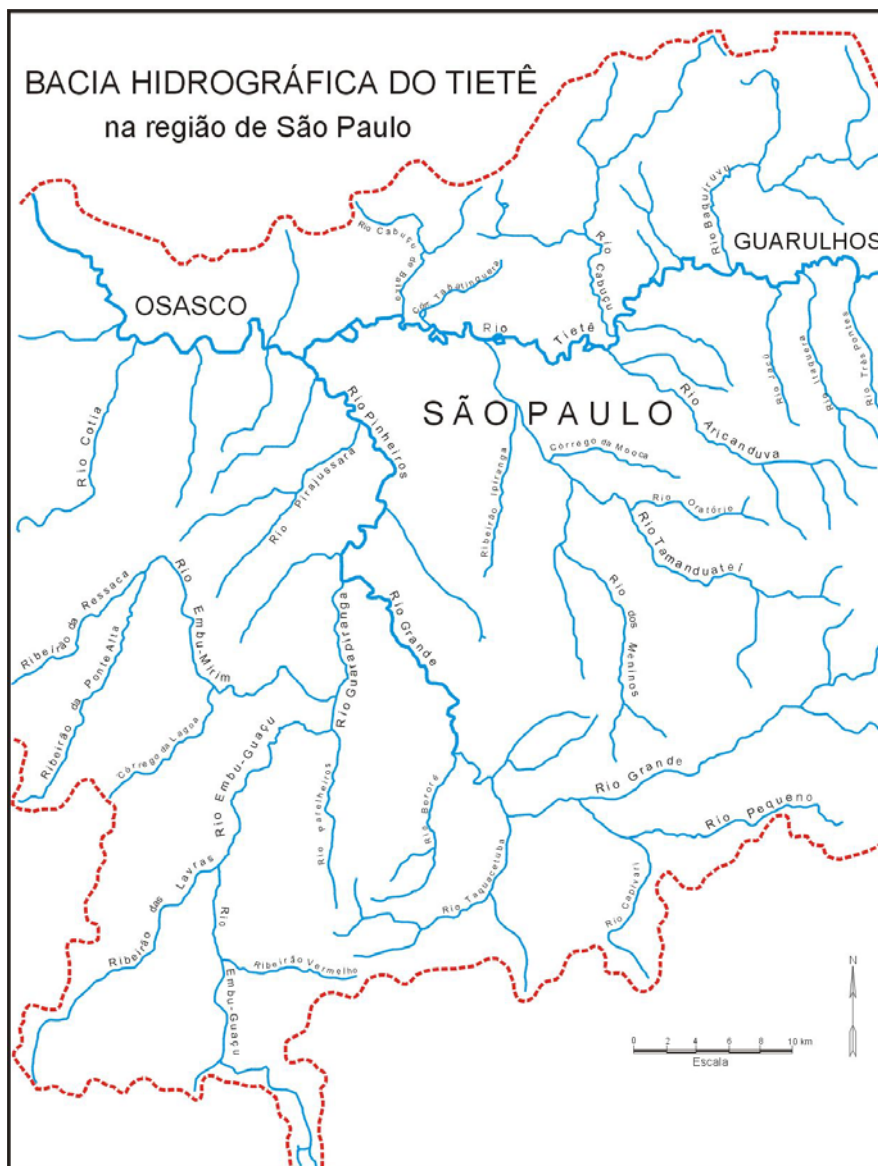
As cabeceiras do rio Tietê localizam-se no município de Salesópolis (SP), a 840 m de altitude e ao seguir um longo percurso, o seu caudal, avolumado por seus tributários, aflui para o rio Paraná.

O Alto Curso do Rio Tietê, drena o território da metrópole paulista percorrendo os terrenos cristalinos do Planalto Paulistano e atinge a Bacia Sedimentar de São Paulo, onde forma uma larga e extensa planície aluvial, que, nesta região, totaliza área de aproximadamente 33 km² (SANTOS, 1958). A BAT corresponde a uma área de cerca de 5900 km² drenados pelo Rio Tietê, desde suas nascentes em Salesópolis até a Barragem de Rasgão. O mapa 11 o representa a rede fluvial original do Tietê nesta área, isto é, a drenagem fluvial anterior às intervenções realizadas, sobretudo em decorrência da urbanização.

Originalmente a planície do Rio Tietê caracterizou-se por um sistema meândrico bastante diversificado que atualmente está muito descaracterizado principalmente em decorrência dos processos de urbanização e industrialização que promoveram uma série de intervenções, tais como a retificação de canais, canalizações, represamentos de rios, ocupação de planícies fluviais, rebaixamento da calha, entre outras (CUSTÓDIO, 2001).

Custódio (1994) analisou três importantes exemplos de apropriação dos recursos hídricos da BAT, a saber: a atuação da empresa canadense Light & Power Co.; a construção do sistema Rio Claro, e a substituição do Plano Metropolitano de Desenvolvimento Integrado (PMDI) pelo Projeto de Saneamento da Grande São Paulo (SANEGRAN). Estão relacionados, respectivamente, à geração de energia, ao abastecimento de água e ao tratamento de esgotos. A autora observou que foi dada prioridade aos usos dos recursos hídricos voltados para um desenvolvimento econômico industrial excludente, sem atender à demanda essencial do saneamento básico.

Figura 11. Bacia Hidrográfica do Tietê na região de São Paulo

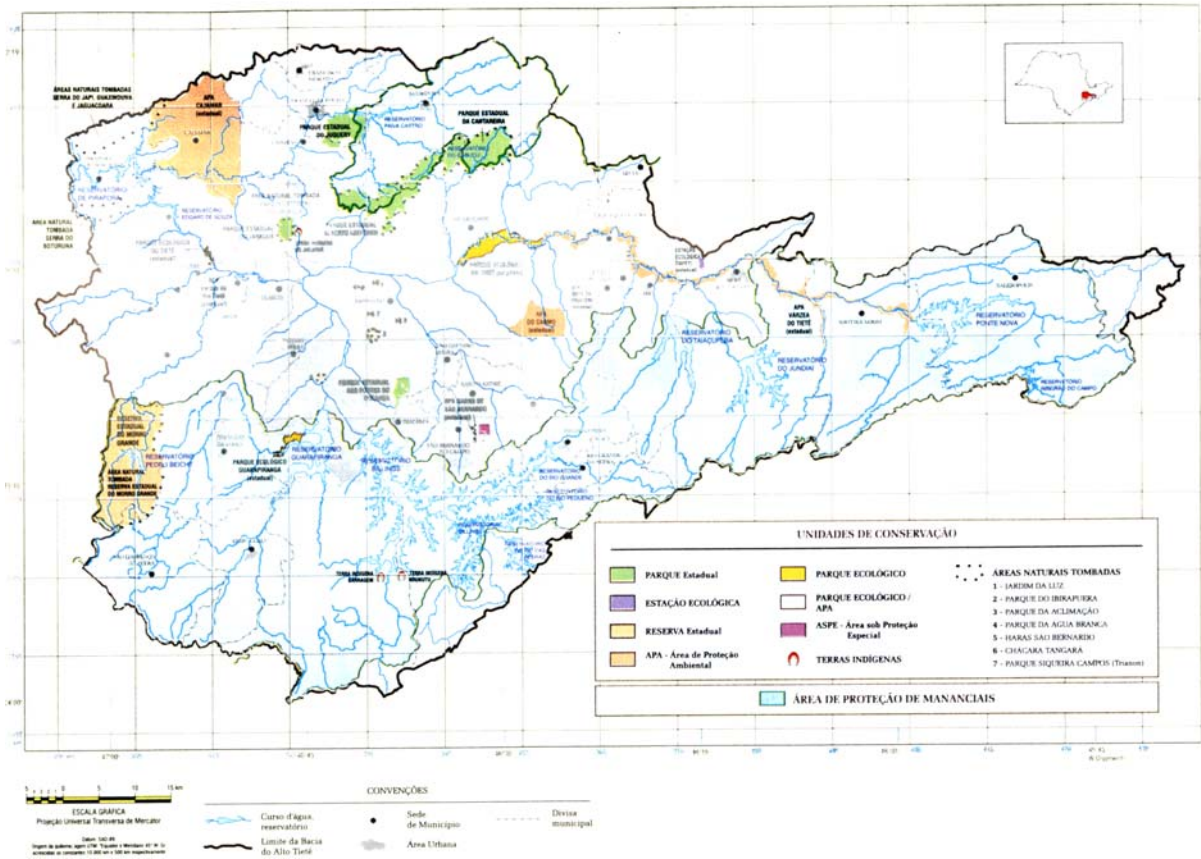


Fonte: SANTOS, 1958.

O Plano da Bacia do Alto Tietê (FUSP, 2001) menciona os seguintes fatores que comprometem os recursos hídricos da BAT: escassez de água, comprometimento dos mananciais de superfície, desorganização da exploração e a ameaça ao manancial subterrâneo, comprometimento da qualidade das águas superficiais, ameaça do lixo, impermeabilização do solo e a ocupação indevida das várzeas.

Visando orientar a ocupação das bacias hidrográficas dos mananciais de abastecimento da RMSP e buscando evitar o adensamento populacional e poluição das águas, foram promulgadas as Leis 898, de 18 de dezembro de 1975, e 1.172, de 17 de novembro de 1976 (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1997). 53% da área da RMSP foram consideradas área de proteção aos mananciais (figura 12).

Figura 12. Áreas de Proteção aos Mananciais



Apesar da lei, não ocorreram as mudanças esperadas. A legislação funciona quanto à instalação de projetos industriais porque necessitam de aprovação, mas não quanto às ações clandestinas e ocupação desordenada (CUSTÓDIO, 1994). A ocupação descontrolada e sem a constituição de infra-estrutura básica continuou a ocorrer, sobretudo nas bacias da Billings e Guarapiranga (MOROZ et al, 1994; SEABRA e SPÖRL, 1997; PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO, 2000; SILVA, 2000; MATEUS, 2002). A situação produz esgoto doméstico, lixo e carga difusa de poluição comprometendo a qualidade das águas (PORTO, 2003). Diante deste contexto, a lei 898/75 foi revisada e nova lei de mananciais foi promulgada, a Lei Estadual nº 9.866/97. Por outro lado, Venturi (2004) menciona ações legais que causam impactos sobre as áreas de mananciais. São exemplos a Av. Teotônio Vilela e a Estrada do M'Boi Mirim que constituíram importantes vetores de expansão urbana na porção sul da área de mananciais, e o rodoanel que passa por trechos sul e norte da área de mananciais.

De acordo com Custódio (1994) a crítica mais comum à LPM se deve ao seu caráter preservacionista, entretanto a lei é um importante mecanismo para garantir os recursos hídricos destinados ao abastecimento público do Alto Tietê. Por isso a LPM não deve ser extinta, talvez revista no sentido de torná-la viável (VENTURI, 2004).

3.3. Água subterrânea

Conforme relatório do DAEE (1975) há três aquíferos na região da Grande São Paulo: o aquífero sedimentar, o aquífero aluvial e o aquífero cristalino.

O aquífero sedimentar composto de areia, silte e principalmente de argila, constitui importante fonte de água na bacia de São Paulo porque os poços profundos nessas camadas produzem mais água que no cristalino. Além disso, está localizado mais próximo das áreas de consumo representando maior aproveitamento econômico. A produção média dos poços no aquífero sedimentar é de 18m³/h. As ocorrências aluviais nos vales da bacia do Tietê são indiscutíveis e apresentam capacidade de produção para abastecimento local.

O aquífero cristalino em geral apresenta menor vazão devido a impermeabilidade que caracteriza suas rochas. A existência deste aquífero decorre da presença de fissuras e/ou falhas, da decomposição mecânica ou da alteração parcial da rocha. O aquífero cristalino não é homogêneo e, portanto, pode-se encontrar um poço com produção considerável próximo a outro com baixa vazão.

Nos poços cristalinos perfurados próximos aos reservatórios Billings e Guarapiranga, a vazão específica média é 0,19 m³/h/m.

Hirata e Ferreira (2001) propõem uma nova divisão para os aquíferos sedimentar (SAS) e cristalino (SAC) da BAT. Associados ao sedimentar estão os aquíferos São Paulo com baixa produtividade (0,5 m³/h/m), e Resende com produtividade média-baixa (0,9 m³/h/m), são livres, localmente semi-confinados, heterogênea isotrópicas e de porosidade primária granular e apresentam baixa produtividade. Associados ao cristalino estão os aquíferos de Rochas Granitóides e o de Rochas Metasedimentares, são livres, anisotrópicos, heterogêneos e com porosidade por fraturação. O aquífero de Rochas Granitóides apresenta baixa produtividade (0,2m³/h/m), e o aquífero de Rochas Metasedimentares com produção média-baixa (1,4m³/h/m).

Hirata e Ferreira (2001) destacam que apesar de ser o manancial superficial a principal fonte de abastecimento público de água o recurso subterrâneo constitui importante fonte complementar de abastecimento na RMSP. Estimativas iniciais têm demonstrado que as extrações seriam superiores a 863ml m³/dia. Apesar do desconhecimento sobre o perfil do usuário da água subterrânea na BAT os autores apresentaram a seguinte distribuição: uso industrial (43%), domiciliar (23%), comércio de água (8%), público (5%), recreativo (4%) e outros (17%).

3.4. O abastecimento de água na RMSP

Custódio (1994) organizou uma cronologia do abastecimento de água da cidade de São Paulo, na qual são destacados os seguintes aspectos:

- o abastecimento individual, realizado pelas pessoas que se dirigiam diretamente às fontes e chafarizes. Esta prática perdurou por mais de 300 anos¹⁰;
- a atuação da empresa privada de serviços de água e esgoto Companhia Cantareira durante o período de 1875 a 1893;
- a formação da Repartição dos Serviços Técnicos de Água e Esgoto. A repartição de âmbito local foi criada em 1893 e atuou até 1954.
- a construção do Sistema Rio Claro, com uma longa história que se estende de 1925 a 1941;
- entre 1954-1968, a prestação de serviços de abastecimento de água e esgoto por um departamento de atuação regional – o DAE.

¹⁰ Ver também Vilar, 2003.

- em 1968 foi criada a Companhia Metropolitana de Água de São Paulo (COMASP), uma companhia mista, com atuação no nível metropolitano;
- a constituição, em 1973, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que tem como acionista majoritário o Governo do Estado de São Paulo.

Atualmente, o abastecimento de água de grande parte da RMSP está sob responsabilidade da SABESP, que atende 344 municípios paulistas, sendo 29 da RMSP, e vende água a outros dois. Assim, a empresa fornece água a aproximadamente 22 milhões de pessoas.

O abastecimento de água na RMSP é feito por um Sistema Integrado e vários Sistemas Isolados que se articulam num conjunto formado por adutoras, reservatórios e elevatórias, denominado SAM – Sistema Adutor Metropolitano interligando os sistemas produtores de água tratada aos reservatórios setoriais de distribuição. Cada Sistema Produtor responde por uma área de influência proporcional à sua produção e está próxima a uma Estação de Tratamento de Água (ETA). A RMSP é atendida pelos seguintes sistemas:

Sistema Cantareira – abastece toda a zona norte da RMSP, área central da capital e parte das zonas Leste e Oeste, conta com a ETA-Guaraú.

Sistema Guarapiranga – abastece parcialmente os bairros das zonas sul e sudoeste da RMSP, atualmente suas águas são tratadas apenas na ETA-Alto da Boa Vista já que a ETA Theodoro Ramos está desativada.

Sistema Rio Grande – abastece basicamente a região do ABCD Paulista (Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano e Diadema). Suas águas são tratadas na ETA-Rio Grande.

Sistema Rio Claro – situada nas cabeceiras do Tietê é constituído pela ETA-Casa Grande e um complexo sistema adutor com aquedutos, sifões e elevatórias que chega até o reservatório da Moóca terminando em Sapopemba. Atende Mauá, Ribeirão Pires, setores de Santo André e São Paulo.

Sistema Ribeirão da Estiva – as águas são tratadas na ETA-Ribeirão da Estiva, localizada no município Rio Grande da Serra que é basicamente o único município atendido pelo sistema.

Sistema Baixo Cotia – as águas são captadas do rio Cotia e tratadas na ETA-Baixo Cotia. Usando uma estação elevatória abastece o extremo oeste da RMSP – Itapevi, Jandira, Barueri e parte de Carapicuíba.

Sistema Alto Cotia – possui a ETA do Morro Grande e abastece Cotia, Vargem Grande Paulista, Embu, Itapeverica da Serra e Embu-Guaçu.

Sistema Alto Tietê – possui a ETA de Taiaçupeba, atende exclusivamente o subsistema SAM Leste que abastece Suzano, Mogi das Cruzes, Ferraz de Vasconcelos, Poá, Itaquaquecetuba, Arujá e setores do extremo Leste de São Paulo. Atende também setores de Itaquera, Guaianazes, Itaim e Passagem Funda.

Figura 13. Disponibilidade de água e capacidade de produção por sistema

Sistema	Disponibilidade de água (m ³ /s)	Capacidade de produção (m ³ /s)
Cantareira	31,3	33,0
Guarapiranga/Billings	14,3	14,0
Alto Tietê	8,1	10,0
Rio Grande	4,2	4,2
Rio Claro	3,6	4,0
Alto Cotia	0,9	1,3
Baixo Cotia	0,6	1,1
Ribeirão da Estiva	0,1	0,1
Total	63,1	67,7

Fonte: Plano da Bacia do Alto Tietê

O abastecimento de água potável envolve uma seqüência de atividades que se inicia com a adução de água bruta no manancial, segue com os processos de tratamento, adução de água tratada para os diversos reservatórios de distribuição de água tratada localizados, estrategicamente, nos bairros atendidos. Desses reservatórios a água vai para as tubulações, que formam redes de distribuição, que conduzem a água até os reservatórios dos usuários.

A implantação de processos de tratamento de água para consumo humano deve considerar as características da água bruta para que atinja as determinações da portaria 518/04 que estabelece que a água produzida e distribuída para consumo humano deve ser controlada. A portaria define a quantidade mínima e a freqüência com que amostras de água devem ser coletadas, bem como os parâmetros e limites permitidos. Os parâmetros observados são: coliformes, bactérias heterotróficas, cloro, cor, turbidez, pH, ferro total, alumínio, flúor, cromo total, cádmio, chumbo e trihalometanos (THM).

3.5. Tratamento de esgotos na RMSP

O termo esgoto é usado para referir-se aos resíduos líquidos e são divididos pelos técnicos em quatro tipos:

Esgotos domésticos, que contém matéria fecal e águas servidas, resultantes de banho, lavagem de roupas e louças;

Despejos ou efluentes industriais, que compreendem resíduos orgânicos ou inorgânicos, podendo conter materiais tóxicos;

Águas pluviais;

Águas do subsolo, que se infiltram no sistema de esgoto¹¹.

Segundo o Plano Diretor de Esgotos da RMSP, de 1985, o sistema de tratamento de esgotos da RMSP está dividido em duas partes: uma central e principal, com sistema integrado de esgotos, e uma constituída por sistemas isolados, com municípios que contam com sistemas próprios (SABESP, 2000).

Figura 14. Sistemas Principais de Esgotos da RMSP



Fonte: SABESP, 2006.

Atualmente, a Sabesp opera cinco Estações de Tratamento de Esgotos na Região Metropolitana de São Paulo, tratando 18 mil litros de esgoto por segundo, com benefício direto para 8,4 milhões de habitantes.

¹¹ Definição encontrada em <http://dicionarioambiental.portalmidia.com.br/e/o-que-e-esgoto.php>

O Sistema Principal de Esgotos da RMSP é constituído por cinco Sistemas de Tratamento, composto de cinco Estações de Tratamento (ETEs), 130 km de interceptores, sifões, travessias e emissários com diâmetros variando de 0,60 m a 4,50 m. Trata atualmente 11.000l/s, beneficiando uma população de cerca de 6,5 milhões de habitantes. São os seguintes sistemas¹²:

Sistema Barueri, com capacidade instalada para tratamento de 9500 l/s, atende 4.460.000 habitantes. Em operação desde 11/05/1988, a Estação está localizada no município de Barueri e serve a maior parte da cidade de São Paulo e aos municípios de Jandira, Itapevi, Barueri, Carapicuíba, Osasco, Taboão da Serra e partes de Cotia e Embu.

Sistema Parque Novo Mundo, com capacidade instalada para tratamento de 2500 l/s, atende 1.120.000 habitantes. Operando desde 05 de Junho de 1998, atenderá parte das zonas Leste e Norte do município de São Paulo e grande parte do município de Guarulhos.

Sistema São Miguel Paulista, com capacidade instalada para tratamento de 1500 l/s, atende 720.000 habitantes. Operando desde 05 de Junho de 1998 atenderá basicamente o extremo leste do Município de São Paulo, e ainda parte de Guarulhos, Arujá, Ferraz de Vasconcelos e Itaquaquecetuba.

Sistema Suzano, com capacidade instalada para tratamento de 1500 l/s, atende 720.000 habitantes. A ETE opera desde 15 de Maio de 1982, está localizada no município de Suzano (a sudeste de São Paulo) e serve aos municípios de Mogi das Cruzes, Suzano, Poá, Itaquaquecetuba e Ferraz de Vasconcelos.

Sistema ABC, com capacidade instalada para tratamento de 3000 l/s, atende 1.400.000 habitantes, está em operação desde 05 de Junho de 1998, e serve as cidades de Santo André, São Bernardo, Diadema, São Caetano, Mauá, e parte da cidade de São Paulo.

O processo de tratamento de esgotos envolve quatro etapas. O início se dá com o tratamento preliminar, no qual ocorre o gradeamento dos sólidos grosseiros e, em seguida, a remoção da areia por sedimentação. Depois é realizado o tratamento primário por decantação. No tratamento secundário são realizados a

¹² Informações extraídas de: www.sabesp.com.br

remoção de matéria orgânica em tanque de aeração, a decantação secundária, a clarificação do efluente, e o retorno do lodo necessário à manutenção dos microorganismos, e, finalmente, o descarte do lodo excedente, que deve ser dirigido para o tratamento de lodo.

A pesquisa realizada para Avaliação e Revisão do Plano Diretor de Esgotos de São Paulo constatou os seguintes problemas operacionais: picos de vazão em dias de chuvas, provocados por infiltração excessiva e ligações irregulares de água de chuva; trechos comprometidos por assoreamento e obras, obstruções por causas desconhecidas e inexistência de cadastros. E o mais grave é o lançamento de esgotos *in natura*, devido à ausência de coletores tronco ou interceptores, ou por falta de conexão aos coletores principais (SABESP, 2000).

4. Área de Estudo: A Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga

4.1. Localização e abrangência da área de estudo

A bacia hidrográfica da Represa Guarapiranga situa-se na porção sudoeste da RMSP (figura 15). Estende-se por uma área de 630 km² e está totalmente situada no Estado de São Paulo abrangendo os municípios de São Paulo, Embu Guaçu, Itapeverica da Serra e outros conforme está representado na tabela a seguir.

Figura 15. Participação dos Municípios da Bacia Hidrográfica do Guarapiranga

Nome	Área em há	% sobre o total
Embu	3.995,50	6,27
Cotia	2.347,37	3,69
São Paulo	23.315,75	36,60
Itapeverica da Serra	14.471,89	22,72
Embu-Guaçu	15.451,26	24,26
São Lourenço	3.317,49	5,21
Juquitiba	739,27	1,16
São Vicente	0,38	0,0005
Itanhaém	59,30	0,09
Total	63.698,21	100

Fonte: Diagnóstico Sócio Ambiental Participativo Preliminar da Bacia do Guarapiranga – 03/1998.

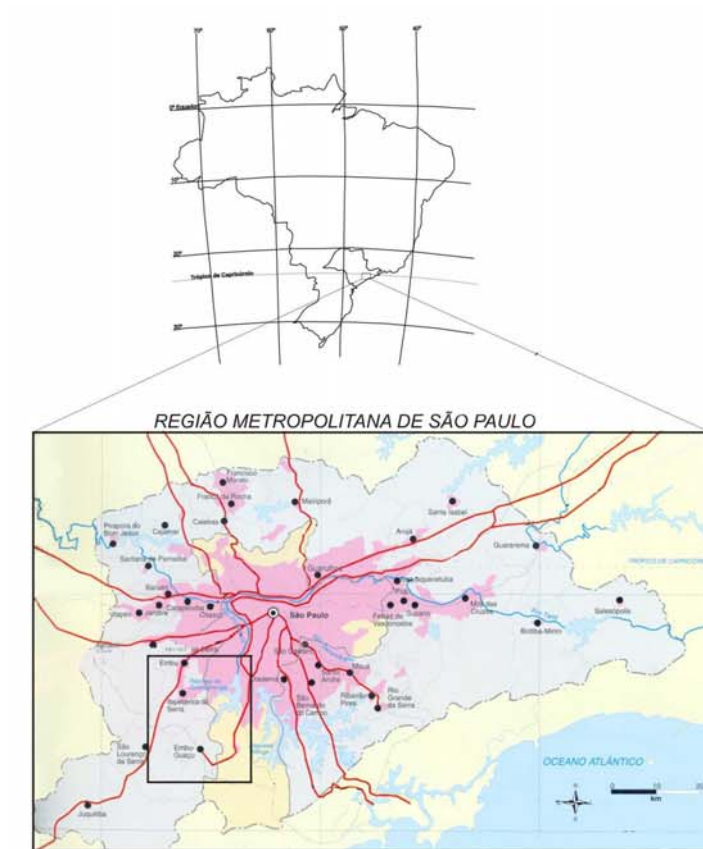
4.2. Aspectos da geomorfologia e hidrografia

A bacia hidrográfica da Represa Guarapiranga está inserida na província geomorfológica denominada Planalto Atlântico, que pode ser subdividido em zonas e subzonas segundo feições locais do relevo (ALMEIDA, 1974). Conforme a “*Divisão Geomorfológica do Estado de São Paulo*” proposta em 1964 (ALMEIDA, 1974), a BHG está situada na zona designada como Planalto Paulistano, que de acordo com o IPT (1981) é constituído de duas subzonas que refletem a natureza do substrato litológico: Colinas de São Paulo e Morraria do Embu.

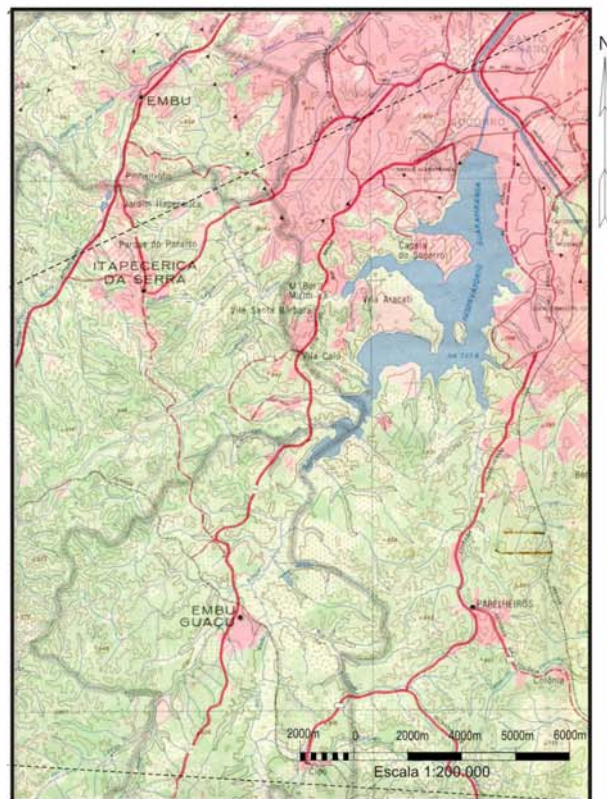
O Planalto Atlântico apresenta feições variadas (planícies fluviais, colinas, morros e serras de traçado linear) cujas altitudes no território paulista variam entre 650m-1250m e são condicionadas à resistência relativa das rochas, fator que define uma verdadeira hierarquia quanto às altitudes (ALMEIDA, 1958).

O Planalto Paulistano, onde está localizada toda a cidade de São Paulo e arredores é altamente dissecado, com papel destacado para a erosão fluvial. A subzona das Colinas de São Paulo na BHG, se caracteriza basicamente pelos seguintes sistemas de relevo: *Colinas Pequenas com Espigões locais*, com passagem gradual para os *Morrotos Alongados Paralelos* de grande abrangência na

Figura 16. Mapa de localização da Área de Estudo



Fonte: Vasconcelos, R. - Atlas Geográfico Ilustrado e Comentado, São Paulo, 1999.



Fonte: EMPLASA, Carta da Região Metropolitana da Grande São Paulo - Sistema Cartográfico Metropolitano, escala original 1:100.000 reduzido para 1:200.000, 3ª edição, 1982.

Organização: João Cláudio Estaiano

Morraria do Embu que também apresenta *Morrotos Baixos* e *Morros Paralelos*. Os *morrotos baixos* caracterizam-se por relevo ondulado com topos arredondados e vertentes convexas a retilíneas. Drenagem de alta densidade em treliça, vales fechados e abertos e planícies interiores restritas. Predominam declividades superiores a 15% e amplitudes locais menores que 50m. Os *morros paralelos* com topos arredondados, vertentes retilíneas a convexas. Drenagem de alta densidade, padrão em treliça e localmente subdendrítica, vales fechados a abertos, planícies aluvionares interiores restritas e predominam declividades acima de 15% (IPT, 1981).

Os grandes traços da rede hidrográfica regional estão relacionados à morfogênese da bacia sedimentar de São Paulo enquanto os padrões locais de drenagem se devem à relação entre rede de drenagem e as rochas e estruturas regionais (AB'SABER, 1957).

A BHG é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Pinheiros que por sua vez é sub-bacia da BAT. O Rio Pinheiros tem como principais tributários os rios Grande e Guarapiranga, ambos represados para formar os reservatórios Billings e Guarapiranga, respectivamente.

Os principais contribuintes da Represa Guarapiranga são os rios Parelheiros, localizado na margem direita, e Embu Guaçu e Embu Mirim na margem esquerda. Alguns ribeirões e córregos que convergem para a represa também se destacam, por exemplo, Rio Bonito, Rio das Pedras, córregos São José e Tanquinho na margem direita, e rios Guavirutuba, Itupu e Córrego Mombaça na margem esquerda.

O rio Embu Mirim se destaca por seu curioso traçado que, segundo AB'SABER (1957, p.81), caracteriza "uma das mais complexas anomalias de drenagem de toda a rede do Alto Tietê." Os ribeirões Ressaca e Ponte Alta, tributários do Embu Mirim, após seguirem a direção SSW-NNE, infletem bruscamente para o sul (AB'SABER, 1957), apresentando uma deflexão de 120° diante do Morro do Vento (ALMEIDA, 1958). As explicações para este fato descartam a possibilidade de captura fluvial (AB'SABER, 1957 e ALMEIDA, 1958). Trata-se de uma adaptação de trechos da rede de drenagem à complexidade determinada pelos terrenos cristalinos e sedimentares existentes, em que os cursos d'água procuram seguir as indentações dos terrenos terciários e as linhas de fragilidade dos terrenos cristalinos (contatos entre granitos, gnaisses, micaxistos e xistos menos resistentes) (AB'SABER, 1957).

Outro aspecto que, mais recentemente, tem caracterizado a drenagem da bacia hidrográfica do Reservatório Guarapiranga é a importação de água de outras bacias. Isto ocorre com a transposição de água do braço do Taquacetuba da Represa Billings e do Capivari. Obras hidráulicas possibilitam o bombeamento de águas do Taquacetuba e seu lançamento na várzea do rio Parelheiros, tributário do Guarapiranga e há transposição de águas do Capivari que são enviadas para o rio Embu Guaçu que aflui para o reservatório.

4.3. Aspectos climáticos

O território paulista está localizado numa área de transição entre o Brasil Meridional, permanentemente úmido, e o Brasil Central, com períodos úmido e seco bem definidos. É uma faixa de conflito entre os sistemas tropicais e extratropicais, com grande flutuação da Frente Polar (MONTEIRO, 1973).

Esta transição zonal é marcada pela alternância das estações quente e úmida, que coincide com o período primavera-verão, e a outra, fria e relativamente mais seca, coincidindo com o outono-inverno. Caracteriza-se, também, por variações bruscas do ritmo e da sucessão dos tipos de tempo, em que podem ocorrer estados atmosféricos de intenso aquecimento seguido de intenso resfriamento em segmentos temporais curtos – dias e semanas (TARIFA e ARMANI, 2001a).

Segundo a classificação climática do Município de São Paulo (TARIFA e ARMANI, 2001a) na BHG há ocorrência das unidades climáticas Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Paulistano e Clima Tropical Sub-oceânico Super-úmido do Reverso do Planalto Atlântico.

Na unidade *Clima Tropical Úmido de Altitude do Planalto Paulistano*, que ocorre em áreas de colinas, morros e espigões divisores, a temperatura média oscila entre 19,6-19,3°C e a pluviosidade apresenta totais anuais médios entre 1250-1400mm. Nas planícies e terraços a diminuição de altitude provoca ligeiro aumento da temperatura. O modelado plano aumenta a recepção e absorção da radiação solar provocando forte aquecimento diurno e nas porções mais baixas, o acúmulo de ar frio gera menores temperaturas mínimas absolutas no período noturno. Nas proximidades das represas Guarapiranga e Billings há freqüentes nevoeiros e névoas úmidas e nos espelhos d'água das represas a temperatura oscila entre 19,3-19,1°C e a precipitação varia de 1250-1400mm.

Na segunda unidade, *Clima Tropical Sub-oceânico Super-úmido do Reverso do Planalto Atlântico* – a influência do relevo é mais marcante, a

temperatura pode oscilar entre 15,3-15,8°C e também os sistemas produtores de chuvas sofrem maior instabilidade por efeito da orografia aumentando os totais pluviométricos. Também contribui para os totais de chuvas a proximidade do oceano, sobretudo nas áreas de nascentes dos principais formadores da represa como rio Embu Guaçu, onde os totais pluviométricos anuais variam de 1400-1800mm.

Numa segunda classificação Tarifa e Armani (2001b) consideraram a urbanização da metrópole paulista e o fato de que os climas urbanos expressam processos físicos em interações com a produção do espaço e as práticas sociais cotidianas. Conforme esta classificação na área deste estudo ocorrem a *Unidade Climática Urbana da Periferia* e a *Unidade Climática Urbana Fragmentada*.

Na *Unidade Climática Urbana Periférica*, em bairros de auto-construção e favelas ocorre exposição aos impactos pluviais como inundações, deslizamentos e doenças associadas, como a leptospirose. Há também conseqüências decorrentes das condições térmicas marcadas por grandes oscilações da temperatura. Há verticalização de baixo padrão onde o adensamento dos blocos gera falta de ventilação e insolação. Nestas condições são comuns doenças associadas às vias respiratórias. Também existe ocupação de médio e alto padrão caracterizada por maior arborização nestes bairros o que ameniza as temperaturas elevadas. A *Unidade Climática Urbana Fragmentada* refere-se à área de transição para o rural onde os totais pluviométricos aumentam e a ocupação exige infra-estrutura capaz de suportar os impactos pluviais.

4.4. A construção da represa e suas funções

A construção da represa Guarapiranga realizada pela empresa canadense The São Paulo Tramway, Light e Power Co ocorreu entre 1906-1909 visando atender à crescente demanda energética de São Paulo no início do século XX. A obra permitiu que a água represada do rio Guarapiranga fosse lançada no rio Pinheiros regularizando a vazão do Rio Tietê durante os períodos de estiagem e assim movimentasse as turbinas da Usina de Santana de Parnaíba, atual Usina Edgard de Souza (PMSP, 2000).

A função reguladora do caudal do rio Tietê desempenhada pelo reservatório perdurou entre 1909 e 1928. Apenas a partir de 1929, com a

implantação da Estação de Tratamento de Água Theodoro Augusto Ramos, a água da represa começa a ser aduzida para abastecimento público.

A análise de nível da represa para o intervalo compreendido entre 1909-2002 permitiu estabelecer relações entre as funções do reservatório e oscilações em seu nível de água. Entre 1909-1928 a oscilação do nível da represa foi maior e atingiu alguns picos muito baixos. Em 1910 chegou a 724,15 m e 723,9 8m em 1925, sendo 733, m a média histórica do intervalo compreendido entre 1909-2002. O abastecimento público requer que o nível da represa permaneça entre um nível máximo e um nível mínimo para que seja possível o funcionamento do sistema de produção de água, é o denominado nível operacional. A partir de 1929 a oscilação do nível da represa é relativamente mais homogênea intercalada por alguns períodos de irregularidades. Vale destacar que a partir da terceira década de existência da represa os picos mais baixos apresentados não foram inferiores a 727,0 m (MATEUS, 2002).

Outra possibilidade de uso da Represa Guarapiranga e de sua bacia hidrográfica é o lazer. Caracterizado pelo predomínio de clubes esportivos e náuticos, sítios recreativos, restaurantes instalados em suas margens, há também a presença do Autódromo. Nos finais de semana ensolarados, enquanto velas coloridas deslizam pelas águas da Guarapiranga, outros grupos de pessoas que não têm acesso a estas práticas recreativas, banham-se na represa apesar da qualidade da sua água ser imprópria para este fim.

4.4.1. Sistema produtor de água

O Sistema Produtor Guarapiranga está em operação desde 1929 com a implantação da ETA Theodoro Augusto Ramos e teve sua capacidade ampliada em 1958 com a implementação da ETA Alto da Boa Vista (ABV). Em 1998 a ETA Theodoro Augusto Ramos foi desativada ficando apenas a ETA ABV responsável pela produção da água potável do Sistema Guarapiranga (Foto 14, anexo 10.4).

O Sistema Produtor Guarapiranga envolve desde a captação de água no manancial, os processos de tratamento de água bruta até a adução de água tratada aos reservatórios de distribuição¹³.

A captação de água de água neste sistema abrange três mananciais: a Represa Guarapiranga, o braço Taquacetuba da Represa Billings e o Reservatório

¹³ Definição fornecida por técnicos da SABESP durante uma visita.

Capivari. Inicialmente concebido para o uso da água da Guarapiranga, este Sistema Produtor de água passou a incorporar os demais mananciais como resposta à crescente demanda por água na RMSP.

Durante a década de 60 desenvolveu-se a proposta da construção de um reservatório a partir do represamento dos rios Capivari e Monos, mas este empreendimento não foi concluído. Entretanto, em caráter provisório, visando o aproveitamento do potencial hidrológico da região, optou-se pelo represamento dos rios Capivari e Emburá. Em meados de 1971 este reservatório foi concluído e iniciou-se a operação da Estação Elevatória de Água Bruta (EEAB) do Capivari.

A água bombeada na EEAB Capivari segue por 2,6 km de adutora, continua por gravidade em canal retificado aberto até o Ribeirão Vermelho, perfazendo 7,3 km até o rio Embu-Guaçu, afluente da represa Guarapiranga. A capacidade total deste sistema é de 3,2 m³/s, operando com quatro conjuntos de moto-bomba, sendo três deles com capacidade total de 1,46 m³/s e um com 1,72 m³/s. A operacionalidade deste sistema varia em função da disponibilidade hídrica do reservatório Capivari. Assim o recalque de água é gerenciado constantemente por técnicos da SABESP, que definem o desligamento ou não de um ou mais conjuntos de moto-bombas.

O processo de transferência de água do braço Taquacetuba para a represa Guarapiranga entrou em operação em agosto de 2000. Com capacidade de envio de água de 2 m³/s, este sistema é composto por elevatória flutuante, elevatória em terra, 13,9 km de adutora sendo 8,3 km de transferência por gravidade com 80m de diferença de cota, sistema de dissipação de energia e canal de afluência à várzea do Ribeirão Parelheiros.

Há também a concepção de aproveitamento do potencial de depuração natural dos sistemas de várzea visando a promoção da melhoria da qualidade da água. A várzea do Ribeirão Parelheiros abrange 930 hectares e apresenta intensa intervenção antrópica. Andrade (2005) ressalta que não se trata de uma várzea natural, visto que até o represamento do rio Guarapiranga esta área constituía um típico fundo de vale. No decurso do tempo passou a ocorrer nesta área fixação e desenvolvimento de vegetação primária típica de várzea formando uma “várzea construída”. Contudo a interferência antrópica decorrente da ocupação desordenada da área tem provocado retrocesso neste processo nos últimos anos.

A captação de água bruta no reservatório Guarapiranga é realizada por uma Estação Elevatória, onde já se inicia o processo de tratamento com a aplicação de cloro, permanganato de potássio e carvão ativado em pó. A continuidade do tratamento é realizada na ETA ABV onde a água passa pelos seguintes processos: coagulação, floculação, sedimentação, filtração (dupla camada), correção de pH, desinfecção e fluoretação (A. FERNANDES, 2001).

Após passar por todos os processos de tratamento parte da água é estocada em reservatórios dentro da própria ETA daí seguindo para os Reservatórios de Distribuição da SABESP distribuídos espacialmente visando suprir necessidades de operação devido às características dos terrenos, como por exemplo o abastecimento de bairros localizados em maiores altitudes. A partir daí a água é transferida para os usuários.

O trajeto percorrido pela água, entre a represa e os usuários, é realizado através de tubulações alojadas internamente nos solos e não raramente apresentam vazamentos, que respondem pelo “escape” de água do sistema. Outra maneira de “perda” de água é a instalação irregular da rede de abastecimento de água que é feita pelos próprios usuários. Para a SABESP esta situação também constitui “perda” porque se trata de água que foi tratada e transferida para os bairros mas que não auferem o pagamento das devidas taxas.

A água da represa após ser tratada na ETA ABV segue em boa parte para outras bacias ao ser destinada aos usuários de água de diversos bairros da Grande São Paulo.

A água potável produzida na ETA ABV e que abastece a BHG é conduzida para os seguintes reservatórios de distribuição da SABESP: Capão Redondo, onde há a Estação Elevatória Capão Capela, Reservatório Capela do Socorro, Reservatório Interlagos, que conta com a Estação Elevatória Interlagos e Reservatório Shangri-lá. Isto significa que a maior parte da água da represa Guarapiranga segue para outras bacias hidrográficas.

4.5. Uso e ocupação da terra da BHG

A ocupação da BHG é parte do processo de reprodução espacial da metrópole paulista que expande seus limites formando uma ampla mancha urbana que se estende em todas as direções.

Um período importante na ocupação da região tem início na década de 1940, com a instalação das primeiras indústrias ao longo do canal Jurubatuba. Nas

décadas de 1950 e 1960 ocorreu a consolidação de um verdadeiro pólo industrial em Santo Amaro, que se localiza nas imediações do Rio Pinheiros. A industrialização estimulou a vinda de trabalhadores que se estabeleceram nas porções mais periféricas da cidade promovendo a ocupação de áreas como a BHG. Como decorrência deste processo, nas décadas de 1970 e 1980 houve uma grande transformação da paisagem caracterizada pelo rápido crescimento da mancha urbana também na direção sul.

Na paisagem da BHG observa-se a diversidade de tipos de usos e ocupação da terra, e apresentam padrões contrastantes, caracterizando-se como uma típica área periférica da metrópole, com todo o conjunto de problemas sociais e ambientais que lhes são inerentes. Nota-se o predomínio de ocupação horizontal atendendo às diversas funções da metrópole paulista – rural, industrial, comercial, lazer e residências que em sua maior proporção apresentam precárias condições de moradia, convivendo com alguns bairros e condomínios fechados de classe média.

A lei não conseguiu conter o avanço da ocupação da região sul da cidade onde estão localizados os reservatórios Guarapiranga e Billings, pois o crescimento da metrópole foi muito grande e se reproduziu pelo desenvolvimento das atividades urbano-industriais atraindo correntes migratórias que chegavam com necessidades de trabalho e habitação.

A maioria da população residente na BHG tem baixo poder aquisitivo, cerca de 70% dos chefes de família recebem entre 2 e 5 salários mínimos e a minoria estava acima de 10 salários mínimos. Esta situação tem conseqüências sobre a apropriação espacial, Silva (2000) comentou:

“(...) os padrões de moradia estão aquém do necessário. As implicações que isto acarreta para a questão da poluição dos cursos d’água e dos reservatórios (a represa do Guarapiranga, nesse caso em particular), são igualmente preocupantes, não obstante, são frutos das contradições sociais presentes na sociedade, que se revelam no espaço(...)”

Segundo Seabra e Spörl (1997) estas condições conduzem a discussão da Lei de Proteção aos Mananciais para questões de saneamento básico e ambiental, apesar de não ser este o enfoque da lei.

Mateus (2002) refletiu sobre a seguinte questão: como tal modelo de apropriação do espaço afeta a qualidade e a disponibilidade da água para o abastecimento da cidade? E verificou algumas evidências sobre a relação apropriação espacial e recursos hídricos na BHG, a saber:

- A expansão da mancha urbana para a área de mananciais provocou o desaparecimento da cobertura vegetal original em quase toda a extensão da bacia hidrográfica permanecendo restrita nas adjacências de alguns contribuintes do reservatório, afetando os processos de evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial;
- O loteamento do solo muitas vezes é realizado em áreas impróprias que são susceptíveis aos processos erosivos e podem acarretar desabamentos das residências. E a movimentação do solo gera assoreamento dos canais e aumento da carga sólida em suspensão nas águas da represa (MOROZ et al, 1994);
- Os bairros clandestinos não contam com rede de infra-estrutura então, a ausência da coleta do lixo e da rede de esgotos implica no despejo de detritos sólidos e líquidos em estado bruto nos córregos e rios afluentes e na represa aumentando a poluição direta e por carga difusa (Foto 16, anexo 10.4). Nestes locais há instalação do sistema de abastecimento de água realizada pelos próprios moradores de maneira clandestina.

Concluiu-se que há um interesse coletivo pela apropriação dos bens naturais e um interesse privado pela sua dominação porque gera lucros. Estes dois interesses antagônicos se mesclam na construção da cidade e se articulam na manipulação dos bens, tornados recursos – recurso para a reprodução da vida, recurso para a reprodução do capital (MATEUS, 2002).

5. Referencial Teórico Metodológico

5.1. Notas introdutórias sobre modelagem e geografia

Diversos estudos referentes às características quantitativas dos fenômenos físicos, além da mensuração buscam também a compreensão de sua dinâmica e sua simulação referenciada em dado limite temporal e espacial. Estes trabalhos têm resultado em modelos conceituais, matemáticos e numéricos que se constituem como importantes instrumentos de planejamento.

Os procedimentos metodológicos da modelagem permitem também o reconhecimento da dimensão dos processos envolvidos na dinâmica hidrológica. A concepção inerente é a do Ciclo Hidrológico, ou seja, sistêmica. Diante de um problema importa identificar os *inputs* e *outputs*, elementos e relações que possam expressar o sistema em foco, em termos qualitativos e quantitativos (MENDIONDO e TUCCI, 1997a).

Pesquisas fundamentadas em tal abordagem teórico-metodológica têm se dirigido para diversas aplicações em áreas urbanas e rurais, gerando e/ou testando uma variedade de modelos hidrológicos. A modelagem aplicada a problemas que expressam a sua natureza espacial, apesar de apresentar limites, traz relevantes possibilidades de interpretação e de previsão (HAGGETT e CHORLEY, 1975; KIRKBY, 1987; CHRISTOFOLETTI, 1999). Portanto, é importante que se faça uma reavaliação conscienciosa da modelagem no âmbito da geografia.

Estudos baseados na modelagem hidrológica tomam diferentes caminhos em função dos seus objetivos, das dimensões escalares espaciais e temporais envolvidas no problema tratado, das condições de acessibilidade e representação dos dados de entrada do sistema hidrológico que está sendo modelado, das possibilidades de representação matemática e das oportunidades de cálculo em computadores. Apesar de significarem aspectos essenciais no exercício da modelagem, são complexos e não apresentam pontos de vista conclusivos como resultado. Além do debate, uma diversidade de novos modelos é constantemente desenvolvida (WATTS, 1996).

Visto que esta dissertação pode ser descrita, simplificada, como um exercício de modelagem de um problema hidrológico, fez-se necessário um reconhecimento sobre tais aspectos. Não se trata de uma incursão teórica a respeito da modelagem hidrológica, mas neste capítulo, pretende-se, à luz de explicações encontradas na bibliografia consultada, apresentar uma compreensão básica sobre os princípios teóricos e metodológicos mais gerais e processos hidrológicos envolvidos na modelagem de um sistema hidrológico qualquer.

5.2. Teoria dos sistemas e modelagem

Revisões sobre o surgimento da noção de sistemas e a sua incorporação por diversos ramos da ciência são apresentadas por Gregory (1992), Navarra (1973), Branco (1999), Christofolletti (1999). Os autores demonstram que a noção de sistema absorveu especificidades de cada ramo científico no qual foi aplicado, e da sua inserção em diferentes momentos da evolução científica. A figura 17 apresenta algumas definições de sistema que foram extraídas da bibliografia consultada.

Há duas definições apresentadas por Maciel (1974) – uma interna (k) e outra externa (l). Em sua segunda definição (l), o autor explicita a inserção do sistema em um conjunto mais amplo, que pode ser denominado universo, que segundo Christofolletti (1999, p. 5) *“compreende o conjunto de todos os fenômenos e eventos que, através de suas mudanças e dinamismo, apresentam influências condicionadoras no sistema focalizado, e por causa do funcionamento do referido sistema particular”*.

Na definição externa de sistema os conceitos fundamentais são o de mudança, noção derivada da Cibernética e modo de ação. Nos demais enunciados estão presentes outros conceitos fundamentais: conjunto, elementos ou unidades, relações, entradas, saídas, totalidade, universo e organização.

Os conceitos usados para definir sistemas revelam o caráter interdisciplinar da Teoria Geral dos Sistemas e levantam problemas científicos mais vastos e até mesmo filosóficos como simplicidade, complexidade, unidade, multiplicidade, ordem e desordem, entropia, determinado, indeterminado, uniforme, multiforme, restrito, arbitrário, cosmos, caos, (MACIEL, 1974).

Dooge (1973 apud TUCCI, 1998, p.15) concluiu que *“sistema é qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência interrelaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação, e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação”*.

A caracterização dos sistemas é dada pela definição de elementos, seus atributos e suas relações dentro dos limites do sistema, o que depende da escala na qual é concebido. Um sistema pode representar um subsistema (ou elemento) quando se considera uma escala maior (CHRISTOFOLLETTI, 1979).

Oliveira (1993) menciona os sistemas complexos, nos quais o funcionamento complexo deriva de uma particular e intrincada interligação de unidades extremamente simples, que influenciam umas às outras, e da evolução dinâmica (no

tempo) do sistema. Este seria o caso do sistema formado pelos neurônios, por exemplo.

Figura 17. Definições de Sistemas

	Autor/Ano	Definição
a	Bertalanffy apud Branco, 1999, p. 72	“um conjunto de unidades em inter-relação mútua.”
b	De Saussure apud Branco, 1999, p. 72	“uma totalidade organizada, formada de elementos solidários os quais não podem ser definidos a não ser uns em relação aos outros, em função de sua situação nessa totalidade.”
c	Lesourne apud Branco, 1999, p. 72	“um conjunto de elementos ligados por um conjunto de relações.”
d	Morin apud Branco, 1999, p. 72	“unidade global organizada de inter-relações entre elementos, ações ou indivíduos.”
e	De Rosnay apud Branco, 1999, p. 72	“conjunto de elementos em interação dinâmica, organizados em função de um objetivo.”
f	Chorley e Kennedy apud Christofolletti, 1999, p. 5	“um conjunto estruturado de objetos e/ou atributos. Esses objetos e atributos consistem de componentes ou variáveis (isto é, fenômenos que são passíveis de assumir magnitudes variáveis) que exibem relações discerníveis um com os outros e operam conjuntamente como um todo complexo, de acordo com determinado padrão.”
g	Haigh apud Christofolletti, 1999, p. 5	“é uma totalidade que é criada pela integração de um conjunto estruturado de partes componentes, cujas inter-relações estruturais e funcionais criam uma inteireza que não se encontra implicada por aquelas partes componentes quando desagregadas.”
h	Hall e Fagen apud Christofolletti, 1979, p. 1	“conjunto dos elementos e das relações entre eles e entre os seus atributos.”
i	Thornes e Brunsdan, apud Christofolletti, 1979, p. 1	“conjunto de objetos ou atributos e das suas relações, que se encontram organizados para executar uma função particular.”
j	Miller apud Christofolletti, 1979, p. 1	“conjunto de unidades com relações entre si. A palavra ‘conjunto’ implica que as unidades possuem propriedades comuns. O estado de cada unidade é controlado, condicionado ou depende do estado das outras unidades.”
k	Maciel, 1974, p. 13	definição “interna” de sistema: “conjunto de elementos quaisquer ligados entre si por cadeias de relações de modo a constituir um todo organizado.”
l	Maciel, 1974, p. 15	definição “externa” de sistema: “um todo organizado, dinamicamente relacionado com o meio exterior (isto é, continuamente sujeito a mudança) e que apresenta, em qualquer momento, um determinado modo de ação (ou funcionamento).”

Organizada por Rosiane da Silva Mateus.

Outra questão relacionada aos sistemas é a preocupação com a descrição de uma tipologia. Chorley e Kennedy (apud CHRISTOFOLETTI 1979, 1999) distinguem 11 tipos de sistemas. Entre os quais aqui será descrito apenas um deles porque está mais diretamente relacionado ao problema deste trabalho: o sistema em seqüência.

“Os sistemas em seqüência são compostos por cadeia de subsistemas, possuindo tanto magnitude espacial quanto localização geográfica, que são dinamicamente relacionados por uma cascata de matéria e energia. O posicionamento dos subsistemas é contíguo e nesta seqüência a saída (output) de matéria e energia de um sistema torna-se entrada (input) para o subsistema de localização adjacente” (CHRISTOFOLETTI, 1979, p. 15).

O autor apresenta os seguintes exemplos de sistemas em seqüência: o fluxo da energia solar, o fluxo da água em bacias hidrográficas e o fluxo do algodão em indústrias de tecelagem. Assinala que a estruturação destes sistemas demanda três tarefas:

- distinguir os subsistemas;
- estabelecer os reguladores, instrumentos com funções decisórias e capazes de repartir o input em dois caminhos: armazenando-o ou fazendo-o atravessar o subsistema tornando-o seu output.
- definir os armazenadores, com função de armazenar por tempo variável, a quantidade de matéria ou energia retida no subsistema.

Os sistemas em seqüência podem ser bem representados com o uso de símbolos na constituição de um fluxograma (CHRISTOFOLETTI, 1979), e este é um dos produtos da pesquisa, pois constitui a representação gráfica do modelo conceitual em estudo (ver cap. 7).

Esta pesquisa também se desenvolve com a noção de modelo que, para Haggert e Chorley (apud Christofolletti, 1999, p. 8) *“é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes.”* Nesta definição, o modelo é interpretado essencialmente como uma forma de organizar o pensamento. Na conceituação de Tucci, a seguir, está explícita uma preocupação com a sua aplicação em diferentes problemas.

“O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas” (TUCCI, 1998, p.13).

A elaboração de um modelo é feita em função do problema colocado, isto é, dos objetivos da pesquisa, portanto é arbitrária. Isto significa que os elementos são representados graças a uma escolha, que mesmo tendo como referencial uma hipótese, é imbuída de subjetividade.

Um modelo pode sintetizar sistemas, fornecendo um quadro da totalidade do sistema, estabelecendo o grau de conhecimento sobre suas partes e interações e

o funcionamento de inputs e outputs (CHRISTOFOLETTI, 1999). É possível afirmar que o modelo representa a totalidade do sistema porque as partes se relacionam graças aos seus atributos e papéis que desempenham no desenvolvimento de dada tarefa, conforme a definição de Thornes e Brunnsden, apud Christofoletti, 1979, (item i, da tabela 1). Os processos é que determinam e dinamizam as inter-relações entre as partes possibilitando a compreensão da totalidade do sistema. O modelo expressa uma hierarquização das partes e que diz respeito à estrutura do sistema.

As principais características dos modelos são: seletividade, estruturação, enunciativo, simplicidade, analógicos, reaplicabilidade (HAGGETT e CHORLEY, 1975). E suas funções são: psicológica, comunicativa, promissora, logicidade, normativa, adequação, previsibilidade, simulação de cenários possíveis em função de mudanças ambientais, relacionar as mensurações dos processos em curto prazo com a evolução das formas em longo prazo, condensação têmporo-espacial, desenvolver “explicações” aplicáveis a todas as escalas (HAGGETT e CHORLEY, 1975; KIRKBY, 1987 apud CHRISTOFOLETTI, 1999).

A modelagem pode ser considerada como instrumento entre os procedimentos metodológicos da pesquisa científica, porque se refere à expressão de uma hipótese e de enunciados que são formulados de modo adequado para testes visando ratificação ou refutação. Os modelos podem assumir a formulação qualitativa e/ou quantitativa sendo importantes em estudos voltados para o diagnóstico e a previsão, já que servem a procedimentos de simulação (CHRISTOFOLETTI, 1999). Tucci (1986, p. 13) ressalta que *“o modelo por si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para atingir um objetivo”*.

A modelagem aplicada aos problemas que expressam a sua natureza espacial traz relevantes possibilidades de interpretação e é um importante instrumento nos estudos voltados para previsão bem como para implementação de projetos diversos. Contudo, há necessidade de uma postura crítica em relação aos limites da modelagem e isto passa necessariamente pela capacidade de compreensão dos significados físicos expressos pelas equações, variáveis e parâmetros. No âmbito da geografia brasileira de maneira geral, não é uma tarefa fácil, devido ao notório preconceito disseminado contra a chamada “geografia quantitativa” e pouca familiaridade com a linguagem matemática, com raras exceções¹⁴.

¹⁴ De fato, nunca existiu uma “geografia quantitativa”, este foi o epíteto dado à Geografia Teorética por Geógrafos autodenominados Críticos.

O uso da linguagem matemática na modelagem de problemas que são estudados na geografia física traz a perspectiva tanto da quantificação de variáveis que caracterizam o espaço geográfico, como da simulação e previsão de processos. Funções, limites, derivadas, integrais, equações diferenciais, têm largo emprego nos estudos tais como balanço hídrico em bacias hidrográficas, volume de água de um lago, datação do carbono 14, taxa de erosão, previsão de áreas suscetíveis a deslizamentos e outros.

Conhecer o desenvolvimento de modelos, desde o modelo conceitual até a formulação de enunciados matemáticos, interfere na interpretação dos resultados do modelo, pois permite a identificação dos processos que foram tratados e daqueles suprimidos, isto se reflete na funcionalidade dos modelos, que é determinada de acordo com objetivo pretendido com o seu uso. Questões como complexidade e simplicidade do modelo, escalas espaciais e temporais na modelagem imprimem as potencialidades e limitações do próprio modelo. Assim, quanto maior for o conhecimento a respeito destas questões maior será a chance de que o modelo atenda o objetivo inicial.

Quanto mais completo o modelo, melhor representa o sistema, porém é menor sua aplicabilidade porque aumenta a complexidade, exigindo o controle de mais variáveis e parâmetros, o que nem sempre possível. Ao optar pela simplificação, deve-se atentar para o tratamento de partes (variáveis e parâmetros) mais significativas ao problema visando a sua aplicabilidade (WATTS, 1996; CHRISTOFOLETTI, 1999).

5.3. Modelagem hidrológica: conceitos e aplicações

5.3.1. O ciclo hidrológico global

More (1975, p. 105) coloca que *“o modelo conceitual básico em Hidrologia é a idéia do ciclo da água em suas formas gasosa, líquida e sólida”*. A circulação da água por estes estados físicos na fase terrestre ocorre graças aos processos de precipitação, evaporação, infiltração e escoamento, que dependem de uma série de fatores intervenientes, que dificultam a sua análise quantitativa e qualitativa (TUCCI, 1998). O Ciclo Hidrológico deve ser analisado considerando seus componentes, a dinâmica de sua ocorrência, e características do sistema envolvido (solo, cobertura, oceano, entre outros). Os processos hidrológicos atuam em diferentes escalas de tempo e espaço, definindo muitas vezes processos extremamente não-lineares (MENDIONDO e TUCCI, 1997a).

O ciclo hidrológico global é o fenômeno de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. O ciclo hidrológico só é fechado em nível global, na medida em que são consideradas áreas de drenagem menores, fica mais caracterizado como um ciclo aberto no nível local. Baird (1997) considera o ciclo hidrológico como uma cascata hidrológica, que também pode ser tratada como uma cascata de energia, na qual a energia potencial é transformada em energia cinética.

O intercâmbio entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre nos dois sentidos: da superfície para a atmosfera em que a água ocorre no estado de vapor, graças aos processos de evaporação e de transpiração; e no sentido atmosfera-superfície pode ocorrer transferência de água em qualquer estado físico, sendo mais significativas, em termos mundiais, as precipitações de chuva e de neve (SILVEIRA, 2004a).

Os principais fatores que contribuem para a variabilidade do ciclo hidrológico na superfície terrestre são: desuniformidade da distribuição da energia solar; diferente resposta térmica dos continentes em relação aos oceanos; quantidade de vapor de água; CO₂ e ozônio na atmosfera; variabilidade espacial dos solos e coberturas vegetais e influência da rotação e inclinação do eixo terrestre na circulação atmosférica (SILVEIRA, 2004a).

O Ciclo Hidrológico Global geralmente é representado por modelos que mostram os fluxos e armazenagens de água entre atmosfera, vegetação, superfície, superfícies, água subterrânea e oceanos. Estes modelos apresentam pequenas diferenças entre si, com maior ou menor grau de detalhamento de partes do modelo global, mas todos expressam a mesma idéia de generalização do Ciclo de Água no Planeta. Este nível de descrição é simplista e tem pouco uso prático para o pesquisador voltado para a compreensão dos processos de transferência e armazenagem de água para o nível da bacia hidrográfica, mas é importante, pois oferece informações sobre mudanças climáticas globais, por exemplo, (BAIRD, 1996).

Os estudos de bacias hidrográficas requerem uma abordagem voltada para processos de armazenagem e transferência de água relacionada ao problema em foco. Por exemplo, para compreender o funcionamento do Ciclo Hidrológico nas

idades é necessário conhecimento sobre os processos de apropriação espacial e características físicas da bacia urbanizada.

5.3.2. Tipologias de modelos hidrológicos, potencialidades e limitações

A modelagem hidrológica foi desenvolvida visando a melhor compreensão e representação do funcionamento da bacia hidrográfica, e a previsão de condições diferentes das observadas. Os limites impostos pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos têm propiciado a elaboração de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados usados, da discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

Há apresentações e discussões referentes a tipologias de modelos em hidrologia (DOOGE, 1984; BEVEN, 1989; WATTS, 1996; BERGSTRÖM e GRAHAM, 1998; TUCCI, 1998; CHRISTOFOLETTI, 1999). Watts (1996) pondera que não há um tipo de modelo melhor que os demais, pois cada um pode ser avaliado como superior em alguns aspectos e frágil em outros. Neste caso, a escolha de um modelo depende principalmente do sistema a ser modelado e do problema hidrológico a ser tratado.

Conforme sua estruturação há três tipos de modelos hidrológicos, classificados em ordem crescente de complexidade em: empíricos, conceituais e de bases físicas (WATTS, 1996).

Os *modelos empíricos* ou tipo “caixa-preta” ajustam os valores calculados aos observados por intermédio de equações que não estão relacionadas aos processos físicos do sistema (TUCCI, 1998). Apesar da simplicidade conceitual, e, por este motivo, oferecerem informações hidrológicas limitadas, os modelos empíricos podem ter significantes aplicações (WATTS, 1996). Isto ocorre principalmente porque são baseados em um pequeno número de parâmetros, e normalmente são formulados para usar uma série de dados obtidos para a variável a ser prevista (PEDROLLO e LANNA, 1991).

Os *modelos conceituais* são baseados em representações limitadas dos processos físicos que ocorrem no sistema hidrológico, a sua definição se fundamenta, sobretudo na compreensão do funcionamento do sistema. São extensamente usados porque são de fácil formulação e parametrização e exigem recursos computacionais relativamente limitados (WATTS, 1996; REFSGAARD, 1997). Estes modelos admitem que as funções usadas na elaboração do modelo

consideram os processos físicos, e, muitas vezes, também são usadas equações empíricas relacionadas ao funcionamento do sistema (TUCCI, 1998).

Os *modelos de bases físicas* expressam esforço para explicar com rigor os processos físicos relevantes no sistema. Teoricamente é possível estabelecer todos os parâmetros e variáveis de entrada do modelo, entretanto, na prática, é complicado obter todos os dados a partir de técnicas de laboratório e medidas diretas de campo (WATTS, 1996).

Os modelos hidrológicos apresentam diferentes maneiras de representar as características espaciais e temporais do sistema hidrológico. Considerando este aspecto os modelos podem se distinguir entre: modelos concentrados ou homogêneos e modelos distribuídos.

Os *modelos concentrados (lumped)* representam a totalidade de um sistema hidrológico como uma unidade homogênea ou “concentrada”, eles oferecem informações sobre o estado médio do sistema (WATTS, 1996). Estes modelos não consideram a variabilidade espacial das variáveis e parâmetros que caracterizam o sistema. Geralmente, adotam apenas o tempo como variável independente (TUCCI, 1998).

Os *modelos distribuídos (distributed)* levam em conta a variabilidade espacial do fenômeno no interior do sistema (TUCCI, 1998). Isto significa que todos os parâmetros e variáveis que constituem o modelo devem ser avaliados em bases distribuídas, e, preferivelmente, devem ser medido em diferentes pontos do sistema. Esta última exigência pode causar problemas, uma vez que nem todos os valores podem ser obtidos facilmente. Geralmente seu uso é dificultado também porque exigem consideráveis recursos computacionais e demandam um longo tempo para a simulação (WATTS, 1996).

Os modelos hidrológicos podem ser classificados com base na natureza dos dados de entrada que lhes são atribuídos em: probabilísticos, estocásticos e determinísticos (DOOGE, 1984).

Nos *modelos probabilísticos* a análise é baseada completamente em valores históricos de uma única variável hidrológica que é adotada como independente (DOOGE, 1984). Nos *modelos estocásticos* o relacionamento entre inputs e outputs é estatístico, há introdução do conceito de probabilidade. Os *modelos determinísticos* caracterizam-se quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída (TUCCI, 1998). A dependência entre entrada

e saída reflete a hipótese de causalidade e pode ser representada por uma extensa variedade de modelos (DOOGE, 1984).

Dooge (1984) ressalta que a modelagem do funcionamento de uma bacia hidrográfica pode exigir um modelo que envolva elementos probabilísticos, estocásticos e determinísticos.

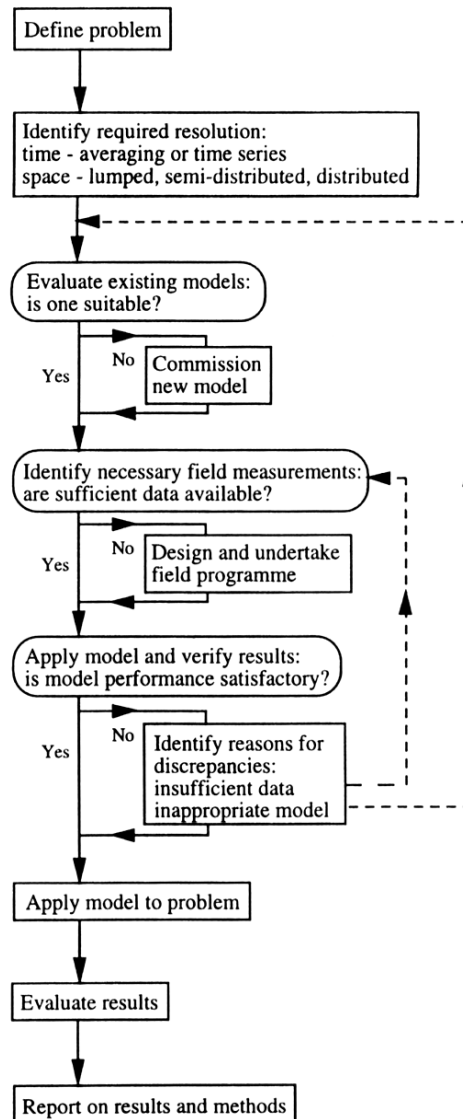
Tucci (1998) classifica os modelos conforme o tratamento da componente temporal em *modelos contínuos*, nos quais os fenômenos são contínuos no tempo; e *modelos discretos*, nos quais os registros das mudanças de estado do fenômeno são realizados em intervalos discretos.

Watts (1996) afirma que a escolha de um modelo deve levar em consideração as vantagens e desvantagens de cada tipo de modelo. O autor aponta alguns critérios para a seleção do modelo: reconhecimento adequado do problema hidrológico a ser modelado; condições de acessibilidades aos dados exigidos pelo modelo; disponibilidade de recursos computacionais compatíveis; definição da escala temporal de observações; custos do estudo em relação à demanda do problema e execução do modelo, e, finalmente, os resultados dos processos de verificação e reaplicabilidade do modelo. A figura 18 ajuda a descrever as etapas de escolha e uso de um modelo hidrológico.

Os modelos hidrológicos, muitas vezes, são adotados em atividades de planejamento, e podem ser classificados em: *modelos de funcionamento*, servem para descrever o funcionamento de um sistema com a possibilidade de simular situações visando a prognose para as mesmas; *modelos de otimização*, voltados para apontar as melhores soluções, em nível de projeto e os *modelos de planejamento*, que usam os outros dois tipos aplicados a diferentes áreas envolvendo além das informações hidrológicas também quantificações socioeconômicas e espaciais buscando disciplinar ações e investimentos (TUCCI, 1998).

A aplicação de modelos hidrológicos no planejamento é ampla, por exemplo, dimensionamento, previsão em tempo atual e avaliação do uso da terra; dimensão e previsão de cheia; dimensionamento do volume de um reservatório, capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; interação rio-aquífero; simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante, impacto de efluentes, eutrofização de reservatórios, rede de abastecimento e tratamento de água; rede de irrigação, navegação fluvial, etc (TUCCI, 1998).

Figura 18. Etapas para escolha e aplicação de um modelo hidrológico



Fonte: WATTS (1996)

Os modelos são usados em Hidrologia com três objetivos: simplificar e generalizar uma realidade complexa; prever a ocorrência de eventos hidrológicos, e planejar o uso futuro dos recursos hídricos (MORE, 1975).

“Os aspectos mais importantes no uso e mesmo na estrutura de modelos hidrológicos são: os objetivos nos quais o modelo será utilizado; as limitações do modelo na representação dos processos para os objetivos definidos e a qualidade e quantidade das informações utilizadas em conjunto com o modelo” (TUCCI, 1998, p. 227).

Há muitas dificuldades decorrentes da complexidade dos processos e da precariedade em relação aos dados meteorológicos e hidrológicos (MORE, 1975). A

quantidade e a representatividade das informações para ajuste e verificação de um modelo hidrológico são fundamentais para permitir um resultado de qualidade confiável, uma vez que o modelo não cria informações sobre a bacia, ele tem apenas a finalidade de explorar melhor as informações existentes. A quantidade, e também, a qualidade dos dados hidrológicos, definem limitações básicas aos modelos hidrológicos porque os estudos em hidrologia são, essencialmente, baseados em elementos observados e medidos em campo. Os dados permitem aferir os parâmetros e reduzir as incertezas dos mesmos na estimativa das variáveis hidrológicas (TUCCI, 1998).

São necessários cuidados na instalação de redes de monitoramento hidrológico, mas não há regras gerais a serem listadas, pois os fatores intervenientes são numerosos. Entretanto, pode-se ponderar sobre dois níveis de exigências relacionadas à escolha do lugar ideal para se efetuar as medições de dados:

- (a) associadas à representatividade que o dado pode fornecer a respeito dos processos observados. Geralmente está relacionada à dimensão da bacia hidrográfica e das suas características espaciais (como relevo, tipo de solo, cobertura do solo, entre outros), e depende também dos objetivos do monitoramento; e,
- (b) determinadas por questões práticas como condições do local para instalação e manutenção dos equipamentos, acessibilidade ao local, seleção dos instrumentos, escolha do observador e definição dos intervalos para medição.

A dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do funcionamento espacial de variáveis e fenômenos constituem significativas restrições aos modelos hidrológicos. Quanto menores as informações, maiores serão as incertezas dos prognósticos. Por outro lado, quanto mais informações, maior é a complexidade do modelo e torna-se mais difícil operacionalizá-lo (TUCCI, 1998).

Os modelos matemáticos têm limitações para incorporar em suas equações informações relativas a uma realidade heterogênea. Características da topografia, tipos de solo, padrões e mudanças da cobertura do solo influem sobre os processos hidrológicos. Geralmente a representação da variabilidade espacial é feita por intermédio de valores de parâmetros, o que traz dificuldades para calibrar os

modelos e interpretar fisicamente os parâmetros, sobretudo quando o modelo envolve um grande número de parâmetros (BEVEN, 1989).

Conforme classificação apresentada em Chevallier (2004), os parâmetros em hidrologia podem ser divididos em três categorias:

- (a) parâmetros climáticos: precipitação, evapotranspiração e parâmetros secundários (radiações solares, temperaturas, umidade do ar, vento...);
- (b) parâmetros do escoamento: descargas líquida e sólida e parâmetros relacionados (nível de água, características da rede de drenagem, área da bacia, velocidade, qualidade da água e dos sedimentos transportados, reservatórios naturais e artificiais);
- (c) parâmetros característicos do meio receptor: geologia, relevo, solos, vegetação, urbanização, etc.

Todo modelo usa um ou mais parâmetros para determinar o funcionamento básico do sistema. Os valores dos parâmetros devem ser ajustados para otimizar a performance do modelo, este processo é denominado calibração. Modelos concentrados e conceituais tendem a incorporar parâmetros que não podem ser calibrados por medição de campo, ou porque não têm significado físico ou porque são aplicados para uma grande extensão. Um modelo raramente pode reproduzir 100% de resultados corretos para todas as condições de input. Assim, é necessário decidir sob quais circunstâncias o modelo deve ser mais bem executado. Os parâmetros dos modelos de bases físicas são fisicamente realistas, e podem ser obtidos independentemente do modelo. As medidas de campo devem oferecer estimativas significativas do modelo, porque possíveis ajustes podem produzir mudanças sobre as bases físicas do modelo (WATTS, 1996).

Após a calibração do modelo é necessário fazer sua validação, visando garantir que o modelo seja executado de maneira adequada em função dos objetivos que motivaram sua aplicação. O processo envolve a avaliação da performance do modelo para uma série de dados não usados para a etapa de calibração, confrontam-se os resultados e julga-se a validade do modelo (WATTS, 1996).

Christofolletti (1999) reforça que o uso de modelos deve considerar suas limitações procurando maneiras adequadas para superá-las. Para que isto ocorra, há exigência de avaliação cuidadosa dos resultados gerados na simulação e previsão. Também é difícil estabelecer valores para os parâmetros do modelo e identificá-lo com parâmetros fisicamente mensuráveis no mundo real.

Os modelos não podem substituir as observações de campo e experimentos de laboratório, mas podem aumentar sua eficácia (CHRISTOFLETTI, 1999). Além de contribuir para a compreensão de um problema hidrológico específico, o uso de modelos também pode acrescentar conhecimento teórico sobre os processos hidrológicos (WATTS, 1996).

Watts (1996) sugere um conjunto de informações que deveriam constar em trabalhos sobre modelagem na expectativa de que estes estudos possam representar avanços na pesquisa: escolha do modelo; tipo de modelo; equações que governam o modelo; hipóteses inerentes ao modelo; fontes de dados de entrada; informações sobre a calibração; valores dos parâmetros usados, mais condições iniciais (informação suficiente para permitir a reaplicação dos resultados); resultados das análises de sensibilidade do modelo; conclusões e inferências (distinguindo entre os resultados do modelo e as inferências feitas à partir dele); recomendações para avançar o trabalho; referências à documentação adicional.

5.3.3. Questão escalar em modelos hidrológicos

Preocupações quanto à complexidade e simplicidade dos sistemas remetem a um aspecto central na modelagem: a questão da escala espacial e temporal, que na ciência geográfica sustenta e estimula parte de seus debates epistemológicos e metodológicos:

“Torna-se cada vez mais comum indagar quais os tipos de ordem que são apresentadas pelas informações geográficas e em que escala de espaço e de tempo cada uma funciona, o simples registro dos fatos está sendo considerado não só como pouco satisfatório, mas como impossível” (HAGGETT e CHORLEY, 1975, p.2).

Castro (1995) analisou alguns trabalhos que tratam de escala, mas concluiu que poucos autores na geografia se preocupam com a escala como questão metodológica essencial, sendo necessário esforço de reflexão e abstração. Escala expressa a proporção da representatividade do território, a representação dos diferentes modos de percepção e concepção do real.

Montello, 2001 apud Queiroz Filho (2005), propõe três principais significados, do ponto de vista espacial, para o termo escala:

- *escala cartográfica*: indica proporção, tamanho, dimensão do objeto de estudo. Expressa a forma de tratamento da ocorrência, relacionado à distribuição espacial do fenômeno e a maneira como será analisada;

- *escala de análise*: unidade de tamanho e de agregação dos dados para análise. Pode ser considerada como sinônimo de recorte espacial ou delimitação da área de estudo.
- *escala de fenômeno*: se refere ao tamanho da manifestação do fenômeno geográfico.

Apesar da complexidade que caracteriza a maior parte dos modelos, ainda representam simplificações extremas da realidade. Os processos hidrológicos ocorrem em um complexo espacial tridimensional e apresentam desenvolvimento variável no tempo e no espaço (BEVEN, 1989).

A complexidade é representada pelo grau e tipos de heterogeneidades passíveis de quantificação que caracterizam o sistema. É expressa pela dificuldade em medir uma magnitude até certo detalhe e sua influência sobre os macroprocessos. Os sistemas hidrológicos se comportam como sistemas de complexidade organizada que é própria dos sistemas dinâmicos. Por fim, a complexidade é descrita por muitas variáveis envolvidas por relações de interação, interdependência e mecanismos de retroalimentação (MENDIONDO e TUCCI, 1997).

A resposta de um sistema dinâmico depende também das condições iniciais. Em sistemas naturais fortemente não-lineares, a incerteza inicial pode produzir erros a longo prazo prejudicando as previsões. Em sistemas quase-lineares e de baixa inércia o efeito das condições iniciais é menor porque o erro é dissipado após o tempo de transporte do fluxo (MENDIONDO e TUCCI, 1997).

As condições nas quais os processos ocorrem na escala de tempo e espaço são diferentes, portanto o conhecimento de um processo numa escala de tempo ou espaço não implica necessariamente o entendimento desse processo em outras escalas. Isto ocorre devido ao denominado efeito de escala. Os dados hidrológicos são usados para gerar resultados para uma determinada bacia o que impõe limites a sua extrapolação para outras bacias com características diferentes e para escalas espacial e temporais diversas (TUCCI, 1998; CHEVALLIER, 2004).

Durante os anos de 1960 a 1980, foram desenvolvidas várias bacias experimentais, cujos resultados eram limitados, principalmente porque a transferência do conhecimento da micro para a meso e macroescala não é direta. A representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas é limitada pela heterogeneidade espacial dos sistemas hidrológicos, a incerteza inerente à observação de parâmetros e processos e a falta de relação entre os parâmetros dos

modelos matemáticos com as configurações espaciais existentes (MENDIONDO e TUCCI, 1997a).

Mendiondo e Tucci (1997a) afirmam que os problemas de escala em hidrologia pertencem ao âmbito da interdisciplinaridade e sugerem a construção de uma Teoria de Escala, voltada para interpretar três pontos: representatividade, diversidade, e transferência dos processos nas áreas elementares do Ciclo Hidrológico. Beven (1989) aponta a deficiência de uma teoria de integração de diferentes níveis escalares como uma limitação aos modelos hidrológicos de bases físicas.

Em sistemas hidrológicos, a escala não tem caráter puramente quantitativo, expressando uma redução ou ampliação das variáveis espaciais, e não é arbitrária ou escolhida a priori. É função da composição física do sistema natural e do balanço de forças atuantes (MENDIONDO e TUCCI, 1997a).

Blösch e Sivapalan, 1995 (apud MENDIONDO e TUCCI, 1997a) estabelecem a seguinte distinção para escalas naturais:

- escala de observação*: registrada pelos instrumentos de medição;
- escala espacial* (ou temporal) do processo: refere-se a uma extensão (ou duração), a um período no espaço (ou no tempo) ou a uma correlação;
- escala de modelação*: escolhida para avaliar um processo, visando compatibilidade entre processo e amostragem, conforme o objetivo do estudo e de fatores físico/econômicos.

Escalas espaciais de modelos hidrológicos variam desde microescalas até algumas centenas de quilômetros. Dooge, 1998 (apud TUCCI, 1998, p.30) *classificou as escalas dos processos hidrológicos em microescala, quando envolvem magnitude de $10^{-8} - 10^2m$, mesoescala de $10^2 - 10^4m$ e macroescala de $10^5 - 10^7m$.*

Por exemplo, N.Fernandes et al (2001) consideraram o nível da umidade do solo, pois admitem dois condicionantes fundamentais aos deslizamentos de encostas: os parâmetros morfológicos do terreno e a dinâmica hidrológica do solo. Assim, os autores associaram a realização de ensaios com o permeâmetro de Guelph, para análise da variação da condutividade hidráulica dos solos, e simulações com o modelo SHALSTAB, voltado para a previsão de áreas susceptíveis nas bacias dos rios Quitite e Papagaio, no estado do Rio de Janeiro. Por outro lado, Bergström e Graham (1998) aplicaram o modelo HBV para o runoff da bacia de macroescala do Mar Báltico.

Escalas temporais variam desde segundos, minutos até séries temporais que contemplam várias décadas de observações. A aplicação dos modelos hidrológicos é feita para processos que se desenvolvem continuamente no tempo. Entretanto, os modelos calculam o estado do sistema para intervalos temporais pré-definidos. O período entre estes intervalos é conhecido como *passo de tempo* (WATTS, 1996). A extensão do passo de tempo é definida pela necessidade de compreensão do problema hidrológico em foco, mas, infelizmente, em muitas situações pode ser definida pela série de dados disponíveis.

No caso de bacias continentais para fins de planejamento em escala nacional do abastecimento de energia elétrica, mormente o passo de tempo é mensal, ou até mesmo bimensal, caso brasileiro nos anos 60 e 70.

As dimensões temporal e espacial também devem ser consideradas nas etapas de aquisição e processamento dos dados que serão empregados em conjunto com o modelo. Todos os parâmetros da hidrologia são variáveis no tempo e no espaço, e desenvolvem uma evolução dinâmica, apresentando tendências que podem, às vezes, ser representadas através de leis estatísticas. É necessário considerar cuidadosamente os parâmetros, a frequência e a duração do monitoramento, de acordo com a evolução temporal do fenômeno estudado. Segundo a escala espacial os processos que vão intervir não são os mesmos (efeito de escala), geralmente não é confiável *reunir dados adquiridos numa escala espacial definida com processos analisados ou métodos elaborados dentro do quadro de uma escala maior ou menor* (CHEVALLIER, 2004).

5.4. Bacia hidrográfica como unidade de análise na modelagem hidrológica

A bacia hidrográfica é uma unidade geomorfológica e hidrológica, optar por ela como unidade espacial de análise significa aceitar que há uma relação entre aspectos geomorfológicos e a circulação da água na superfície terrestre.

A representação de uma bacia hidrográfica é resultado de um processo que envolve abstração na medida em que seus limites são definidos sobre uma carta topográfica a partir das características do relevo de certa área, e há um inegável grau de subjetividade neste procedimento. Chevallier (2004, p. 284) fez a seguinte observação: *“A bacia contém de um lado a noção topográfica de divisor de água e de outro a noção da área de interceptação das precipitações”*.

A bacia hidrográfica é expressão de um espaço concreto e tridimensional passível de ser estudado do ponto de vista da circulação da água, mesmo porque há

uma relação indissociável entre a definição dos limites de uma bacia hidrográfica e a circulação da água.

Apesar de parecer muito evidente, a afirmação anterior é pertinente porque exprime a abrangência das conseqüências que os fluxos hídricos podem desencadear. O abastecimento de lençóis freáticos, dos canais fluviais, episódios de enchentes e de movimentos de massa são apenas alguns dos processos que podem exemplificar o que foi dito.

Doorkamp e King (1971) afirmam que o problema da definição da bacia hidrográfica está na sua localização no campo ou em um mapa. Os autores descrevem a bacia hidrográfica como uma região morfológica diferenciada, cuja forma atual e morfologias que contém resultam de uma seqüência de processos, ou da dominância diferenciada de processos pretéritos.

A evolução de uma bacia hidrográfica é resultado da relação entre a atuação dos processos fluviais e a resistência que a superfície opõe a eles (ZAVOIANU, 1985). É nesta interação que se desenvolve uma rede hidrográfica hierarquicamente organizada e com densidade de drenagem variável (CHRISTOFOLETTI, 1980). O aspecto qualitativo destas relações é bastante conhecido, mas em termos quantitativos as análises são difíceis, principalmente pela existência limitada de dados e por problemas metodológicos. A teoria dos sistemas associada aos métodos da matemática (por exemplo, os estatísticos) pode propiciar um salto nas pesquisas de caráter quantitativo (ZAVOIANU, 1985).

Sob o enfoque da Teoria Geral dos Sistemas, a bacia hidrográfica é uma unidade de análise adequada porque facilita a identificação das entradas e saídas de água, bem como o conjunto de elementos que existem entre estes dois pontos do sistema, logo a bacia hidrográfica é passível de ser estudada como um sistema físico.

A bacia hidrográfica pode ser descrita como um sistema físico aberto que troca permanentemente matéria e energia com o ambiente circundante. A principal fonte de entrada de matéria é a precipitação, e secundariamente percolação subterrânea proveniente de bacias vizinhas, e até ação do vento (ZAVOIANU, 1985), mas também pode existir reversão de água de outras bacias através de obras de engenharia hidráulica.

Uma definição comum nos manuais de hidrologia descreve a bacia hidrográfica como *“um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas*

intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente. (...) O papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume concentrado no tempo (precipitação) em uma saída de água (escoamento) de forma mais distribuída no tempo” (SILVEIRA, 2004a).

Nesta definição é mencionado o termo exutório como o local de saída principal da água que circula no sistema bacia hidrográfica. A localização deste ponto no sistema pode ser muito importante para a quantificação de variáveis hidrológicas como vazão ou sedimento transportado, por exemplo. Isto tem aplicação no uso de modelos para simulação de processos e planejamento do uso dos recursos hídricos. O que a definição dos hidrologistas propõe é que primeiro determina-se um ponto, que pode ou não ser a foz e depois se determinam os limites da bacia em função dele.

Esta definição também menciona os demais processos naturais pelos quais a água pode sair de uma bacia hidrográfica: evaporação, transpiração e infiltração profunda. Isto ocorre porque as características da bacia desencadeiam diferentes processos de transporte de matéria e energia superficialmente e subsuperficialmente. Assim, a circulação da água na superfície e na sua subsuperfície é que define a bacia hidrográfica como um sistema físico tridimensional, como também foi observado por Rodrigues e Adami (2005). Já Christofolletti (1980) define bacia hidrográfica como a área drenada por um determinado rio ou por um sistema fluvial, reforçando um caráter bidimensional apenas.

Às entradas de matéria corresponde uma quantidade de energia compatível com as suas massas e há, ainda, insolação direta sobre as superfícies da bacia. Qualquer volume de matéria que sai da bacia transporta também uma quantidade proporcional de energia. As mudanças de estado da água consomem grande quantidade de energia (ZAVOIANU, 1985).

Os elementos que contribuem para a definição das características da bacia são: embasamento rochoso, relevo, solo (tipo e profundidade) e cobertura vegetal. São variáveis com interpolações bem definidas, mas difíceis de separar e quantificar. Elementos e processos hidrológicos que estabelecem as relações entre eles serão tratados nos próximos itens deste capítulo.

Enquanto unidade geomorfológica e hidrológica, a bacia hidrográfica conserva o desenvolvimento da maioria dos processos elementares de transporte e

armazenagem de matéria e energia (SILVEIRA, 2004a). É um sistema que não foi dimensionado, mas é resultado de processos naturais. O homem deve procurar adaptar-se aos seus condicionantes, buscando entender o funcionamento da bacia (TUCCI, 1998).

5.5. Subsistemas (elementos) do ciclo hidrológico

Os fluxos e estocagens da água ocorrem em função de uma diversidade de características espaciais, que podem ser definidos pelos aspectos da superfície da bacia hidrográfica, do seu solo e do manejo dos recursos hídricos. Distribuídos ao longo de uma bacia hidrográfica estes fatores regulam a circulação da água, separando o volume de entrada em diferentes proporções que seguem por diversos caminhos e para diferentes armazenagens.

A natureza física das superfícies, diferenciadas em superfícies líquidas e sólidas (CHRISTOFOLETTI, 1979), controla os fluxos pois quando a entrada de água ocorre diretamente sobre uma superfície líquida (córregos, rios e represa) são deflagrados os processos de escoamento fluvial e evaporação. Mas quando a água atinge as superfícies líquidas são desencadeadas seqüências diferenciadas que podem envolver os processos de escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Nas duas situações podem ser inseridos os mecanismos operacionais de controle humano, como adução de água para tratamento ou transferência de água entre bacias, entre outros.

O tipo de uso da terra é importante porque a presença ou ausência de interceptação por vegetação (natural ou antrópica) é responsável por diferentes desenvolvimentos do ciclo hidrológico, distribuindo em proporções distintas os volumes de água que retorna à atmosfera por evapotranspiração e a que circula internamente na bacia hidrográfica e atua também sobre a velocidade de escoamento.

Capacidade de infiltração, de retenção superficial, de umidade do solo e capacidade de armazenagem do aquífero são fatores que agem diretamente na distribuição do fluxo de infiltração, gerando os processos hidrológicos da água subterrânea e controla o volume de água que escoar.

Há também os reguladores de fluxos destinados aos múltiplos usos da água como o abastecimento público, rede de esgotos, drenagem artificial e geração de energia. Os principais reguladores de fluxos por instalações hidráulicas estão relacionados às galerias pluviais, capacidade de adução, vazamentos nas

tubulações, distribuição de água tratada, coleta e emissão de esgotos e perfuração de poços.

Tendo em vista a descrição de bacias hidrográficas urbanas caracterizadas por usos múltiplos da água, optou-se por distinguir os seguintes elementos: as áreas de contribuição, a vegetação, o solo, a rede de drenagem fluvial, assim como o tratamento e distribuição de água, a coleta e tratamento de esgotos e a drenagem urbana.

5.5.1. Áreas de Contribuição

Para explicar a que se refere este subsistema é necessário discorrer sobre a dificuldade para encontrar a denominação que fosse mais apropriada.

Ao construir o modelo conceitual da bacia hidrográfica (cap. 7) foi apontado um elemento inicialmente pensado em termos de vertentes. Verificou-se que quando se trata de vales encaixados esta nomenclatura é bastante adequada, porém quando se trata de sistemas fluviais que apresentam uma planície de inundação considerável em termos de área e de desenvolvimento de processos esta conceituação traz limites. Este é o caso, por exemplo, do rio Embu Guaçu, importante formador da Represa Guarapiranga e que apresenta uma expressiva planície fluvial meândrica, remanescente do sistema fluvial que originalmente caracterizava toda a Bacia do Alto Tietê (AB'SÁBER, 1957, 1958).

Os aspectos morfológicos e morfométricos neste caso são importantes, porque também controlam a capacidade de infiltração, regulando tanto o volume como a velocidade da água a ser escoada.

Por exemplo, em estudos voltados para simulação e previsão de enchentes as características do relevo são muito importantes, pois atuam sobre as direções dos fluxos e velocidades do escoamento da água. Conseqüentemente interferem no tempo que a água precipitada em diferentes pontos da bacia leva para alcançar os locais onde ocorrem cheias. Estas hipóteses foram verificadas por Silveira e Desbordes (2000), que adotaram um modelo hidrológico distribuído para caracterização do funcionamento hidrológico na bacia do Arroio Dilúvio, em Porto Alegre, na geração de eventos de cheia. Este modelo associa informações de drenagem, topografia, ocupação do solo, taxas de impermeabilização e isoietas.

Há uma diversidade de morfologias heterogêneas na bacia hidrográfica que participam dos fluxos hídricos determinando uma elevada complexidade. Faz-se necessária uma simplificação que é realizada por intermédio de um agrupamento

mais geral, capaz de envolver todas as formas de relevo responsáveis pela contribuição de água que aflui para o reservatório.

Pelos motivos expostos optou-se por reunir as vertentes e as planícies de inundação em um subsistema, ora denominado, área de contribuição, definida como a área de uma determinada bacia hidrográfica não ocupada por espelhos e cursos de água. A delimitação da área de contribuição é feita sempre em relação a um exutório determinado.

5.5.2. O papel da vegetação no ciclo hidrológico

Na análise dos “caminhos da água” interessa saber se a precipitação ocorre sobre vegetação (natural ou cultivada). Na presença de vegetação, uma parcela da precipitação é retida nas folhas e galhos e será evaporada, assim que houver capacidade potencial de evaporação. Após a evaporação, as plantas passam a perder água absorvida do solo através do sistema radicular por transpiração. A evapotranspiração média em florestas tropicais é de 1415mm por ano, e pode atingir 900mm por ano em períodos de longo déficit hídrico (BRUIJNZEEL, 1990 apud TUCCI e CLARKE, 1997). A transpiração é responsável por cerca de 70% desses valores (TUCCI e CLARKE, 1997). Quando é excedida a capacidade da planta em reter água em suas folhas e galhos, há percolação da água por galhos e troncos atingindo a superfície, onde pode seguir seu caminho por escoamento ou infiltração. A porcentagem de água que atinge o solo através dos troncos varia entre 1% e 2% da precipitação e 85% da chuva incidente atravessa a vegetação e atinge a superfície (TUCCI e CLARKE, 1997).

Os processos de transferência de água na presença de vegetação variam de acordo com aspectos da cobertura. Assim, uma mata densa, por exemplo, tem a capacidade de reter em seu dossel grande parte da água precipitada, permitindo que a percolação por galhos e troncos seja mais lenta. Soma-se a presença de espessa camada de serrapilheira que esta vegetação produz, porque tem capacidade de amenizar a velocidade da água que atinge a superfície amenizando o impacto direto sobre o solo e potencializando a sua infiltração.

As superfícies recobertas por matas são fundamentais para a regulação do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica porque a vegetação atua sobre o balanço de energia e no fluxo de volumes de água, que circulam predominantemente em duas direções: vertical (precipitação e evapotranspiração), e longitudinal, pelo

escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficiais e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo) (TUCCI e CLARKE, 1997).

Lima e Zakia (2000) tratam do papel das matas ciliares que, segundo os autores, ocupam as áreas mais dinâmicas da paisagem que são as zonas ripárias. Por estarem ligadas aos cursos d'água, a delimitação destas áreas é bastante difícil porque os processos que moldam os leitos dos cursos são bastante variáveis no tempo e no espaço. Esta característica tem repercussão sobre a estrutura, a composição e a distribuição espacial da vegetação.

As zonas ripárias, segundo os autores desempenham sua função hidrológica pelos processos de geração de escoamento direto em microbacias, manutenção da quantidade e qualidade da água, ciclagem de nutrientes e sustentação de ecossistema aquático. Os autores explicam que o tipo de escoamento que ocorre apenas quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração¹⁵, acontece somente em áreas restritas da microbacia. Nas zonas saturadas que margeiam os cursos d'água e cabeceiras, concavidades do terreno e áreas de solo raso mesmo sob intensidade de chuva menor que a capacidade de infiltração podem produzir escoamento superficial que ocorre como interfluxo lateral. Estas áreas não são fixas porque variam com a intensidade e duração da chuva e com as condições de umidade antecedentes (CHORLEY, 1978 apud LIMA e ZAKIA, 2000). Nas demais partes da bacia, a água da chuva tende a se infiltrar, alimentando o escoamento superficial, que por ser rápido, participa também do escoamento direto das chuvas. Como decorrência destes processos há armazenamento de água que contribui para a manutenção da vazão na estação seca.

Além disso, a zona ripária, também responde pela qualidade da água porque possibilita a filtragem superficial de sedimentos, e assim, pode diminuir a concentração de herbicidas na água cujas microbacias apresentam o uso destes produtos. Os sistemas radiculares da mata ciliar também filtram nutrientes transportados em solução ao mesmo tempo em que desenvolve a ciclagem geoquímica de nutrientes da bacia (LIMA e ZAKIA, 2000). Os autores colocam que as zonas ripárias desempenham ainda, função ecológica porque servem como

¹⁵ Este processo é conhecido como "escoamento hortoniano" pois foi enunciado por Horton à partir de meados da década de 1930. (LIMA, W. de Paula e ZAKIA, M. J. Brito – Hidrologia de Matas Ciliares. In: Matas Ciliares. Conservação e Recuperação. RODRIGUES, R.R & FILHO, H. de F. L. (orgs.). São Paulo: EDUSP: FAPESP, 2000. p.34).

corredores para o movimento da fauna ao longo da paisagem e favorecem a dispersão vegetal.

Na medida em que a cobertura vegetal é retirada, novas condições hidrológicas são estabelecidas na bacia hidrográfica. Tucci e Clarke (1997) mencionam algumas conseqüências: aumento do albedo, maiores flutuações da temperatura do ar e déficit da tensão de vapor, redução do volume evaporado, diminuição da variabilidade da umidade das camadas profundas do solo. Citam a redução de até 50% na evapotranspiração e 20% na precipitação graças às dependências entre os dois processos, e também, de incertezas existentes nos modelos que geraram tais estimativas.

O balanço hídrico da bacia amazônica indica os seguintes dados: total da precipitação cerca de $12 \times 10^{12} \text{m}^3$ por ano, a vazão do rio Amazonas, $5,5 \times 10^{12} \text{m}^3$ por ano e a evapotranspiração $6,5 \times 10^{12} \text{m}^3$ por ano. Estudos sobre o balanço hídrico amazônico apontam evidências de que o atual equilíbrio hídrico da região depende da floresta, sendo que a sua substituição por outros tipos de cobertura podem acarretar mudanças climáticas com conseqüências sobre o balanço de energia e balanço hídrico (SALATI, 1985).

Tucci e Clarke (1997) ressaltam os impactos sobre o escoamento, normalmente caracterizado quanto ao funcionamento de enchentes, vazões mínimas e médias. A diversidade de uso da terra e de técnicas (Figura 19) adotadas provoca respostas diferentes no escoamento, pois ocorrem diversos graus de impermeabilização do solo. Os principais aspectos que influenciam as alterações do escoamento são: estado de umidade do solo, sazonalidade climatológica, diferenças topográficas, declividade, profundidade do solo, grau de alteração devido ao método de desmatamento e cobertura que substitui a original.

Figura 19. Classificação sobre a mudança e uso do solo

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	Desmatamento Reflorestamento Impermeabilização
Uso da Superfície	Urbanização Reflorestamento para exploração sistemática Desmatamento: extração de madeira, culturas de subsistência, anuais ou permanentes.
Método de alteração	Queimada Manual Equipamentos

Fonte: TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. (1997). p. 139.

A redução da cobertura florestal aumenta a vazão média, entretanto a resposta à mudança é variável e de difícil previsão (TUCCI e CLARKE, 1997). Bosch

e Hewlett (apud TUCCI e CLARKE, 1997) observaram que não é possível detectar influência na vazão média para desmatamento inferior a 20%. Bruijnzeel (1996 apud TUCCI e CLARKE, 1997), detectou que a vazão média pode aumentar em áreas ocupadas por culturas anuais, vegetação rasteira e plantação de chá, mas pode retornar às condições naturais caso a área seja ocupada por pinos e reduzir a vazão para eucaliptos.

Tucci e Clarke (1997) relatam que há experimentos que demonstram que a vazão mínima após o desmatamento pode aumentar ou diminuir, e isto pode ser causado em função de características do solo quanto à sua capacidade de gerar infiltração e escoamento subsuperficial.

A ocupação urbana é um dos processos de apropriação espacial que geram maiores impactos sobre o ciclo da água. O desenvolvimento urbano promove a substituição da vegetação originária por superfícies impermeáveis que reduzem a capacidade de infiltração do solo gerando aumento do escoamento superficial, diminuição do lençol freático por falta de realimentação devido à redução do escoamento subterrâneo (TUCCI, 2002).

O recobrimento do solo define um atributo espacial: a permeabilidade da superfície. Conforme este atributo distinguem-se as superfícies permeáveis cuja cobertura permite que parte da água que “entra” na bacia hidrográfica possa infiltrar gerando escoamento subsuperficial e/ou subterrâneo. E as superfícies impermeáveis definidas como todas as superfícies na qual a precipitação escoar diretamente para condutos e canais, gerando escoamento superficial Campana e Tucci (2000). Quando não há vegetação ocorre aumento das condições de impermeabilidade da bacia, e a água continua seu percurso por evaporação ou por escoamento, ou ainda pode ser retida temporariamente em depressões do terreno.

5.5.3. Água Subterrânea

Rebouças (2002) lembra que até a década de 1950 os estudos sobre águas subterrâneas eram norteados pelo seu caráter utilitário visando sua captação. Na década de 1960, foram incorporadas preocupações com a sua preservação e a partir deste momento desenvolveu-se a idéia do funcionamento da camada aquífera como um sistema com zona de recarga ou de entradas e zonas de descargas ou de saídas inter-relacionadas. Na década de 1970 admitiu-se a importância dos processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem no solo, na determinação das características quantitativas e qualitativas das águas subterrâneas.

Atualmente a expressão água subterrânea designa toda a água que ocorre abaixo da superfície definindo fluxos hídricos locais, mais curtos e fluxos mais longos, que são os intermediários e os regionais. Portanto, as águas subterrâneas referem-se à parcela da hidrosfera que ocorre na subsuperfície terrestre (REBOUÇAS, 2002).

O processo físico mais importante de recarga de água subterrânea é a infiltração, cujo volume e velocidade dependem de vários fatores que, atuam na determinação das condições da água subterrânea.

A força gravitacional, a viscosidade da água e características físicas dos materiais, especialmente porosidade e permeabilidade, influem no armazenamento e movimento da água subterrânea (KARMANN, 2003). Porosidade é uma propriedade física definida pela proporção entre o volume de poros e o volume total de certo material (KARMANN, 2003). A porosidade é controlada, principalmente pela forma e tamanho dos grãos, grau de seleção, extensão da cimentação química e fraturas (BROWN, 2000). Permeabilidade é a propriedade física dos materiais que define a capacidade do fluxo de água através dos poros, o que depende do tamanho dos poros e da conexão entre eles (KARMANN, 2003). A porosidade expressa *quanta* água pode ser armazenada em uma rocha, a permeabilidade determina *quão rápido* a água pode fluir através dela (BROWN, 2000).

Normalmente em rochas permeáveis as velocidades de fluxo oscilam entre 0,005 a 1,5 m por dia, enquanto nas rochas impermeáveis são menores que 0,005 m por dia (BROWN, 2000).

As unidades rochosas ou de sedimentos que têm porosidade e permeabilidade para gerar armazenagem e transferência de água em volume suficiente para exploração são denominadas de aquíferos (KARMANN, 2003)¹⁶.

Os aquíferos podem ser classificados em: aquíferos livres, que são camadas que normalmente ocorrem em alguns metros de profundidade e são associados ao regolito, sedimentos ou rochas; aquíferos suspensos, localizados acima de uma camada impermeável; e, aquíferos confinados, encerrados entre duas camadas impermeáveis (KARMANN, 2003; BROWN, 2000; REBOUÇAS, 2002).

¹⁶ Ainda, considerando as duas propriedades físicas dos materiais – porosidade e permeabilidade - distinguem-se os termos: (a) aquícludes, rochas que apesar de saturadas e com grande volume de água, são incapazes de transmiti-la com velocidade necessária para abastecimento de poços ou nascentes; (b) aquífugos, rochas que não apresentam poros interconectados e não absorvem e nem transmitem água; (c) aquítarde, expressa comparativamente a capacidade de produção de água entre unidades rochosas. Logo, em um estudo de caso, a unidade mais produtiva é considerada aquífero e a de menor produção de água é denominada aquítarde.

Há situações nas quais os aquíferos confinados originam o fenômeno do artesianismo. Graças ao aumento da pressão hidrostática na direção de profundidades crescentes, ocorrem jatos naturais de água. Comumente poços tubulares profundos são denominados de poços artesianos, mas se forem considerados, a rigor, os aspectos geológicos e os processos físicos envolvidos, certamente a grande maioria destes poços não apresentem as características do artesianismo.

Para Rebouças (2002) as características geológicas do terreno são fundamentais na determinação das condições das águas subterrâneas e respondem por três aspectos:

- regulam a condição de ocorrência determinando se o aquífero é livre, confinado ou intermediário;
- regulam os aspectos hidrodinâmicos das rochas aquíferas quanto à sua porosidade, permeabilidade e presença de fissuras;
- determinam extensão, espessura, profundidade e características químicas dos aquíferos.

Rebouças (2002) destaca também a atuação dos regimes pluviométricos na determinação de taxas e processos de recarga da água subterrânea. Há uma relação entre intensidade de precipitação e taxas de infiltração. Quando a intensidade das chuvas é muito superior a infiltrabilidade do solo, as taxas de recarga são praticamente nulas, enquanto episódios pluviométricos de média intensidade podem gerar maiores taxas de recarga.

5.5.4. Rede hidrográfica

Rede hidrográfica rede fluvial ou de drenagem, é composta por todos os rios de uma bacia hidrográfica, hierarquicamente interligados a partir de qualquer número de fontes até a desembocadura da referida rede (CHRISTOFOLETTI, 1997).

É difícil determinar a partir de qual dimensão um curso d'água pode ser denominado rio, mas há muitos termos designativos para os cursos menores, por exemplo, arroio, ribeira, ribeirão, córrego entre outros, sendo o termo rio usado para o principal e maior curso d'água constituinte de uma rede hidrográfica (CHRISTOFOLETTI, 1997).

A rede hidrográfica constitui um dos principais mecanismos de saída da água que circula pela bacia hidrográfica. Sua dimensão não é fixa e depende mais das subdivisões atribuídas (RODRIGUES e ADAMI, 2005).

A quantidade de água dos cursos fluviais depende da área de bacia que drena, da precipitação total e de seu regime, e das perdas por evapotranspiração e infiltração (CHRISTOFOLETTI, 1997).

5.6. Processos elementares do ciclo hidrológico

5.6.1. Precipitação

Precipitação é água proveniente do vapor de água da atmosfera depositada na superfície terrestre de qualquer forma, com chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. Conforme os processos que provocam a ascensão das massas de ar gerando precipitação podem-se definir três tipos de precipitação: frontais, orográficas e convectivas (HOLTZ, 2003).

A precipitação apresenta grande variabilidade espacial e temporal, mas a despeito do conhecimento acumulado sobre mecanismos físicos geradores de precipitação, sua distribuição espacial mais geral e aspectos sazonais que caracterizam regimes não é possível determinar previsões com segurança.

A precipitação desencadeia uma seqüência de processos determinantes da evolução da paisagem. Segundo a teoria da bio-resistência exposta por Erhart, 1956 apud Queiroz Neto (2001), a disponibilidade hídrica registrou indícios de uma alternância dos processos físicos e químicos de elaboração do relevo, configurados por fases de clima seco e árido, com baixa densidade de vegetação (resistência) e úmida com vegetação florestal (biostasia).

Há estudos que procuram analisar o desenvolvimento da precipitação no tempo e no espaço, destacam-se alguns trabalhos a respeito do universo de análise desta pesquisa: Monteiro (1967, 1973, 1975), Tarifa (1975), Conti (1973) e Azevedo (2001, 2002a,b).

Azevedo (2001) demonstrou aspectos relacionados ao processo de tomada de medidas de chuva, pois estas não seriam realmente pontuais, caráter condicionado, na verdade, à escala em que as informações são mapeadas, conclui que os instrumentos fornecem uma média da precipitação numa pequena área.

Azevedo (2002b) mencionou que a localização de postos pluviométricos normalmente está relacionada às questões práticas, como fácil acesso ao posto de observação, maior garantia de integridade dos instrumentos. Logo, uma vez que a rede amostral não foi locada a partir de hipóteses espaciais há conseqüências sobre os resultados do trabalho científico devido a apropriação das informações assim geradas.

Para extrapolar o valor da precipitação sobre uma área qualquer a partir dos dados medidos por um pluviômetro ou pluviógrafo há três métodos: média aritmética, método de Thiessen, método das isoietas (HOLTZ, 2003).

5.6.2. Evaporação e Transpiração

A evaporação ocorre quando a água líquida é convertida para vapor de água, sendo transferida para a atmosfera e (TUCCI e BELTRAME, 2004). Transpiração é a evaporação devida à ação fisiológica dos seres vivos (MARTINS, 1976b). A evapotranspiração é a perda de água por evaporação do solo e transpiração dos seres vivos, sobretudo dos vegetais através dos estômatos localizados nas folhas. Estes processos só ocorrem com o ingresso de energia solar (TUCCI e BELTRAME, 2004).

Os fatores que intervêm no processo de evaporação são: a umidade relativa do ar, a temperatura, o vento, a radiação solar, a pressão barométrica, e a salinidade da água. A evaporação da superfície das águas depende ainda da profundidade da massa de água. A transpiração é função da capacidade de evaporação da atmosfera, da temperatura, da velocidade do vento, luz e condições do solo (MARTINS, 1976b).

Os procedimentos normalmente usados para determinar a evapotranspiração são: transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas, balanço hídrico e medida direta com o uso de evaporímetros¹⁷ (TUCCI e BELTRAME, 2004).

Para os estudos baseados em evapotranspiração é necessário fazer uma distinção entre dois conceitos: o primeiro é a *evapotranspiração potencial (ETP)*, que para PENMAN (1956 apud TUCCI e BELTRAME, 2004) é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água. Segundo, *evapotranspiração real (ETR)*, é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo, é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR < ETP$) conforme GANGOPADHYAYA et al, (1968 apud TUCCI e BELTRAME, 2004).

¹⁷ "Os evaporímetros são instrumentos que possibilitam uma medida direta do poder evaporativo da atmosfera, estando sujeitos aos efeitos de radiação, temperatura, vento e umidade. Os mais conhecidos são os atmômetros e os tanques de evaporação" (TUCCI e BELTRAME, 2004, p.265).

Há escassez de informações confiáveis sobre evapotranspiração real, pois o custo para as observações é elevado envolvendo um longo tempo de trabalho já que se trata de um processo complexo e dinâmico envolvendo organismos vivos, o que dificulta a obtenção destes dados. Já a evapotranspiração potencial, pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas de forma rápida e suficientemente precisa favorecendo o desenvolvimento de estimativas capazes de atender a maioria dos objetivos de estudos hidrológicos (TUCCI e BELTRAME, 2004).

5.6.3. Infiltração

Infiltração é o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através dos vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada-suporte, que a retém, formando então a água do solo (MARTINS, 1976a). O desenvolvimento deste processo depende da quantidade de água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar iniciais do solo (SILVEIRA, 2004b).

É possível distinguir três fases de descida de água para a subsuperfície e que se diferenciam basicamente pelas forças físicas atuantes em diferentes regiões do solo. Na zona de aeração, ocorrem as fases de intercâmbio e de descida. Na primeira, a água pode retornar à superfície por uma aspiração capilar, provocada pela evaporação ou pode ser absorvida pelas raízes das plantas e depois transpirada pelo vegetal. Já na segunda fase predomina o deslocamento vertical da água, pois a ação de seu peso próprio supera a adesão e a capilaridade, ocorre até que a água atinja uma camada-suporte de solo impermeável. Na zona de saturação, ocorre a fase de circulação, onde está constituído o lençol subterrâneo, e o movimento segue a ação da gravidade e as leis de escoamento subterrâneo (MARTINS, 1976a).

Os estudos sobre infiltração consideram dois conceitos, a saber: a *capacidade de infiltração* que se refere ao potencial que o solo tem de absorver água em sua superfície, em termos de lâmina por tempo e a *taxa real de infiltração* que ocorre quando há disponibilidade de água para penetrar no solo (SILVEIRA, 2004b).

Em outras palavras, a capacidade de infiltração é a quantidade máxima de água que um solo, sob uma dada condição pode absorver na unidade de tempo por

unidade de área horizontal. Pode ser expressa em mm/h, mm/dia, m³/m²/dia. A determinação da capacidade de infiltração local do solo pode ser feita de maneira direta com o uso de aparelhos denominados infiltômetros (MARTINS, 1976a, p.48). Ou com o equacionamento geral da infiltração baseado na representação matemática do movimento da água em solos não-saturados (teor de umidade abaixo da saturação) (SILVEIRA, 2004b).

Se a precipitação tem intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando progressiva diminuição da capacidade de infiltração, à medida que o solo está se umedecendo. Se a precipitação continuar a capacidade de infiltração diminui, decrescendo exponencialmente no tempo, tendendo a um valor mínimo de infiltração. A parcela não infiltrada, forma filetes que escoam superficialmente para áreas mais baixas podendo infiltrar. Quando cessa a precipitação e não há mais aporte de água para a superfície do solo a taxa de infiltração real anula-se rapidamente e a capacidade de infiltração volta a crescer, porque o solo continua a perder água para camadas mais profundas e por evapotranspiração” (SILVEIRA, 2004b, pp. 336-337).

Pode haver uma tendência à diminuição da infiltração graças a fatores como o choque da água das chuvas sobre o solo exposto, o tráfego constante de homens ou veículos em áreas de vegetação rasteira porque provocam a compactação do solo, tornando a área relativamente impermeável. Por outro lado, a capacidade de infiltração pode ser elevada pela atuação de escavações feitas por animais e insetos, decomposição das raízes dos vegetais, ação da geada e do Sol, aradura e cultivo da terra, porque provocam o aumento da permeabilidade do solo. A presença de cobertura vegetal também favorece a infiltração uma vez que dificulta o escoamento superficial e devido ao papel do sistema radicular das plantas que retira a umidade do solo aumentando a capacidade de infiltração para o próximo episódio de chuva (MARTINS, 1976a).

5.6.4. Escoamento Superficial

O escoamento é regido por leis físicas e representado quantitativamente por variáveis como vazão, profundidade e velocidade. “O funcionamento do escoamento é descrito por equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento” (TUCCI, 1980, 2004c, p.373).

A aplicação das leis de conservação de massa e quantidade de movimento em um canal permitiu admitir algumas simplificações, adotadas na dedução das equações. As simplificações são as seguintes: fluido incompressível e homogêneo, pressão hidrostática na vertical, aproximação na declividade do fundo, escoamento unidimensional, variação gradual das seções transversais, atrito (TUCCI, 2004c).

Hidrograma é o gráfico que relaciona a vazão no tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia (TUCCI, 2004d).

A forma do hidrograma depende de um grande número de fatores, os mais importantes são: relevo (densidade de drenagem, declividade do rio ou bacia, capacidade de armazenamento e forma); cobertura da bacia (vegetal, tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração. Em bacias urbanas devido à impermeabilização o escoamento superficial e o pico aumentam); modificações artificiais no rio (um reservatório tende a reduzir o pico e distribuir o volume). A canalização tende a aumentar o pico, distribuição, duração e intensidade da precipitação.

Após o início da chuva, existe um intervalo de tempo em que o nível começa a elevar-se. Este tempo retardado de resposta deve-se às perdas iniciais por interceptação vegetal e depressões do solo e do próprio retardo de resposta da bacia devido ao tempo de deslocamento da água. O hidrograma atinge o máximo, de acordo com a distribuição de precipitação, e apresenta a seguir a recessão onde se observa normalmente, um ponto de inflexão, que caracteriza o fim do escoamento superficial e a predominância do escoamento subterrâneo. A contribuição da vazão subterrânea é influenciada pela infiltração na camada superior do solo, sua percolação e conseqüente aumento do nível do aquífero (TUCCI, 2004d, p.391).

Portanto, o hidrograma permite analisar o funcionamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. Por exemplo, pode ser usado para identificação de períodos de vazão baixa e alta, de recarga da água subterrânea. A sua aplicação é muito útil em diversos estudos, como abastecimento de água, aproveitamento hidrelétrico, previsão de enchentes e estiagens entre outros (KARMANN, 2003).

6. Procedimientos Metodológicos

6.1. Levantamento bibliográfico

Para a elaboração do modelo conceitual da BHG foi necessário um levantamento bibliográfico que se iniciou com a leitura de obras visando apreensão de pressupostos da Teoria Geral dos Sistemas e de conceitos inerentes a modelagem hidrológica, bem como a adoção de critérios que possibilitem posicionamento consciencioso sobre as potencialidades e limitações da modelagem. Procurou-se melhor compreensão dos processos hidrológicos envolvidos na modelagem de uma bacia hidrográfica. Também foram selecionados trabalhos que tratam do emprego de modelos hidrológicos, demonstrando a estrutura do modelo, sua aplicação para determinado recorte temporo-espacial e análise de resultados. Esta leitura foi fundamental, pois permitiu, primeiramente, o reconhecimento de uma maior diversidade de modelos e suas variações, pois às vezes são empregadas partes de seus algoritmos, às vezes são associados mais de um modelo para a solução de um problema. Também favoreceu relativa familiarização com a linguagem matemática, verificação de similaridades e diferenças em relação a nossa pesquisa, o que traz possibilidades de encaminhamento do projeto. Houve destaque para a modelagem hidrológica em meio urbano. Foram selecionados trabalhos que oferecem informações sobre BHG e RMSP, principalmente aspectos do meio físico com destaque para caracterização das suas condições hidrológicas e uso e ocupação da terra.

6.2. Modelagem da BHG

Christofolletti (1999) listou alguns itens que denominou de *instrumentos básicos para a construção de modelos* que são: raciocínio lógico, modelos escalares e outros análogos, formulações matemáticas, análise de sistemas e simulação por computador. O autor apresentou um *procedimento guia para a construção de modelos*, formado pelas seguintes etapas: objetivos, hipóteses, formulação matemática, verificação, calibragem, análise e avaliação do modelo. Considerando esta concepção, optou-se por modificações que resultaram no roteiro descrito a seguir.

6.2.1. Representação gráfica do modelo

A primeira exigência foi a definição do sistema hidrológico a ser modelado. Assim foi necessária a determinação dos limites da bacia hidrográfica, realizada com base em documentos cartográficos. Consequentemente foi estabelecida a relação

com o universo no qual o sistema está contido e a identificação de entradas e saídas.

A modelagem do ciclo da água na BHG difere do ciclo hidrológico global, considerado como um modelo conceitual de larga escala (MORE, 1975), porque incorpora características específicas da área de estudo.

Procurou-se reconhecer o problema hidrológico analisado (relação chuvas/abastecimento) nos termos da teoria geral do sistema, sendo redefinido como: a relação entre a entrada de água no sistema via precipitação e sua saída via adução de água para tratamento.

A compreensão da abrangência do problema envolveu pesquisa sobre aspectos naturais e de uso e ocupação da terra da BHG e sobre o sistema produtor de água Guarapiranga. Assim identificou-se um conjunto de particularidades que influenciam nos fluxos e armazenagens de água da bacia hidrográfica, diferenciando a área do ponto de vista da dinâmica hidrológica. É uma bacia com diversidade de usos da terra, com áreas intensamente urbanizadas, áreas de transição com uso urbano e rural e apresenta remanescentes de Mata Atlântica. Além disso, há um conjunto de obras hidráulicas implantadas visando múltiplos usos da água: geração de hidroeletricidade, o abastecimento de água.

As atividades nesta etapa se constituíram de pesquisas bibliográficas (item 6.1), levantamento e análise de material cartográfico, observações diretas em trechos da BHG e entrevistas com funcionários da SABESP e da EMAE. Buscou-se melhor compreensão da bacia hidrográfica como um sistema e dos processos hidrológicos.

A estruturação do modelo consistiu na definição de elementos, hierarquias, organização dos fluxos hídricos e armazenagens do modelo.

A estrutura do modelo representa o arcabouço natural dos sistemas onde ocorrem relações entre os componentes físicos organizados hierarquicamente, em função da captação, circulação e liberação de energia. Expressa uma *hierarquia estrutural*, relacionada às unidades físicas do sistema, que podem ser decompostas em subunidades. E, uma *hierarquia funcional*, associada à ordem existente nos processos e transporte (MENDIONDO e TUCCI, 1997a).

Os elementos de um sistema podem ser compreendidos como subsistemas, cada qual apresentando entradas e saídas que são reguladas por atributos espaciais que controlam os fluxos hídricos.

Inicialmente a bacia hidrográfica foi considerada como uma caixa preta que recebe e libera fluxos de matéria e energia, assim foram estabelecidas as relações da bacia com o seu universo. Os fluxos de entradas e saídas determinados nesta fase foram: precipitação, troca de água tratada entre os sistemas de abastecimento de água, adução de água de outras bacias, e saídas são a evapotranspiração, esgotos, vazão para o Rio Pinheiros e adução de água da represa para tratamento na Estação de Tratamento Alto da Boa Vista.

Num momento posterior passou-se ao detalhamento da mencionada caixa preta, com a indicação dos fluxos hídricos que circulam internamente na bacia à partir de sua representação no fluxograma. Estes fluxos se desenvolvem basicamente, através dos processos de escoamentos, infiltração e aduções de água. Também foram definidos e representados no fluxograma os reguladores de fluxos hídricos, que são responsáveis por distribuir em proporções os volumes de água que seguirão por caminhos distintos.

A estruturação do modelo realizou-se por intermédio da elaboração de um fluxograma definido por figuras geométricas sugeridas por Christofletti (1979) para a representação de modelos em seqüência. As figuras representam três componentes básicos do modelo: os fluxos hídricos, as armazenagens e os reguladores de fluxos. Às figuras que indicam o sentido do fluxo hídrico (setas) foram associadas siglas formadas por letras que compõem os nomes dos fluxos. O papel desempenhado no modelo pelos símbolos e setas é descrito em uma legenda.

O desenvolvimento do fluxograma foi realizado concomitantemente à pesquisa bibliográfica e levantamentos sobre o universo e área de estudo. Passou por constante reconstrução e avaliação, que não foi feita de forma conclusiva, mas propositiva. Desta forma, o fluxograma evoluiu paulatinamente, conforme sugestões e “pistas” fornecidas pelo orientador.

6.2.2. Representação matemática do modelo

Outra possibilidade de representação de um modelo é feita por intermédio da linguagem matemática. Usando equações matemáticas é possível expressar as hipóteses formuladas na concepção do modelo. A elaboração de enunciados matemáticos é uma tarefa complexa e por este motivo constitui uma etapa diferenciada nesta pesquisa sendo diretamente dependente da finalização do fluxograma.

Os modelos matemáticos representam o sistema hidrológico por uma série de equações que podem ser resolvidas para proporcionar a quantificação do funcionamento do sistema. Freeze (1978 apud WATTS, 1996) define o processo de modelagem matemática como formada de três estágios:

- (a) A substituição do problema do mundo real por um problema matemático equivalente;
- (b) A solução de problema matemático;
- (c) A interpretação dos resultados da solução à luz do sistema do mundo real.

Nesta pesquisa admite-se como equação básica, a equação da continuidade, baseada na conservação de massa (TUCCI, 1980). A equação expressa o balanço hídrico, que pode ser aplicado neste caso como parte de um modelo para investigar as relações entre variação climática e estoque de água na Represa Guarapiranga tendo em vista analisar até que ponto tais relações interferem no planejamento do abastecimento de água da Grande São Paulo. Como qualquer modelo, o balanço hídrico, envolve simplificações e suposições. Por exemplo, negligencia-se que as variações dos fluxos de vazão podem sofrer influências de alterações no uso da terra da bacia hidrográfica.

Entretanto apesar de envolver simplificações quanto aos fluxos de água e seus controles, o balanço hídrico permite a manipulação de dados referentes a importantes fluxos identificados em relação à represa. Tais entradas e saídas podem ser obtidas por técnicas de mensuração ou podem ser deduzidas por meio de raciocínio matemático.

O raciocínio básico é admitir a equação da continuidade como equação geral e prosseguir ao detalhamento de cada uma das suas variáveis usando a dedução a partir do fluxograma.

Para o desenvolvimento desta etapa foi necessário o conhecimento dos fluxos efetivamente monitorados. Assim, procedeu-se à definição da resolução temporal e espacial do modelo e, finalmente, formulação de um sistema de equações¹⁸.

¹⁸ Para uma rápida visualização organizou-se uma lista com todas as equações presentes na formulação do modelo numérico (anexo 10.1).

7. O Ciclo Hidrológico na Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga: modelo conceitual

7.1. O Modelo Conceitual

Trata-se de um modelo conceitual que pode ser considerado como um modelo precipitação-vazão. Segundo Tucci (1998, p.227) *“estes modelos devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio”*.

Basicamente, o modelo representa os diferentes fluxos e armazenagens de água que ocorrem entre a precipitação na BHG e a adução de água na Represa Guarapiranga, tendo em vista a análise da relação chuvas-abastecimento público de água.

A circulação da água na BHG ocorre de acordo com a diversidade de características de cobertura do solo, propriedades hidrológicas dos materiais de superfície e subsuperfície, disponibilidade e tipos de uso da água e condições de várias armazenagens para o intervalo de tempo em que o modelo é introduzido.

Estes aspectos são importantes porque orientam a compartimentação das superfícies da bacia hidrográfica, definem os fluxos e armazenagens e são usados na especificação dos parâmetros e no sequenciamento de cálculos do modelo matemático.

O modelo conceitual é representado pelo diagrama de fluxos hídricos da BHG (anexo 10.2) e os componentes hidrológicos estão representados na tabela do anexo 10.3, que apresenta o detalhamento das informações que constam no fluxograma, relacionando as respectivas fontes e unidades de medida.

7.2. Níveis de observação

No fluxograma a representação do limite da bacia hidrográfica permite identificar rapidamente dois níveis de observação: o primeiro é definido pelos limites da própria BHG e o dado pela relação da bacia e seu exterior.

No nível em que se estabelecem as relações da bacia com o exterior pode-se considerar a entrada de água da chuva, por exemplo, ou as saídas por evaporação. Estes são processos que somente ocorrem graças às diversas interações da bacia hidrográfica com a atmosfera.

No segundo nível é que ocorrem os diversos fluxos de água na bacia hidrográfica possibilitando a troca entre os diferentes subsistemas constituintes. Neste nível é possível identificar e analisar as relações que ocorrem no interior da bacia hidrográfica porque é onde se observam os fluxos da água nas áreas de

contribuição, no solo, nos canais fluviais, nos sistemas de tratamento e abastecimento de água e entre eles.

É neste nível que se observam as entradas e saídas de água da represa. Há uma grande variedade de fluxos de água que partem de diferentes pontos da bacia em direção à represa e outros que a partir dela se direcionam para diversos caminhos. Isto é, a represa expressa as interações entre a bacia hidrográfica com o exterior e as que ocorrem no interior da unidade de análise o que é demonstrado por dados de quantidade e qualidade de água.

A represa é tratada como centro do sistema porque o objetivo é ter controle sobre a variação deste estoque de água para verificar se a alegação de ausência de chuvas como causa de diminuição do volume de água da represa procede. Por isso também que o verdadeiro ponto de partida foi determinar um ponto no curso de água – barragem – para determinar a bacia à sua montante.

Vários níveis de organização ainda poderiam ser inferidos, mas é com base nos objetivos da pesquisa que é determinada a relação interativa das escalas superiores com as inferiores a ser considerada. Ainda que a ênfase seja colocada no estudo dos processos no interior da bacia, os resultados dependem da interpretação voltada para o inter-relacionamento de ambas as escalas de análise.

7.3. O balanço hídrico elementar da represa¹⁹

O problema dado pela relação precipitação-abastecimento, nos termos da Teoria Geral dos Sistemas pode ser descrito em sua forma mais elementar possível pela entrada de água no reservatório via precipitação e saída via adução de água bruta para abastecimento.

No entanto, apoiando-se do princípio da conservação de massa, a relação precipitação-abastecimento também pode ser expressa pelo balanço hidrológico enunciado aqui inicialmente pela seguinte equação geral:

$$G_{(x+1)} = G_{(x)} + E_{(x)} - S_{(x)} \quad (1)$$

Onde:

$G_{(x+1)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia seguinte ao dia x em m³

¹⁹ Nota do Orientador. Considerar daqui adiante que não está disponível ao formado em Geografia o ferramental oferecido pelo Cálculo Diferencial. Dada a natureza do próprio objeto e do problema em foco, a aluna foi orientada de forma a explorar a formação matemática presumida normal até o final do bacharelado em Geografia.

$G_{(x)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia x em m^3

$E_{(x)}$ = entrada de água na Represa Guarapiranga no dia x em m^3

$S_{(x)}$ = saída de água na Represa Guarapiranga no dia x em m^3

7.4. O Modelo

7.4.1. O detalhamento do balanço da Represa Guarapiranga

A equação do balanço hidrológico pode ser considerada como equação fundamental para análise do problema mencionado por alguns motivos. Primeiro porque permite tratar a represa como centro do modelo realizando neste estoque o balanço hidrológico. Outro motivo é que as diversas entradas e saídas de água da represa são passíveis de serem detalhadas diretamente a partir da equação 1.

Além da precipitação direta sobre a área da represa, ao menos a vazão dos principais rios contribuintes do reservatório tem de ser considerada. Apesar de apresentar variações sazonais e contribuir com menor volume de água nos períodos com ausência de chuva, este segundo fluxo de entrada está continuamente alimentando a represa.

Além da adução de água bruta, há outras duas saídas que devem ser consideradas inicialmente: a evaporação do espelho d'água e a eventual descarga de água da represa no rio Pinheiros visando controle de enchentes. Com estes componentes a equação 1 pode ser reescrita assim:

$$G_{(x+1)} = G_{(x)} + (P_r + q) - (E_{vg} + A_{bg} + Q_g) \quad (2)$$

Onde:

$G_{(x+1)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia seguinte ao dia x em m^3

$G_{(x)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia x em m^3

P_r = precipitação na área da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

q = escoamento fluvial dos contribuintes da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

E_{vg} = evaporação da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

A_{bg} = adução de água bruta da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

Q_g = escoamento da Represa Guarapiranga para Rio Pinheiros em m^3 /dia

Mas como o balanço hidrológico na represa considera, ao menos conceitualmente, outros fluxos hídricos que ocorrem na BHG a equação 2 pode ser reescrita pela incorporação de novos termos que serão detalhados posteriormente:

$$G_{(x+1)} = G_{(x)} + q + P_r + E_{gg} + E_{rg} + E_{fg} - A_{bg} - E_{vg} - Q_g \quad (3)$$

Onde,

$G_{(x+1)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia seguinte ao dia x em m³

$G_{(x)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia x em m³

q = escoamento fluvial

P_r = precipitação na área da Represa Guarapiranga

E_{gg} = escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga, em m³/dia

E_{rg} = escoamento superficial para a Represa Guarapiranga, em m³/dia

E_{fg} = escoamento de efluentes não tratados para a Represa Guarapiranga, em m³/dia

A_{bg} = adução de água da Represa Guarapiranga para ETA ABV

E_{vg} = evaporação da Represa Guarapiranga

Q_g = escoamento da Represa Guarapiranga para Rio Pinheiros

A variação do volume de água Represa Guarapiranga em dado dia pode ser obtida pelo simples rearranjo da equação 2:

$$\Delta G_{(x)} = G_{(x+1)} - G_{(x)} = (P_r + Q) - (E_{vg} + A_{bg} + Q_g) \quad (4)$$

Onde,

$\Delta G_{(x)}$ = variação do volume da represa em m³/dia

$G_{(x+1)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia seguinte ao dia x em m³

$G_{(x)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia x em m³

P_r = precipitação na área da Represa Guarapiranga em m³/dia

Q = vazão dos contribuintes da Represa Guarapiranga em m³/dia

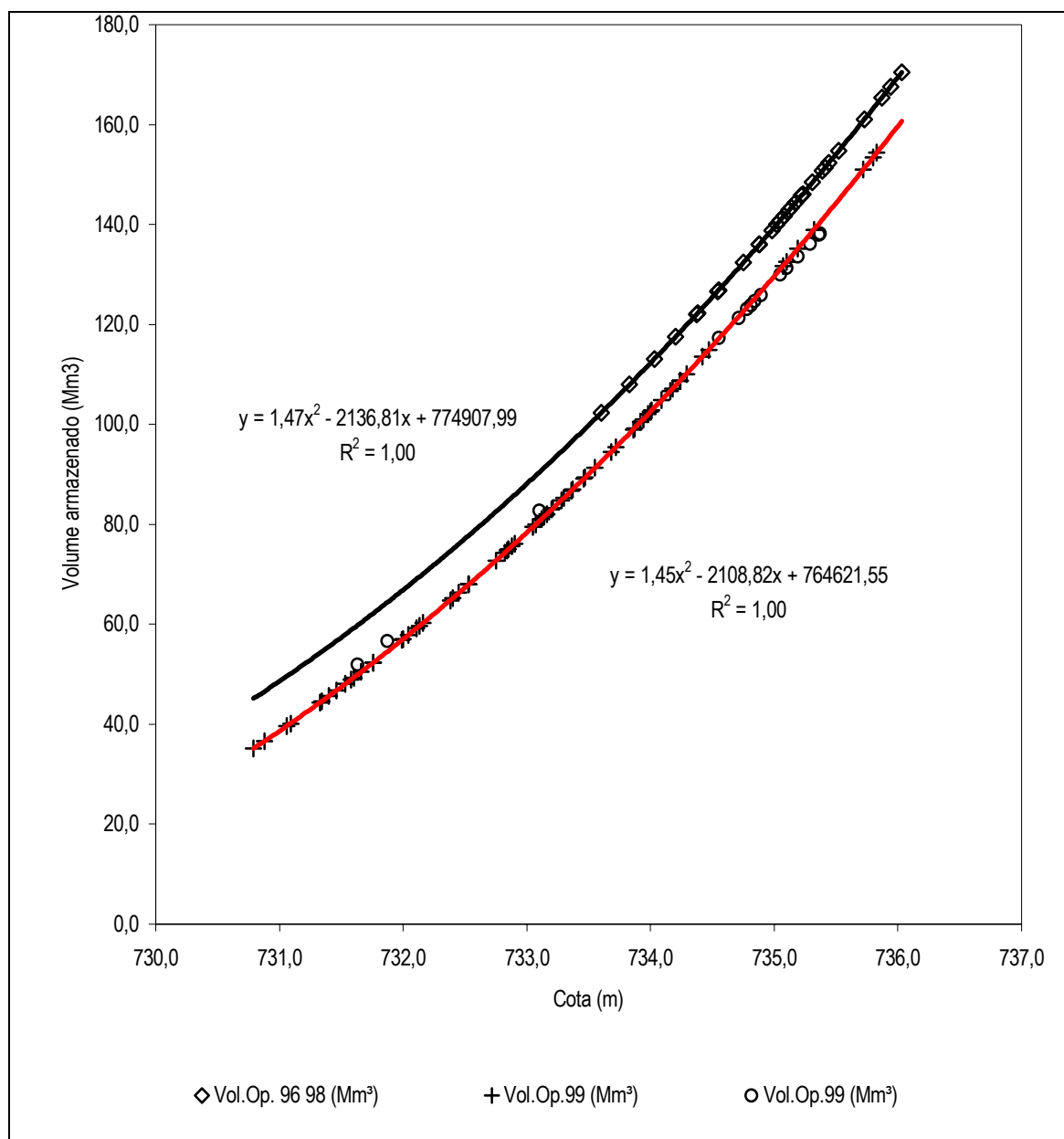
E_{vg} = evaporação da Represa Guarapiranga em m³/dia

A_{bg} = adução de água bruta da Represa Guarapiranga em m³/dia

Q_g = escoamento da Represa Guarapiranga para Rio Pinheiros em m³/dia

Outra maneira para se obter o volume de água estocado na Represa Guarapiranga é definida pela relação entre o nível medido em m e respectivo volume. Dados fornecidos pela EMAE permitiram estabelecer a curva cota x volume da Represa Guarapiranga representada na figura 20.

Figura 20. Curva cota X volume da Represa Guarapiranga



Organizado por Tarik Rezende Azevedo. Fonte: EMAE.

A curva representada por preto refere-se ao período compreendido entre agosto de 1996 a dezembro de 1998 e a curva em vermelho ao período de janeiro de 1999 a setembro de 2004. A diferença entre as duas curvas pode ser justificada pelo desenvolvimento de deposição de sedimentos no leito da represa. Silva (2005)

empregou técnicas de sensoriamento remoto e mapeamento e apresentou evidências do impacto da urbanização sobre a sedimentação em dois braços da Represa Guarapiranga.

Observa-se que a curva obtida para o segundo período é mais conservativa uma vez que para o mesmo nível relaciona-se um menor volume de água estocada. Esta consideração pode ser admitida como premissa para operação técnica do reservatório quanto às atividades de adução de água para abastecimento. A curva referida representa a seguinte equação de regressão que permite estimar o volume armazenado diretamente em função do nível:

$$G = (1,45n^2 - 2108,82n + 764621,55) * 10^6 \quad (5)$$

Onde,

G = volume de água na Represa Guarapiranga em m³

n = nível de água na Represa Guarapiranga

Da equação 5 obtêm-se o seguinte coeficiente de correlação $R^2 = 1,00$ o que significa que há uma relação perfeita entre as variáveis.

7.4.2. Tempo de integração do modelo

Considerando o objetivo da pesquisa e a natureza dos registros disponíveis, o modelo foi pensado para uma resolução temporal diária.

Lana (2000) determinou o tempo de percurso superficial da água livre na área da Bacia da Represa Guarapiranga até a represa (figura 21). A autora obteve 18 isócronas de 1 km de distância uma da outra, adotando o tempo máximo de trânsito da água em cada faixa igual a 1 hora. Deste modo, admite-se que em 24 horas toda a água superficial livre a ser escoada já chegou até a represa.

Daqui adiante, convencionou-se o tempo (x) como a ordenada geral do sistema em passos unitários de um dia, considerado de 7:00 h da manhã do dia anterior até as 7:00 h da manhã do dia, uma vez que é neste horário em que são feitas as leituras dos instrumentos e o registro dos dados pluviométricos e fluviométricos. Sendo assim, para simplificar a notação, foi suprimida a referência explícita ao vetor tempo nas variáveis, a não ser quando necessário. A equação 1 pode então ser representada simplesmente por:

$$G_{(x+1)} = G_{(x)} + E - S \quad (6)$$

Onde,

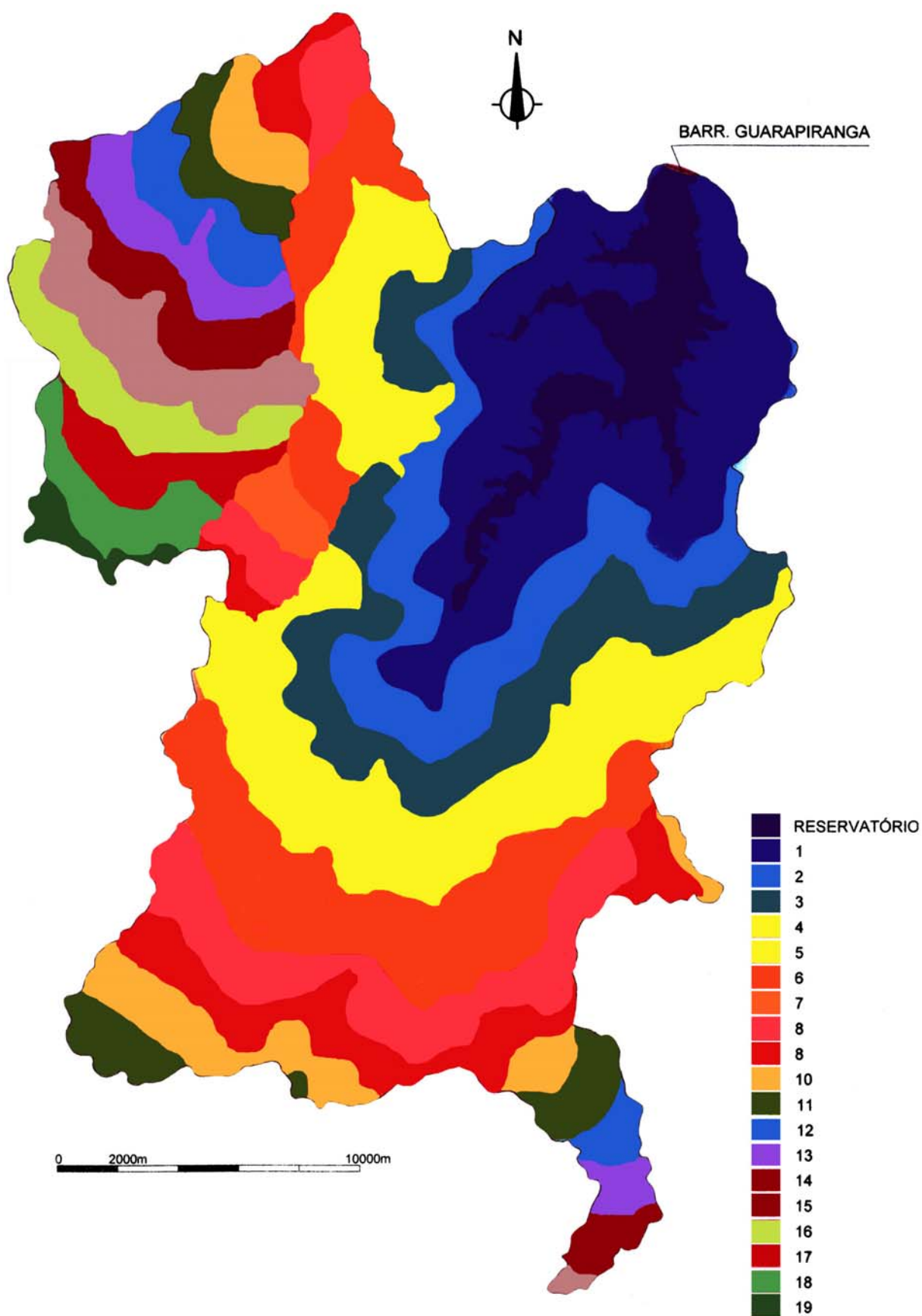
$G_{(x+1)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia seguinte ao dia x em m³

$G_{(x)}$ = volume de água na Represa Guarapiranga no dia x em m³

E = entradas de água na Represa Guarapiranga

S = saídas de água na Represa Guarapiranga

Figura 21. Mapa de Isócronas



Fonte: LANA (2000).

7.4.3. Discretização das superfícies da BHG

Conforme mapeamento realizado pelo Projeto Guarapiranga (2000) a área da BHG (A_{rg}) é 613132962,81 m² (613,13 km²). O modelo considera a discretização de A_{rg} em dois tipos de superfícies: as superfícies líquidas, e as denominadas áreas de contribuição (A_c). As superfícies líquidas referem-se aos canais fluviais tributários da Represa Guarapiranga e à própria Represa Guarapiranga. A área dos tributários da Represa Guarapiranga (A_t) é considerada desprezível. A área da Represa Guarapiranga (A_r) representada no referido mapeamento é 26216788,93 m². Entretanto, sabe-se que esta é uma variável que depende fundamentalmente do volume estocado sendo obtida a partir de tabela fornecida pelo EMAE em função do nível diário.

A área de contribuição (A_c) foi subdividida em área vegetada (A_v) e área não vegetada (A_{nv}), obtidas inicialmente por planimetria em ambiente SIG a partir das classes de uso da terra do mapa do Projeto Guarapiranga (2000). Sendo $A_v = 524234052,48$ m² e $A_{nv} = 94881214,73$ m².

A razão entre A_v e A_{nv} foi presumida constante, embora, a rigor, A_c dependa inversamente da variação de A_t e A_r . Assim:

$$A_v / A_{nv} = 5,52516 \quad (7)$$

Onde,

A_v = área vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga

A_{nv} = área não vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga

$$A_c = A_v + A_{nv} \quad (8)$$

Onde,

A_c = área de contribuição da Represa Guarapiranga

A_v = área vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga

A_{nv} = área não vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga

A_{nv} foi subdividida em cinco grupos que abrangem diferentes classes de uso da terra. Os critérios para agrupamento são densidade de edificações e características da pavimentação das ruas conforme as zonas apresentadas na figura 22. O zoneamento da figura 22 refere-se aos valores do coeficiente de escoamento

(C) adaptados do critério de Fruhling e usados pela Prefeitura de São Paulo (PRUSKI et al, 2004).

Usando o mapeamento do Programa Guarapiranga (2000) e a tabela apresentada por Pruski (2004), obteve-se um conjunto formado por seis classes de permeabilidade da BHG. A cada uma das classes foi associado um valor para C estabelecido pela média dos valores sugeridos na tabela mencionada. Em ambiente SIG calculou-se a área de cada uma delas. A classificação e respectivos valores de C também constam na figura 22.

Figura 22. Classes de permeabilidade da BHG.

Zonas	C ²⁰	Classes de permeabilidade da BHG	Valor adotado	Área (em m ²)	
Edificações muito densas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 – 0,95	Alto padrão, alta densidade; área comercial e industrial; baixo padrão, alta densidade; habitação subnormal; médio padrão, alta densidade (Fotos 1 a 3, anexo 10.4)	6	0,825	34480564,16
Edificações não muito densas: área adjacente ao centro, de menor densidade de habitantes, porém com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 – 0,70	Alto padrão, baixa densidade; Área vaga em área urbana; baixo padrão, média densidade	5	0,650	21627200,92
Edificações com poucas superfícies livres: áreas residenciais com construções cerradas e ruas pavimentadas	0,50 – 0,60	Academia; escola de esportes; baixo padrão, média densidade; clínica de tratamento e repouso; delegacia de polícia; escola; garagem de ônibus; hospital; indústria; outros equipamentos; posto de combustível; posto de saúde; pronto socorro; quartel de corpo de bombeiros (Foto 4, anexo 10.4)	4	0,550	15054196,28
Edificações com muitas superfícies livres: áreas residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,25 – 0,50	Alto padrão, média densidade; condomínio vertical habitacional; médio padrão, baixa densidade; motel; olaria; subestação (Foto 5 a 7, anexo 10.4)	3	0,375	8773250,79
Subúrbios com pequena densidade de construção	0,10 – 0,25	Baixo padrão, baixa densidade; creche; criação de aves e suínos; marina; disposição de resíduos	2	0,175	17946002,66
Matas, parques e campo de esportes: áreas rurais, verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados e campos de esporte sem pavimentação	0,05 – 0,20	Campo, campo de futebol; capoeira; capoeirão; cemitério; chácara isolada e de subsistência; clube; cultura perene; temporária; haras; horticultura; loteamento de chácaras; mata; movimento de terra; praça; reflorestamento; loteamento desocupado; mineração abandonada; mineração ativa (Fotos 8 a 13, anexo 10.4)	1	0,125	524234052,48

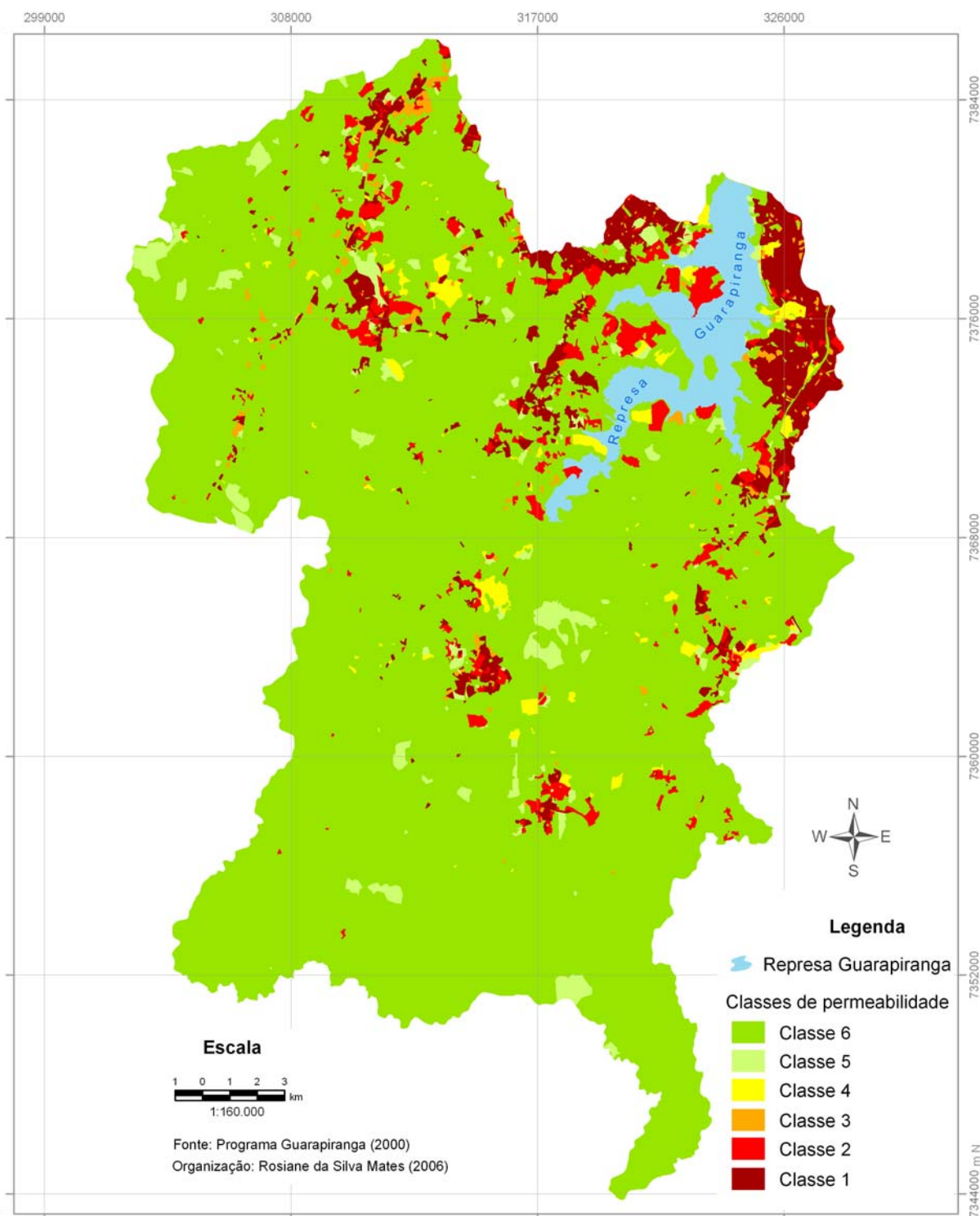
Fonte: Pruski (2004) e Programa Guarapiranga (2000). Adaptada e organizada por Rosiane da Silva Mateus (2006)

Devido à incompatibilidade entre algumas categorias procedeu-se ao trabalho de campo visando reconhecimento e controle da classificação adotada. A associação de técnicas de sensoriamento remoto a produtos gerados em ambiente SIG pode fornecer um mapeamento de classes de permeabilidade conforme o trabalho realizado por Tsukada (2006). Entretanto, o que se pretende é verificar a possibilidade de usar documentos cartográficos já existentes verificando sua

²⁰ Valores de C, segundo adaptação do critério de Fruhling, adotados pela Prefeitura de São Paulo (Wilken, 1978 apud PRUSKI et al, 2004)

potencialidade como insumo para oferecer informações sobre escoamento e infiltração da área sob estudo.

Figura 23. Mapeamento das classes de permeabilidade da BHG



7.5. Os Termos do Balanço

7.5.1. A precipitação (termo P)

AZEVEDO (2001) demonstrou que a densidade de postos pluviométricos no Estado de São Paulo não é uniforme, e que apesar de ocorrer maior adensamento na RMSP há poucos postos distribuídos em suas bacias hidrográficas havendo prejuízos em estudos de caso e planejamento em pequenas bacias, entretanto as evidências da existência do clima urbano justificariam o adensamento de postos pluviométricos em áreas urbanas e sua periferia imediata.

Admitindo a argumentação exposta buscou-se a identificação de postos de monitoramento existentes na BHG e no seu entorno. Obteve-se um total de 25 postos representados no mapa da figura 24. Verificou-se que entre estes postos há variação entre os períodos de funcionamento diminuindo consideravelmente as séries históricas aceitáveis para aplicação do modelo.

7.5.1.1. Estimativa do volume precipitado diariamente

Para obtenção de dados pluviométricos recorreu-se à rede pluviométrica oficial do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo e da rede de monitoramento da SABESP. Procurou-se o maior número possível de postos tendo em vista a melhor representação possível da variabilidade espacial da chuva com resolução diária. Foi adotada a série histórica que compreende o período 01/08/96 – 31/07/2005, pois este é o período que dispõe de maior volume de dados para a simulação do modelo.

A altura do total precipitado $P_{(u)}$ em cada posto (u) é obtida por registro instrumental e expresso em m/dia. Estabeleceu-se a área representada por cada posto ($A_{(u)}$) por intermédio do método de Thiessen, que estabelece polígonos nos quais se admite a influência de postos pluviométricos adjacentes (HOLTZ, 1976). Os polígonos de Thiessen e os postos respectivos estão representados na figura 24.

Aplicando o método de Thiessen, a estimativa do volume total precipitado diariamente na BHG (P) é expresso por:

$$P = \sum (A_{(u)} * P_{(u)}) \quad (9)$$

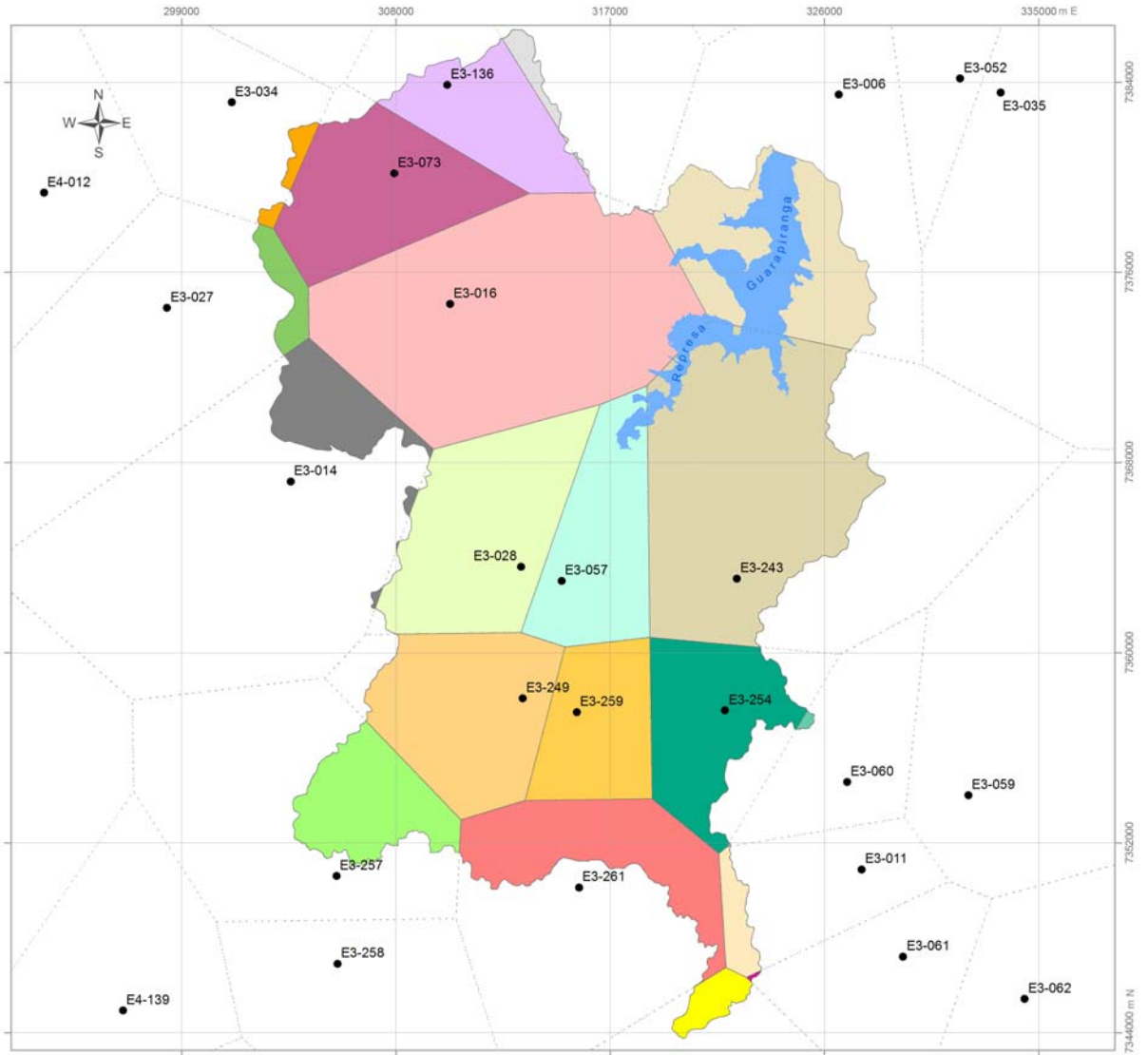
Onde,

P = precipitação na Bacia da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

$A_{(u)}$ = área representada pelo posto u , em m^2

$P_{(u)}$ = precipitação no posto u , em m/dia

Figura 24. Polígonos de Thiessen



Desenho: Nabil Alamedine

A opção pelo método de Thiessen justifica-se pela simplicidade de seu uso e principalmente porque apresenta a vantagem de maior controle quando da introdução de novo posto, ou, ao contrário, da subtração. Assim, não resultaria em prejuízo para o modelo, pois há interferência apenas no polígono de abrangência do posto.

7.5.1.2. Distribuição espacial da chuva

O modelo introduz dois controladores de fluxos que operam a distribuição da precipitação em proporções de água que seguem fluxos distintos. A precipitação (P) é controlada pelo primeiro distribuidor de precipitação (D_{pa}), expresso por:

$$D_{pa} = A_c / A_g \quad (10)$$

Onde,

D_{pa} = distribuidor de precipitação a

A_c = área de contribuição da Represa Guarapiranga, em m^2

A_g = área da Bacia da Represa Guarapiranga, em m^2

D_{pa} é um controlador adimensional que determina a componente P_c que é precipitação sobre A_c . É variável em função da componente A_c , que é definida também pela equação 11:

$$A_c = A_g - A_t - A_r \quad (11)$$

Onde,

A_c = área de contribuição da Represa Guarapiranga, em m^2

A_g = área da Bacia da Represa Guarapiranga, em m^2

A_t = área dos tributários da Represa Guarapiranga, em m^2

A_r = área da Represa Guarapiranga, em m^2

O segundo controlador (D_{pb}) define a proporção de chuva que precipita sobre os canais fluviais tributários da represa (P_q), e sobre a área da represa (P_r). Este controlador adimensional é expresso por:

$$D_{pb} = A_t / A_r \quad (12)$$

Onde,

D_{pb} = distribuidor de precipitação b

A_t = área dos tributários da Represa Guarapiranga, em m^2

A_r = área da Represa Guarapiranga, em m^2

7.5.2. A circulação de água na área de contribuição

7.5.2.1. Simplificações da circulação hídrica em A_c

A circulação de água na área de contribuição é complexa devido à diversidade de suas características morfológicas e de seus materiais, bem como pelo dinamismo dos processos hidrológicos no tempo. O fluxograma anexo representa tais aspectos, contudo, a manipulação destas relações enfrenta limitações normalmente relacionadas à impossibilidade de se obter todas as informações necessárias à simulação completa do modelo conceitual. Assim, algumas simplificações são necessárias.

Como a água interceptada por vegetação ou retida superficialmente evapora ou infiltra, representa perda de água do sistema. Em estudos voltados para a simulação de cheias observa-se que ocorre redução da vazão média e abatimento dos picos de enchente (TUCCI, 2004b). Para o caso desta pesquisa admite-se diminuição do volume de água disponível para abastecimento público, também representando perda do sistema.

Mohamoud et al 1997 apud Pruski, 2001 observam que as variáveis precipitação e escoamento superficial são facilmente mensuráveis, não acontecendo o mesmo com a infiltração e o armazenamento superficial.

Conforme se observou na literatura, a aplicação de modelos hidrológicos em estudos em cidades normalmente estão voltados para a compreensão, simulação e previsão de enchentes. Assim os dados de escoamento se tornam mais relevantes na maioria destes modelos. Por outro lado, estudos que têm o objetivo de investigar a erosão, ou balanço hídrico em áreas cultiváveis, ou ainda aplicação de métodos de irrigação há uma necessidade maior das informações de infiltração.

DAEE e CETESB (1980) sugerem uma tabela (figura 1) como guia para se avaliar as perdas por armazenamento em depressões e por retenção, que incluem a água interceptada pela vegetação. Entretanto, as categorias adotadas para classificação das superfícies são incompatíveis com aquelas da tabela da figura 22.

Já que se admitiu que tanto os escoamentos em galerias como os superficiais atingem a Represa Guarapiranga em até 24 horas, admite-se também que a separação destes fluxos hídricos em diferentes caminhos é indiferente.

Portanto, partindo de uma simplificação da circulação hídrica em A_c para infiltração, perdas por interceptação e armazenamento superficial, escoamentos em galerias pluviais e escoamento superficial será adotado o coeficiente C citado por Pruski (2004).

Pruski (2004) explica que o volume escoado representa uma parcela do volume precipitado e a relação entre os dois é denominada coeficiente de escoamento definido por:

$$C = ES / PT \quad (13)$$

Onde,

C = coeficiente de escoamento

ES = lâmina de escoamento superficial

PT = volume total precipitado

Os valores de C presentes na figura 22 devem ser multiplicados pela área da respectiva classe de permeabilidade e assim é obtido o valor de escoamento que atinge a represa.

Sabendo-se que C é coeficiente adimensional cujo valor está entre 0,00 – 1,00 supõe-se que a diferença entre C e 1,00 determina o controlador F definido como coeficiente de infiltração. Logo,

$$F = 1,00 - C \quad (14)$$

Onde,

F = coeficiente de infiltração

C = coeficiente de escoamento

Aplicando-se a equação 14 aos valores apresentados na figura 22, são obtidos os valores de F na figura 25:

O detalhamento de cada termo simplificado é apresentado a seguir para explicitar as potencialidades e limitações do modelo numérico quanto à explicação e

simulação diante da complexidade da circulação hídrica nesta etapa da fase terrestre do ciclo hidrológico.

Figura 25. Coeficientes de infiltração na BHG

Classe	Valor de F
Alto padrão, alta densidade; área comercial e industrial; baixo padrão, alta densidade; habitação subnormal; médio padrão, alta densidade	0,175
Alto padrão, baixa densidade; Área vaga em área urbana; baixo padrão, média densidade	0,35
Academia; escola de esportes; baixo padrão, média densidade; clínica de tratamento e repouso; delegacia de polícia; escola; garagem de ônibus; hospital; indústria; outros equipamentos; posto de combustível; posto de saúde; pronto socorro; quartel de corpo de bombeiros	0,45
Alto padrão, média densidade; condomínio vertical habitacional; médio padrão, baixa densidade; motel; olaria; subestação	0,625
Baixo padrão, baixa densidade; creche; criação de aves e suínos; marina; disposição de resíduos	0,85
Campo, campo de futebol; capoeira; capoeirão; cemitério; chácara isolada e de subsistência; clube; cultura perene; temporária; haras; horticultura; loteamento de chácaras; mata; movimento de terra; praça; reflorestamento; loteamento desocupado; mineração abandonada; mineração ativa	0,875

Organizada por Rosiane da Silva Mateus (2006)

7.5.2.2. Interceptação vegetal

P_{ac} é regulada pelo controlador interceptação vegetal (I_v), definindo a proporção de A_c que apresenta qualquer tipo de cobertura vegetal que possa interceptá-la e gerar novos fluxos de água. É expresso por:

$$I_v = A_v / A_c \quad (15)$$

Onde,

I_v = interceptação vegetal

A_v = área vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga, em m^2

A_c = área de contribuição da Represa Guarapiranga em m^2

I_v é um controlador adimensional variável em função de A_v e A_c e cujo valor resultante será multiplicado pelo total precipitado indicado pelo polígono de Thiessen.

A precipitação na área vegetada da área de contribuição (P_v) é interceptada por folhas, galhos e troncos, gerando estoque de água na vegetação (V) que também é formada pela água que compõe a estrutura dos vegetais e é usada em seus processos vitais. A água é armazenada nestas superfícies de onde evapora. Este fluxo de água somado ao fluxo eliminado pela transpiração dos vegetais, forma a componente de saída evapotranspiração (E_{vp}).

A parcela que excede a capacidade de armazenagem da vegetação ou por ação dos ventos percola por folhas, galhos e troncos, formando a componente P_{vf} , que é a precipitação na área vegetada de A_c , ou seja, é a parcela da chuva que efetivamente atinge a superfície.

$$V_{(x)} = V_{(x-1)} + P_v + F_r - P_{vf} - E_{vp} \quad (16)$$

Onde,

$V_{(x)}$ = estoque na vegetação no dia x , em m^3

$V_{(x-1)}$ = estoque na vegetação no dia seguinte ao dia x , em m^3

P_v = precipitação na área vegetada da área de contribuição, em m^3

F_r = fluxo de absorção radicular na área vegetada, em m^2

P_{vf} = precipitação final na área vegetada, em m^3

E_{vp} = evapotranspiração da vegetação na área vegetada, em m^3

7.5.2.3. Capacidade de infiltração

O controlador capacidade de infiltração (F) expõe a relação entre os subsistemas área de contribuição, água subterrânea e drenagem urbana.

A capacidade de infiltração (F) se refere à taxa máxima pela qual a superfície pode absorver a água (Christofolletti, 1979, p.47). Conforme exposto, F é considerado constante apesar de ser variável e depender de um conjunto de fatores intervenientes (item 5.6.3).

F atua sobre as componentes de precipitação na área não vegetada da área de contribuição (P_{nv}) e na área vegetada da área de contribuição (P_v) e fluxo de vazamento da rede de distribuição em superfície (V_z). Separa este volume em duas proporções: uma que permanece na superfície sob influência de outros reguladores de fluxos e outra que infiltra e constitui a água subterrânea.

7.5.2.4. Retenção superficial

A água que ultrapassar a capacidade de infiltração (F) forma um volume de escoamento bruto (E_b) que é regido pelo controlador capacidade de retenção superficial (R). Define a proporção de água que fica retida nas irregularidades da superfície, tais como depressões, pontes, construções, telhados, estradas.

A água retida pelas irregularidades superficiais se torna estoque retido em superfície (R_s), até ser evaporada (E_{vr}). É variável, e segundo o modelo, o estoque retido em superfície (R_r) pode ser expresso pela equação:

$$R_{r(x)} = R_{(x-1)} + R_s - E_{vr} \quad (17)$$

Onde,

$R_{r(x)}$ = estoque em superfície no dia x , em m^3

$R_{(x-1)}$ = estoque em superfície no dia seguinte ao dia x , em m^3

R_s = fluxo de retenção superficial, em m^3 /dia

E_{vr} = evaporação da retenção superficial, em m^3 /dia

7.5.3. Drenagem urbana (termos E_{gg} e E_{rg})

O volume de água que não é infiltrado e nem retido superficialmente forma uma componente de escoamento saldo (E_s), expresso por:

$$E_s = E_b - R_s \quad (18)$$

Onde,

E_s = escoamento saldo, em m^3 /dia

E_b = escoamento bruto, em m^3 /dia

R_s = fluxo de retenção superficial, em m^3 /dia

O escoamento saldo é submetido a um controlador de drenagem urbana por galerias de água pluvial (D_u) que define o volume de água que escoar através do Sistema de Galerias de Águas Pluviais formado por bocas de lobo, condutos, poços de visita e outros dispositivos (DAEE e CETESB, 1980), e os fluxos que seguem pela superfície gerando a componente E_r , que é o escoamento superficial (*runoff*).

7.5.3.1. Escoamento em galerias

O escoamento em galerias (E_g) é expresso por:

$$E_g = D_u * E_s \quad (19)$$

Onde,

E_g = escoamento em galerias, em m^3/dia

D_u = controlador de drenagem urbana por galerias de água pluvial

E_s = escoamento saldo, em m^3/dia

O escoamento em galerias é regido pelo controlador de fluxos em galerias pluviais (G) que define a proporção de escoamento de galerias para canais fluviais (E_{gq}) e o escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga (E_{gg}). Conforme o modelo são expressos, respectivamente, por:

$$E_{gq} = G * E_g \quad (20)$$

Onde,

E_{gq} = escoamento de galerias para canais fluviais, em m^3/dia

G = controlador de fluxos em galerias pluviais

E_g = escoamento em galerias, em m^3/dia

E,

$$E_{gg} = E_g - E_{gq} \quad (21)$$

Onde,

E_{gg} = escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga, em m^3/dia

E_g = escoamento em galerias, em m^3/dia

E_{gq} = escoamento de galerias para canais fluviais, em m^3/dia

Entretanto, este nível de detalhamento se depara com duas dificuldades: primeiro a inexistência de dados sobre o volume real de escoamento por galeria, há inclusive localidades em que ocorre a mistura de esgotos; e, segundo o desconhecimento dos pontos em que há distribuição dos fluxos de galerias para diferentes destinos porque não há registros documentais adequados para todos os bairros da RMSP.

Mas para as necessidades do modelo a distinção entre estes dois componentes pode ser suprimida a distinção uma vez que constituem parte do volume de água armazenada na represa em 24 h, ou seja, no tempo de integração do modelo.

7.5.3.2. Escoamento superficial

A água que não segue para as galerias forma o escoamento superficial (E_r), e segundo o modelo conceitual é expresso por:

$$E_r = E_s - E_g \quad (22)$$

Onde,

E_r = escoamento superficial (*runnof*), em m^3/dia

E_s = escoamento saldo, em m^3/dia

E_g = escoamento em galerias, em m^3/dia

O escoamento superficial é regulado pelo controlador de *runnof* (D_r), que define o volume de *runnof* dirigido para os canais fluviais (E_{rq}) e o de *runnof* que afluí para a Represa Guarapiranga (E_{rg}). Sendo,

$$E_{rq} = D_r * E_r \quad (23)$$

Onde,

E_{rq} = escoamento superficial para canais fluviais, em m^3/dia

D_r = controlador de *runnof*

E_r = escoamento superficial (*runnof*), em m^3/dia

E,

$$E_{rg} = E_r - E_{rq} \quad (24)$$

Onde,

E_{rg} = escoamento superficial para Represa Guarapiranga, em m^3/dia

E_r = escoamento superficial (*runnof*), em m^3/dia

E_{rq} = escoamento superficial para canais fluviais, em m^3/dia

7.5.4. Água subterrânea

Segundo o modelo conceitual o volume de água que não ultrapassa F forma o fluxo hídrico de infiltração (I_n), expresso por:

$$I_n = f(P_{nv} + P_{vf} + V_z) \quad (25)$$

Onde,

I_n = infiltração, em m^3 /dia

P_{nv} = precipitação na área não vegetada da área de contribuição, em m^3 /dia

P_{vf} = precipitação na área vegetada da área de contribuição, em m^3 /dia

V_z = fluxo de vazamento da rede de distribuição em superfície, em m^3 /dia

A água infiltrada e vazamentos da rede de distribuição que ocorrem também em subsuperfície formam o estoque de água no solo (S). S é responsável pelo fornecimento de água às plantas através da absorção radicular (F_r), gera evaporação (E_{vf}), e o excedente, através de fluxos internos de descida (F_i), abastece o aquífero (F_p). Logo, S é expresso por:

$$S_{(x)} = S_{(x-1)} + I_n + V_{zs} - F_i - F_r - E_{vf} \quad (26)$$

Onde,

$S_{(x)}$ = estoque de água no solo no dia x, em m^3

$S_{(x-1)}$ = estoque de água no solo no dia seguinte ao dia x, em m^3

I_n = infiltração, em m^3 /dia

V_{zs} = fluxo de vazamento da rede de distribuição em subsuperfície, em m^3 /dia

F_i = fluxo interno, em m^3 /dia

F_r = fluxo de absorção radicular na área vegetada, m^3 /dia

E_{vf} = evaporação de água do solo, m^3 /dia

A água do aquífero pode ser submetida a um fluxo vertical de subida através da adução de água subterrânea (A_s) para perfurações de poços podendo ser levada por reservatórios dos usuários de água subterrânea (U_s), de onde formará uma parcela de saída através da evaporação gerada por usuários desta água (E_{vus}), e outra através do escoamento de efluentes de usuários de água subterrânea (E_{fus}). Conforme o modelo, U_s é expresso por:

$$U_{s(x+1)} = U_{s(x)} + A_s - E_{fus} - E_{vus} \quad (27)$$

Onde,

$U_{s(x+1)}$ = reservatórios dos usuários de água subterrânea no dia seguinte ao dia x, em m^3

$U_{s(x)}$ = reservatórios dos usuários de água subterrânea no dia x, em m^3

A_s = adução de água subterrânea, em m^3/dia

E_{fus} = escoamento de efluentes de usuários de água subterrânea em m^3/dia

E_{vus} = evaporação de usuários de água subterrânea, em m^3/dia

Há possibilidade de ocorrência de fluxos horizontais que permitam trocas de águas subterrâneas com bacias vizinhas através de escoamento subterrâneo profundo de saída (E_{ss}) e escoamento subterrâneo profundo de entrada (E_{se}). Há ainda um fluxo horizontal que estabelece a relação entre a água subterrânea e canais fluviais (E_{fq}).

Deste modo, F_a é expresso por:

$$F_{a(x+1)} = F_{a(x)} + I_n + E_{se} - E_{ss} - E_{fq} - E_{vf} - A_s \quad (28)$$

Onde,

$F_{a(x+1)}$ = estoque de água no aquífero no dia seguinte ao dia x, em m^3

$F_{a(x)}$ = estoque de água no aquífero no dia x, em m^3

I_n = infiltração, em m^3/dia

E_{se} = escoamento subterrâneo profundo de entrada, em m^3/dia

E_{ss} = escoamento subterrâneo profundo de saída, em m^3/dia

E_{fq} = escoamento subterrâneo para canais fluviais, em m^3/dia

E_{vf} = evaporação de água do solo, em m^3/dia

A_s = adução de água subterrânea, em m^3/dia

Para Rocha et al 1989 apud Hirata e Ferreira (2001) ocorre transferência de água dos aquíferos cristalinos para os depósitos de rochas sedimentares e descarga junto aos rios da ordem de $1500 \text{ Mm}^3/\text{ano}$. Entretanto, E_{sse} e E_{ss} são considerados desprezíveis no modelo porque há poucos dados de campo sobre esta variável referente a toda a BAT.

Hirata e Ferreira (2001) apresentaram dados de um balanço hídrico do sistema de água subterrânea da BAT. Considera-se uma situação de ocupação da bacia em que segundo estimativas atuais há extração por 9000 poços tubulares com uma vazão de $315 \text{ Mm}^3/\text{ano}$; recarga total do aquífero de $1977 \text{ Mm}^3/\text{ano}$ sendo por

infiltração natural 1592 Mm³/ano e por fuga da rede pública 385 Mm³/ano. As reservas de água subterrânea da BAT podem ser apresentar em:

- reserva explotável: 988 Mm³/ano, sendo 752 Mm³/ano associado ao cristalino e 236 Mm³/ano ao sedimentar;
- reserva reguladora: 1977 Mm³/ano;
- reserva permanente: 15800 Mm³/ano.

7.5.5. Escoamento fluvial (termo q)

7.5.5.1. Dados fluviométricos

Conforme observado por Lana (2000) há poucos registros sobre a vazão diária dos tributários da Represa Guarapiranga. Apenas os principais rios tributários da Represa Guarapiranga apresentam registro instrumental de dados controlados pela SABESP, que forneceu as séries históricas de nível e de vazão referentes a cinco postos de monitoramento conforme as figuras 26, 27e 28.

Figura 26. Postos fluviométricos na BHG

Posto	Curso de água	Data de início	Data de fim
Posto G6	Rio Embu Guaçu	01/07/70	31/08/2005
Posto G7	Rio Embu Mirim	01/07/70	31/08/2005
Posto G8	Ribeirão Santa Rita	01/07/70	31/08/2005
Posto G12	Rio Parelheiros	01/07/70	31/08/2005
Posto G13	Rio Embu Guaçu	01/07/70	31/08/2005

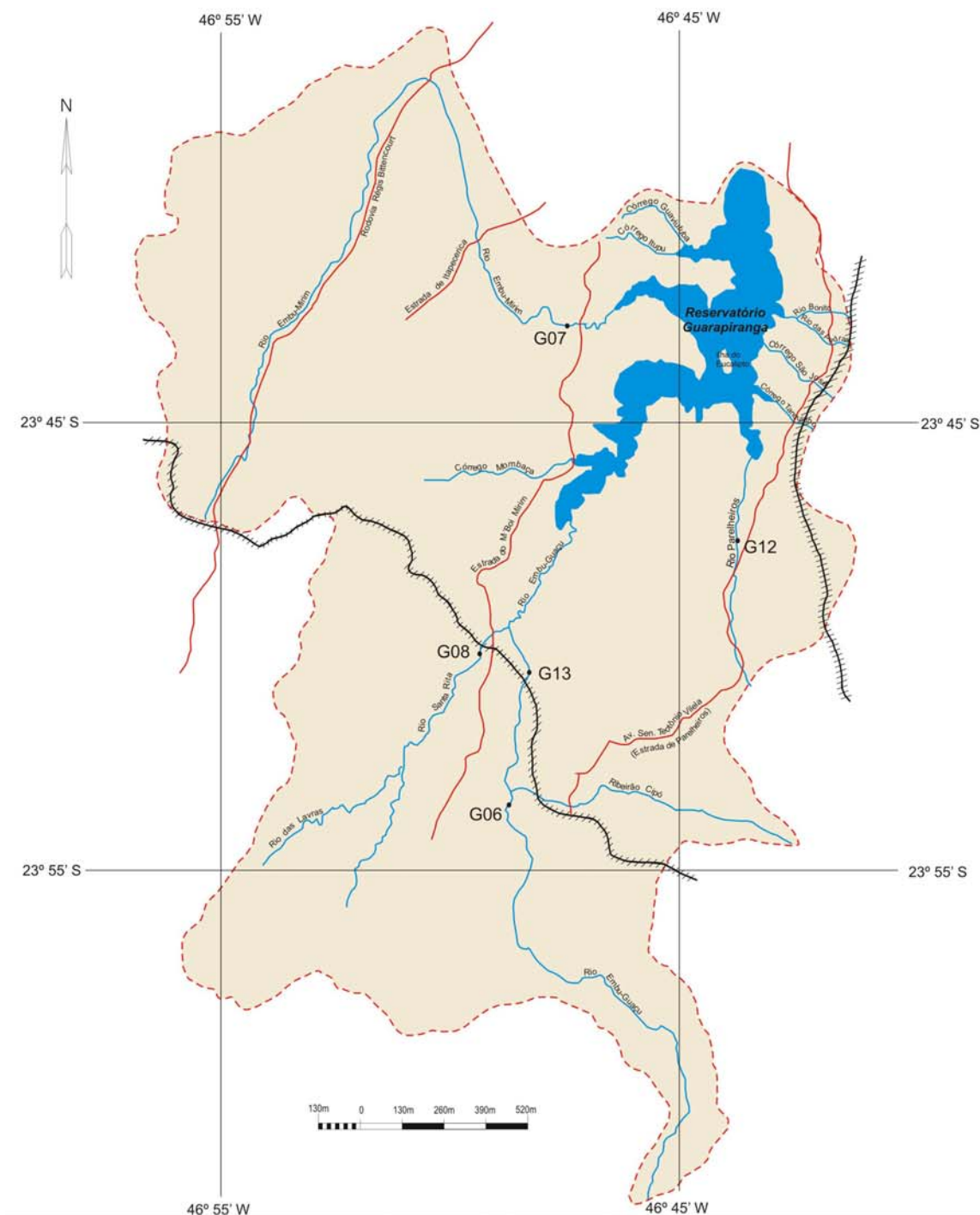
Fonte: Sabesp, 2005

Figura 27. Régua do posto fluviométrico G13 no Rio Embu Guaçu



Foto: J. Cláudio Estaiano, 2006

Figura 28. Localização dos postos fluviométricos da BHG



LEGENDA

- Postos Fluviométricos
- +++++ Estrada de Ferro
- Estradas Principais
- - - Limite da Bacia Hidrográfica
-  Curso d'água
-  Reservatório Guarapiranga

Fonte: Guarapiranga Recuperação Urbana e Ambiental no Município de São Paulo, 2000, EMLASA, Carta da Região Metropolitana da Grande São Paulo - Sistema Cartográfico Metropolitano, escala 1:100.00, 3ª edição, 1982.
Adaptação e Tratamento Digital: João Claudio Estaiano
Desenho: Rosiane da Silva Mateus

7.5.5.2. Estoque nos canais fluviais

O escoamento fluvial (q) é variável em função do estoque de água nos canais fluviais (Q). Além da precipitação nos canais fluviais Q também é variável dependente da circulação hídrica na área de contribuição (A_c) e do escoamento subterrâneo para canais fluviais (E_{fq}). Q pode ser expresso por:

$$Q_{(x+1)} = Q_{(x)} + P_q + E_{rq} + E_{fq} + E_{ftq} + E_{fnq} + E_{gq} + A_{bc} + A_{bt} - q - E_{vq} \quad (29)$$

Onde,

$Q_{(x+1)}$ = estoque nos canais fluviais no dia seguinte ao dia x em m^3

$Q_{(x)}$ = estoque nos canais fluviais no dia x em m^3

P_q = precipitação nos canais fluviais em m^3

E_{rq} = escoamento superficial para canais fluviais em m^3

E_{fq} = escoamento subterrâneo para canais fluviais em m^3

E_{ftq} = escoamento de efluentes tratados para canais fluviais em m^3

E_{fnq} = escoamento de efluentes não tratados para canais fluviais em m^3

E_{gq} = escoamento de galerias para canais fluviais em m^3

A_{bc} = adução de água bruta do Capivari em m^3

A_{bt} = adução de água bruta do Taquacetuba em m^3

q = escoamento fluvial em m^3

E_{vq} = evaporação dos canais fluviais em m^3

A_{bt} e A_{bc} apresentam controle operacional cujos dados diários das reversões referentes ao período de 01/08/1996 a 22/12/2005 foram cedidos pela Sabesp.

A água dos canais fluviais segue para a Represa Guarapiranga através de escoamento fluvial (E_q), e uma parcela evapora (E_{vq}). E_{vq} é obtida pela extrapolação proporcional simples da taxa de evaporação obtida no tanque de evaporação classe 1 pela área do espelho de água da represa:

$$E_{vq} = e * A_t \quad (30)$$

Onde,

E_{vq} = evaporação da Represa Guarapiranga em m^3 /dia

e = evaporação no tanque em m /dia

A_t = área da Represa Guarapiranga em m^2

7.5.6. Abastecimento de água na BHG (termo A_{bg})

7.5.6.1. Adução de água bruta da Represa Guarapiranga

O volume de água bruta aduzida da Represa Guarapiranga para ETA ABV (A_{bg}) está diretamente associado ao nível de água da Represa, que deve estar entre um nível operacional máximo e um mínimo, e também é relacionado à capacidade de tratamento e de reservação do sistema.

A_{bg} é controlada por um regulador de vazamentos (V_b), que determina a proporção entre a água bruta que de fato segue para tratamento e a água que segue outros fluxos devido aos problemas de manutenção de tubulações da rede adutora. Se houver vazamento, um controlador de direção de fluxos de vazamentos (V_f) define se o vazamento ocorre em subsuperfície (V_{zs}) compondo a umidade do solo no estoque S ou ocorre em superfície onde passa a ser controlados por F.

Portanto verifica-se que há uma diferença entre o volume de água aduzido na barragem (A_{bg}) e o volume que entra pelo vertedouro receptor na ETA ABV. Os dois fluxos hídricos mencionados apresentam controle operacional, cujo registro de dados diários está sob a salvaguarda das empresas SABESP e EMAE.

7.5.6.2. Distribuição de água tratada na ETA ABV

A adução real da Represa Guarapiranga para a ETA ABV (A_{rg}) é submetida à seqüência de processos de tratamentos (item 3.4) e após sua conclusão, passa a ser regulada pelo controlador de distribuição de água tratada (D_{at}), expresso por:

$$D_{atg} = D_{tg} / A_{tg} \quad (31)$$

Onde,

D_{atg} = distribuidor de água tratada da Represa Guarapiranga

D_{tg} = adução de água tratada na ETA ABV, em m^3 /dia

A_{tg} = escoamento de água tratada na ETA ABV, em m^3 /dia

Este controlador expõe a relevância da Represa Guarapiranga para o abastecimento público da RMS, pois define o volume de adução de água tratada na ETA ABV (D_{tg}) para reservatórios que se localizam na BHG (R_{atg}) e os volumes

de adução de água tratada (D_t) que seguem para reservatórios de outras regiões da RMSP (R_{at}). Este último armazenador é desconsiderado porque a água aí estocada não retorna a Repesa Guarapiranga. Isto é, a rotina do modelo se limita à circulação da água no interior da BHG.

$$R_{atg(x)} = R_{atg(x-1)} + D_{tg} - D_{ru} \quad (32)$$

Onde,

$R_{atg(x)}$ = reservatórios de água tratada na BHG no dia x, em m^3

$R_{atg(x-1)}$ = reservatórios de água tratada na BHG no dia seguinte ao dia x, em m^3

D_{tg} = adução de água tratada na ETA ABV, em m^3 /dia

D_{ru} = adução de água tratada da ETA ABV para usuários, em m^3 /dia

7.5.6.3. Usuários de água tratada da Repesa Guarapiranga

A água de R_{atg} segue para os reservatórios dos usuários de água tratada na BHG (U_{tg}), mas entre os dois pontos há o controlador de vazamentos (V_t). Os fluxos de vazamentos que ocorrem na rede de distribuição de água tratada (V_{zt}) também são submetidos ao controlador de direção de fluxos de vazamentos (V_f).

O armazenador U_{tg} é expresso por:

$$U_{tg(x)} = U_{tg(x-1)} + D_{tu} - E_{vutg} - E_{futg}$$

Onde,

U_{tg} = reservatórios dos usuários de água tratada na BHG, em m^3

D_{tu} = adução de água tratada para os usuários da BHG, em m^3 /dia

E_{vutg} = evaporação dos usuários de água tratada na BHG, em m^3 /dia

E_{futg} = escoamento de efluentes dos usuários de água tratada na BHG, em m^3 /dia

7.5.6.4. Perdas por vazamentos

Não há dados de medição de vazamentos. A SABESP considera as perdas de água tratada em vazamentos por intermédio de estimativas que resultam da diferença entre o volume de água tratada distribuída e aquela faturada. Ou seja,

os valores agregam os vazamentos e as ligações ilegais à rede de abastecimento água, sendo a estimativa atual de 15%²¹.

7.5.7. Produção de efluentes na BHG (termo E_{fg})

A água que sai das armazenagens dos usuários pode fluir através de efluentes (E_{futg}) que passam pelo controlador de tratamento de esgotos (E_{te}). E_{te} responde se o efluente dos usuários receberá tratamento ou será lançado in natura nos tributários e na represa, é expresso por:

$$E_{te} = E_{ft} / E_f$$

Onde,

E_{te} = tratamento de efluentes

E_{ft} = escoamento de efluente para tratamento, em m^3/dia

E_f = escoamento total de efluente in natura, em m^3/dia

Se os efluentes não receberem tratamento serão lançados diretamente nos canais fluviais e daí seguem para a Represa. Mas quando recebem tratamento há um regulador que controla o lançamento de esgotos em ETEs locais (Foto 15, anexo 10.4) ou na ETE Barueri. Quando tratado em ETE local o efluente é lançado em canais fluviais da rede de drenagem de BHG.

7.5.7.1. Outros usuários de água na BHG

Distinguiram-se três tipos de armazenadores de água de usuários na BHG conforme o manancial abastecedor: usuários de água subterrânea (U_s), usuários de água tratada do sistema integrado (U_{ti}), e usuários de água tratada na BHG (U_{tg}). Cada um destes estoques gera dois processos de circulação hídrica: evaporação e produção de efluentes. Ambos são decompostos em fluxos relacionados a cada armazenador mencionado.

Conforme será explicado a seguir, adotou-se um valor médio para a interpretação da componente de saída evaporação. Por esse motivo os fluxos de evaporação das armazenagens de usuários são supostas desprezíveis. Logo, é possível admitir que;

²¹ Informação fornecida por técnicos da SABESP em visita.

Se $E_{vus} = 0$, então $E_{fus} = A_s$

Se $E_{vuti} = 0$, então $E_{futi} = A_{ti}$

Se $E_{vutg} = 0$, então $E_{futg} = D_{tu}$

A adução de água tratada do sistema integrado (A_{ti}) é realizada pelo Sistema Alto Cotia.

7.5.8. Evaporação na Represa Guarapiranga (termo E_{vg})

A EMAE disponibilizou duas séries históricas da média de evaporação para o período de 01/10/37 a 01/12/95 e para 01/07/42 a 01/12/95. Visto que a discretização temporal desta informação é incompatível com a escolha do modelo, o termo E_{vg} será considerado como o resíduo, e este pode ser usado como um parâmetro para calibração.

8. Considerações Finais

“Esta é outra coisa que precisa aprender. Nada é fácil, Lituma. As verdades que parecem mais verdadeiras, se a gente dá muitas voltas nelas, se a gente olha para elas de pertinho, vê que são verdades só pela metade, ou deixam de ser verdades.”

(Mario Vargas Llosa, p.99)

Esta pesquisa tem a sua origem na curiosidade dos meus alunos durante aulas de geografia que lecionei para o Ensino fundamental e Médio em meados de 2000. Esta é a primeira justificativa de sua pertinência: a relação chuvas e abastecimento público de água veiculada pelos meios de comunicação estimulam a preocupação até mesmo das crianças e adolescentes das nossas escolas. Prontamente foi necessário buscar possíveis abordagens para o problema e verificou-se logo no início o risco que há no sentido de criar novos “mitos” (MARINI, 1996).

Conforme exposto, Mateus (2002) verificou a relevância dos processos naturais e sociais na definição da relação chuvas/abastecimento, portanto, diversos caminhos poderiam ser tomados para o desenvolvimento de uma pesquisa sobre o tema. Optou-se por continuar a investigação pela abordagem metodológica da modelagem hidrológica, uma vez que o tratamento sistêmico estava implícito no enunciado chuvas/abastecimento.

Este trabalho é um exercício metodológico. Não é a aplicação direta de um modelo porque não se escolheu um modelo já existente, e sobre o qual se realizaria adaptações, ajustes e calibrações para então realizar simulações. Este procedimento traria respostas que muito provavelmente teriam grande validade, porque se poderiam usar informações hídricas já catalogadas e analisando-as propor descrições, simulações e até diversas interpretações relevantes, e em muitas direções, talvez da sua gênese, das suas conseqüências, do seu desenvolvimento, tantas são as possibilidades.

Todavia, o que se pretendeu foi compreender o procedimento metodológico da modelagem e não apenas usar um ou mais de seus produtos. Pretendeu-se apreender a maneira pela qual a Teoria Sistêmica serve como ancoragem teórica (e quiçá, filosófica) para a modelagem e para a compreensão do real. A escolha proporciona o desenvolvimento da visão crítica em relação aos modelos voltada para a identificação de possibilidades e limitações dos modelos.

Partiu-se de um problema, que é teórico, visto que no atual momento de desenvolvimento técnico da sociedade (SANTOS, 1994) estabelecer uma relação

direta e de mão-única entre ausência de chuva e déficit de abastecimento de água, só é possível teoricamente. Na avaliação de fatos se verifica que o enunciado está pelo menos incompleto, senão orientado. Por exemplo, no semi-árido nordestino brasileiro o índice pluviométrico é de 700 mm/ano, enquanto em Paris, na França, é de 660 mm/ano e Berlim, capital alemã, é de 520 mm/ano (MODÉ e DEAK, 2003). Os dados expressam semelhanças, mas a apropriação diferenciada dos recursos hídricos apresenta respostas diferentes.

A elaboração do modelo de circulação hídrica na BHG evidenciou a existência de diversos fluxos, sendo a maioria quantitativamente desconhecida. A formulação matemática deixou claro que muitos processos precisam ser mais estudados porque muitos parâmetros hidrológicos são desconhecidos especialmente em meio urbano.

O modelo matemático aqui proposto não está consolidado porque, até esta etapa, não foi realizada a calibragem, testes de sensibilidade, simulação e verificação. Isto é resultado da opção por pensar primeiro conceitualmente o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica urbana. De posse de um sistema de equações, da definição de uma grade espacial e de dados hidrológicos conhecidos e sistematizados é possível realizar as etapas mencionadas além dos limites temporais e de objetivos de uma dissertação de mestrado. Sabe-se, entretanto, que é fundamental a aplicação do modelo para que se possa fazer sua validação e mudanças necessárias.

A aplicação de modelos hidrológicos auxilia na explicação de processos hidrológicos já que as simulações realizadas descrevem o funcionamento ao menos de partes de dado sistema hidrológico²². Além disso, pode resultar em produtos necessários a operacionalização de serviços tão fundamental quanto o abastecimento público de água.

O mestrado cumpriu o papel fundamental de dar um impulso na direção de questões científicas sérias e profundamente complexas. De maneira que questões ainda se apresentam insolúveis nas páginas anteriores. Algumas foram explicitamente tratadas e outras são subjacentes ao texto apresentado.

O desenvolvimento da dissertação possibilitou a reflexão sobre a importância efetiva da escolha metodológica. Isto ocorreu graças à prática da

²² Em colóquios, o Ms. Antônio J. Machado explicou que “o balanço hídrico pode influenciar na variabilidade sazonal da ilha de calor urbano. Em termos da ilha de calor, é relevante saber qual a umidade que fica disponível no solo a partir de um balanço hídrico. Algumas propriedades térmicas podem ser influenciadas pela umidade presente. Este é o elo sutil entre balanço hídrico e ilha de calor”.

pesquisa, que impôs a compreensão da abordagem sistêmica e modelagem hidrológica, e exercitar estes recursos teóricos na investigação de um problema do mundo real. Isto ainda não se cumpriu plenamente, mas encaminhou para um amadurecimento neste sentido, e deixou clara a necessidade que a autora tem ainda de acercar-se melhor da linguagem matemática e aplicá-la aos problemas próprios da Geografia e aprofundar o conhecimento sobre a modelagem e as diferentes fases do ciclo hidrológico.

Para responder satisfatoriamente possíveis objeções ao método seria necessária uma outra pesquisa. Contudo, sabe-se que como os métodos quantitativos são falíveis, os demais também o são, cada qual a sua maneira. O que se pretendeu, portanto, foi adotar um método científico sistematizado e que apresenta coerência lógica para se obter uma melhor compreensão do real tendo em vista a melhoria na qualidade da vida humana.

9. Referências

9. Referências

- ABREU, M. T. **A escassez de água para abastecimento público e a influência da degradação ambiental. Estudo de caso: Represa Billings e Guarapiranga.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Saneamento Ambiental na Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo: 1999.
- AB´SÁBER, A. N. **Geomorfologia do Sítio Urbano de São Paulo.** Tese de doutorado. Departamento de Geografia, FFLCH,USP, 1957.
- ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista,** Universidade de São Paulo, IGEOG/USP, Série Teses e Monografias, nº 14, 1974.
- ALMEIDA, F. F. M. O Planalto Paulistano. In: AZEVEDO, A. (org.). **A Cidade de São Paulo. Estudos de geografia urbana.** AGB: São Paulo, 1958.
- ANDRADE, A. A. S. **Análise da eficiência da várzea do Ribeirão Parelheiros na melhoria de qualidade das águas que afluem à Represa do Guarapiranga, São Paulo.** Dissertação de mestrado. EESC/USP, São Paulo: 2005.
- AZEVEDO, T. R. A distribuição espacial da chuva: um ensaio metodológico. In: TARIFA, J. R.; AZEVEDO, T. R. **Os climas na cidade de São Paulo. Teoria e Prática,** Geusp nº 4, São Paulo, 2001. pp. 155-164.
- AZEVEDO, T. R. Chove todo dia em São Paulo? In: **XIII Encontro Nacional de Geógrafos, 2002, João Pessoa. Por uma geografia nova na construção do Brasil.** São Paulo: AGB, 2002a, v.1
- AZEVEDO, T. R. Precipitação na cidade de São Paulo em função da atividade urbana. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002,** Foz do Iguaçu. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002b.
- BAIRD, A. J. Continuity in Hydrological Systems. In WILBY, R. L.(ed.) **Contemporary Hydrology. Towards Holistic Environmental Science.** John Wiley & Sons, 1996. pp.25-53.
- BERGSTRÖM, S.; GRAHAM, L. P. On the scale problem in hydrological modelling. **Journal of Hydrology,** v.211, pp. 253-265, 1998.
- BEVEN, K. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. **Journal of Hydrology,** v.105, n.1-2, pp. 157-172, 1989.
- BRANCO, S. M. **Ecossistêmica. Uma abordagem integrada dos problemas do Meio Ambiente.** 2ª ed., São Paulo:Ed. Edgard Blücher Ltda, 1999.
- BRANCO, S. M. Água, Meio ambiente e Saúde. In: REBOUÇAS, A. da; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação.** 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp. 227-248 .
- BRIGHETTI, G., SANTOS, S. R. Navegação. In: REBOUÇAS, A. da; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação.** 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp.419-450.

- BROWN, G. Recursos hídricos. In **Os recursos físicos da terra**. Campinas, SP: Ed. da Unicamp, 2000. (Tradução de The Earth's physical resources – Block 4. Part 1 Water resources).
- CAMPANA, N.;TUCCI, C. E. M. Estimativa de área impermeável de macrobacias urbanas. **RBE: Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos**, vol. 12, nº 2, pp. 79-94, 1994.
- CAMPANA, N. A.;TUCCI, C. E. M. Previsão de vazão em macrobacias urbanas: Arroio Dilúvio em Porto Alegre. In: TUCCI, C. e. M e MARQUES, D. M. L. da M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. pp. 53-77.
- CASTRO, I. E. de. O Problema da Escala. In: CASTRO, I. E. de. et al (orgs.). **Geografia: Conceitos e Temas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. pp. 119-140.
- CHEVALLIER, P. Aquisição de Processamento de Dados. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp. 443-525.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia. Introdução**. São Paulo: Hucitec, 1979.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997, 2ª edição.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999.
- CONTI, J B. **Circulação Secundária e Efeito Orográfico na Gênese das Chuvas na Região Lesnordeste Paulista**, Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 1973.
- CUSTÓDIO, V. **A Apropriação dos recursos hídricos e o abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 1994.
- CUSTÓDIO, V. **A Persistência das Inundações na Grande São Paulo**. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 2001.
- DAEE (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA). **Estudo de Águas Subterrâneas**. Região Administrativa 1. Grande São Paulo. São Paulo: Tahal Consulting Engineers Ltd, 1975.
- DAEE e CETESB. **Drenagem Urbana. Manual de Projeto**. São Paulo: 1980.
- DOOGE, J. C. I. The waters of the Earth. **Hydrological Sciences Journal**. Oxford, vol. 29, nº2, 149-176, jun/1984.
- DOORKAMP, J. C.;KING, C. A. M. Numerical Analysis In **Geomorphology_An introduction**. London: Ed. Arnold, 1971. (Seleção e tradução de Lylian Coltrinari).

- EMPLASA **Plano Metropolitano da Grande São Paulo 1994/2010**, São Paulo: 1994.
- EMPLASA **Cd de Dados da Cidade de São Paulo**, 1999.
- FERNANDES, A. N. **Balanço de massa e produção de Lodo da Estação de Tratamento de Água Alto da Boa Vista – SABESP**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001.
- FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 2, nº 1, 2001, pp. 51-71.
- FERREIRA, R.C.; FRANCISCO, J. A legislação ambiental e urbanística no trato das fronteiras d'água. In: BRAGA, R. & CARVALHO, P.F. de. **Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional**. Laboratório de Planejamento Municipal. Deplan – IGCE-UNESP. Rio Claro: 2003. pp. 87-105.
- FUSP. **Plano da Bacia do Alto Tietê**. Relatório Final. Comitê da Bacia do Alto Tietê. Fundação da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **DIÁRIO OFICIAL**. Vol. 113, nº 51. São Paulo: 15 de março de 2003.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei Estadual nº 9.866/97. Uma nova Política de Mananciais. Diretrizes e Normas para a Proteção e Recuperação das Bacias Hidrográficas dos Mananciais de Interesse Regional do Estado de São Paulo**. São Paulo: 1997.
- GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992.
- GRIMMOND, C. S. B. et al. Urban Water Balance. 1. A Model for Daily Totals. In: **Water Resources Research**, set, 1986, vol. 22, nº10, pp. 1397-1403.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Urban Water Balance. 2. Results from a Suburb of Vancouver, British Columbia. In: **Water Resources Research**, set, 1986, vol. 22, nº10, pp. 1404-1412.
- HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, Paradigmas e a Nova Geografia. In: CHORLEY, R. J. e HAGGETT, P. (Orgs.). **Modelos em Geografia. Modelos Físicos e de Informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Editora da Universidade de São Paulo, 1975. pp.1-19.
- HIRATA, R. C. A.; FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade Hídrica e Vulnerabilidade à Poluição. In **Revista Brasileira de Geociências**, nº31, vol. 1, 2001. pp.43-50.
- HOLTZ, A. C. T. Precipitação. In: PINTO, N. L. de S. et ali. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. (pp.7-35).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**, Volume I, São Paulo, 1981.

- INSTITUTO SÓCIO AMBIENTAL. **Diagnóstico Sócio Ambiental Participativo Preliminar Da Bacia Guarapiranga**, ISA, São Paulo, março de 1998.
- KARMANN, I. Ciclo da Água. Água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W. et al (orgs.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. pp. 113-138.
- KIRKBY, M. J. Models in Physical Geography. In: CLARK, M. J., et al (Editors), **Horizons in Physical Geography**. MacMillan, New Jersey: 1987. pp. 47-61.
- LANA, T. M. A. **Proposta de um Sistema para Operação do Canal Pinheiros Superior e Barragem do Guarapiranga**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica – USP: 2000.
- LANNA, A. E. L. Hidroeconomia. In: REBOUÇAS, A. da et al (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp.531-562.
- LEAL, A. C. Gestão regional em bacias hidrográficas: interfaces com o gerenciamento de recursos hídricos. In: BRAGA, R. e CARVALHO, P. F. de. **Recursos Hídricos e Planejamento Urbano e Regional**. Laboratório de Planejamento Municipal. Deplan, IGCE-UNESP. Rio Claro: 2003. pp. 65-85.
- LIMA, W. de Paula; ZAKIA, M. J. Brito. Hidrologia de Matas Ciliares. In: RODRIGUES, R. R e FILHO, H. de F. L. (orgs.) **Matas Ciliares. Conservação e Recuperação**. São Paulo: EDUSP: FAPESP, 2000. pp. 33-44.
- MACIEL, J. **Elementos da Teoria Geral dos Sistemas**, Coleção Teoria de Sistemas 13, Petrópolis, Ed. Vozes Ltda.: 1974.
- MARINI, L. A Luta contra os Deuses. MARTINS, J. S. (org) **Henri Lefebvre e o Retorno à Dialética**. São Paulo: Ed. Hucitec, 1996. pp. 145, 146.
- MARTINS, J. A. Infiltração. In: PINTO, N. L. de S. et ali. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976a. (pp.44-55).
- MARTINS, J. A. Evaporação e Transpiração. In: PINTO, N. L. de S. et ali. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976b. (pp.56-66).
- MATEUS, R. da S. **O Ritmo Climático e o Abastecimento de Água na RMSP – o caso do Sistema Guarapiranga**. TGI, FFLCH, USP, 2002.
- MATEUS, R. da S. O Ritmo Climático e o Abastecimento de Água na RMSP – o caso do Sistema Guarapiranga. In: **Anais do I Simpósio de Pesquisa Em Geografia Física**, FFLCH-USP, 8-10 dez 2003. São Paulo.
- MENDIONDO, E. M.;TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas I: Conceitos. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.2, nº.1, 1997. pp. 59-79.
- MODÉ, G.;DEAK, A. Ouro Líquido. Reservas hídricas do mundo estão na mira do capital privado. In: **Problemas Brasileiros**, nº 358, ano XLI, 2003, pp. 4-9.
- MONTEIRO, C. A. de F. **O Ritmo de Evolução da Frente Polar e as Chuvas na Fachada Sub-tropical Atlântica do Brasil. (Contribuição Metodológica à**

- Análise Geográfica dos Tipos de Tempo no Brasil**). Tese de doutoramento em Geografia, FFLCH,USP, 1967.
- MONTEIRO, C. A. de F. **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo. Estudo Geográfico sob a forma de Atlas**, Instituto de Geografia, São Paulo, 1973.
- MONTEIRO, C. A.de F. **Teoria e Clima Urbano**, São Paulo, IGEOG/USP, Série Teses e Monografias, nº 25, 1975.
- MORE, R. J. Os Modelos Hidrológicos e a Geografia. In: CHORLEY, R. J. e HAGGETT, P. (Orgs.). **Modelos em Geografia. Modelos Físicos e de Informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Editora da Universidade de São Paulo, 1975. pp.104-138.
- MOROZ, I. C. et al. Lei de Proteção aos Mananciais e a Questão Ambiental. In: **Revista do Departamento de Geografia**, nº 7, FFLCH, USP, 1994, pp. 35-48.
- MOTA, J. C.;TUCCI, C. E. M. Simulation of urbanization effect in flow. **Hydrological Sciences Journal**, vol. 29, nº2, pp. 131-147, 1984.
- NAVARRA, C. T. Sistemas Reais e Sistemas Conceituais. In: **Métodos em Questão**, nº5. IGEOG/USP, 1973.
- OLIVEIRA, P. M. C. de. Sistemas Complexos. In: **Ciência Hoje**, vol. 16, nº 92, 1993, pp. 15-22.
- ONÇA, D. de S. A Mídia e as Mudanças Climáticas. In: **Anais do II Simpósio de Pesquisa Em Geografia Física**, FFLCH-USP, 11-12 dez 2004. São Paulo.
- PEDROLLO, O. C; LANNA, A. E. Previsão de cheias em tempo atual em sistemas fluviais com contribuições laterais relevantes. **RBE: Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos**, v.9, nº2, pp. 25-51, dez. 1991.
- PORTO, M. **Recursos Hídricos e Saneamento na Região Metropolitana de São Paulo: Um Desafio do tamanho da Cidade**. Série Água Brasil 3. 1ª edição – Brasília, 2003.
- PRADO Jr, C. **A Cidade de São Paulo. Geografia e História**. São Paulo: Editora Brasiliense, 1998.
- PREFEITURA MUNICIPAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Guarapiranga Recuperação Urbana e Ambiental no Município de São Paulo**, São Paulo, 2000.
- PRUSKI, F. F. et al. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, nº2, 2001. pp. 301-307.
- PRUSKI, F. F. et al. **Escoamento Superficial**. 2 ed. Viçosa: Ed. UFV,2004.
- QUEIROZ FILHO, A. P. A Escala nos Trabalhos de Campo e de Laboratório. In: VENTURI. L.A.B. (org.). **Praticando a geografia: técnicas de campo e de laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. pp. 55-67.

- REBOUÇAS, A. da. Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. da; et al (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002(b). pp.119-151.
- REBOUÇAS, A. O Ambiente Brasileiro: 500 Anos de Exploração – Os Recursos Hídricos. In RIBEIRO, W. C. (org.). **Patrimônio Ambiental Brasileiro**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2003. pp.191-239.
- REFSGAARD, J. C. Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. **Journal of Hydrology** , 198, 69-97, 1997.
- REZENDE, S. C.;HELLER, L. **O Saneamento Básico no Brasil. Políticas e Interfaces**. Ed. UFMG, MG: 2002.
- RIBEIRO, W. C. **Geografia Política da Água**. Tese de Livre-Docência. Departamento de Geografia, FFLCH,USP, 2004.
- RODRIGUES, C.;ADAMI, S. Técnicas Fundamentais para o Estudo de Bacias Hidrográficas. In: VENTURI. L.A.B. (org.). **Praticando a geografia: técnicas de campo e de laboratório**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. pp. 147-166.
- SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **Ecossistema São Paulo Abastecimento de Água na Região Metropolitana**, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Recursos Hídricos Saneamento e Obras, São Paulo, 1997.
- SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) Materiais cedidos em visita de campo ainda não publicados (folder, catálogos, textos avulsos e slides), 2000 e 2001.
- SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) **Revisão e Atualização do Plano Diretor de Esgotos da RMSP. Relatório Síntese**, São Paulo: 2000.
- SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **Estação Elevatória de Água Bruta do Capivari**.
- SALATI, E. A floresta e as águas. In **Ciência Hoje**, vol. 3, nº 16, 1985.
- SANTOS, E. O. Tietê, o rio de São Paulo. In: AZEVEDO, A. (org.). **A Cidade de São Paulo. Estudos de geografia urbana**. AGB: São Paulo, 1958. pp. 45-67.
- SANTOS, M. Técnica Espaço Tempo. Globalização e meio técnico-científico informacional. São Paulo: Hucitec, 1994.
- SANTOS, M. **Por uma Geografia Nova. Da Crítica da Geografia a uma Geografia Crítica**. 4ª ed. Ed. Hucitec, São Paulo, 1996.
- SANTOS, M. **A Natureza do Espaço. Técnica e Tempo. Razão e Emoção**. São Paulo: Hucitec, 1996.
- SCARIM, P. C. A “Rara” Propriedade. In DAMIANI, A. L. et al (orgs.). **O Espaço no fim do século: a nova raridade**. São Paulo, Contexto, 1999. pp.172-176.

- SEABRA, O. C. de L. **Os meandros dos rios, nos meandros do poder: Tietê e Pinheiros – valorização dos rios e das várzeas na cidade de São Paulo**, Tese de doutorado. Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 1987.
- SEABRA, O. C. de L.; SPÖRL, A. A Lei de Proteções aos Mananciais Versus a Prática Social de Ocupação na Bacia do Guarapiranga. In: **Revista do Departamento de Geografia**, FFLCH, USP, 1997.
- SILVA, G. A.; SIMÕES, R. A. G. Água na Indústria. In: REBOUÇAS, A. da et al (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp. 339-369.
- SILVA, J. de P. **Expansão Urbana e Evolução Geomorfológica em Remansos de Reservatórios: Análise Comparativa de Duas Bacias Hidrográficas em Guarapiranga**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 2005.
- SILVA, M. das G. A. da. **A Problemática da ocupação das Áreas de mananciais e a Qualidade de Vida Urbana na Cidade de São Paulo: o Distrito de Jardim Ângela**. TGI, FFLCH, USP, 2000.
- SILVEIRA, A. L. L. da; DESBORDES, M. Modelo Hidrológico Urbano Distribuído com Poucos Parâmetros. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000a. pp. 175-197.
- SILVEIRA, A. L. L. da; DESBORDES, M. Impactos Hidrológicos da Urbanização em Porto Alegre. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2000b. pp. 153-163.
- SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004a. 3ª edição. pp. 35-51(a).
- SILVEIRA, A. L. L. et al. Infiltração e Armazenamento no Solo. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS, 2004b. 3ª edição. pp. 335-372(b).
- TARIFA, J. R. **Fluxos Polares e as Chuvas de Primavera – Verão no Estado de São Paulo (Uma análise quantitativa à gênese do processo)**. São Paulo, Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 1975.
- TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Os climas “naturais”. In: TARIFA, J. R. e AZEVEDO, T. R. **Os climas na cidade de São Paulo. Teoria e Prática**, Geousp 4, São Paulo, 2001a. pp.34-46.
- TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Os climas urbanos. In: TARIFA, J. R. e AZEVEDO, T. R. **Os climas na cidade de São Paulo. Teoria e Prática**, Geousp 4, São Paulo, 2001b. pp.34-70.
- TELLES, D. de A. Água na Agricultura e Pecuária. In: REBOUÇAS, A. da et al (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp. 305-337.

- TSUKADA, E. M. **A distribuição espacial de superfícies impermeáveis na porção noroeste do Município de São Paulo obtidas a partir de imagens orbitais.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 2006.
- TUCCI, C. E. M. Hidrodinâmica de rios e canais. **Comunicação Técnica nº 9.** São Paulo: Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE): 1980.
- TUCCI, C. E. M. et al. Avaliação do impacto da urbanização nas cheias urbanas. **RBE: Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos**, vol. 7, nº1, 1989.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol.2, nº1, pp. 135-152. 1997.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.
- TUCCI, C. E. M. Avaliação e Controle dos Impactos Ambientais da Urbanização: Apresentação do Projeto. In: TUCCI, C. E. M. et al (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS, 2000. pp.13-21.
- TUCCI, C. E. M. et al. Banco de eventos de cheias de bacias urbanas brasileiras. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. pp.25-50.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISHONN, W. Drenagem urbana e controle de erosão. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. da M. (orgs.). **Avaliação e controle da drenagem urbana.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. pp. 119-127.
- TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: REBOUÇAS, A. da et al (orgs.) **Águas Doces no Brasil. Capital Ecológico, Uso e Conservação.** 2ª ed., São Paulo: Escrituras Editora, 2002. pp. 473-506.
- TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.25-33. (a)
- TUCCI, C. E. M. Interceptação. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.243-252. (b)
- TUCCI, C. E. M. Fundamentos do Escoamento Não-Permanente. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.335-389. (c)
- TUCCI, C. E. M. Escoamento Superficial. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.391-441. (d)
- TUCCI, C. E. M. Escoamento em Rios e Reservatórios. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação.** Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.443-483. (e)

- TUCCI, C. E. M. Vazão Máxima e Hidrograma de Projeto. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.527-572. (f)
- TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2004. 3ª edição. pp.253-287.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI. Enfrentando a Escassez**. Rima Editora, IIE, São Carlos, 2003.
- VENTURI, L. A. B. Tristes mananciais. In Carlos A. F. A.; OLIVEIRA, A. U. de. (orgs.). **Geografias de São Paulo: a metrópole do século XXI**. São Paulo: Contexto, 2004. pp. 243-253.
- VILAR, D. D. **Arqueologia industrial e a evolução tecnológica do abastecimento de água na cidade de São Paulo: dos franciscanos a Companhia Cantareira**. Dissertação de Mestrado, FFLCH, USP, 2003.
- WATTS, G. Hydrological Modelling in Practice. In WILBY, R. L. (ed.) **Contemporary Hydrology. Towards Holistic Environmental Science**. John Wiley & Sons, 1996. pp.151-193.
- ZAVOIANU, I. Morphometry of drainage basins. **Developments in water science**, 20, Amsterdam, Elsevier. 1985.

10. Anexos

10.1. Lista de equações

(1)	$G_{(x+1)} = G_{(x)} + E_{(x)} - S_{(x)}$
(2)	$G_{(x+1)} = G_{(x)} + (P_r+Q) - (E_{vg}+A_{bg}+Q_g)$
(3)	$G_{(x+1)} = G_{(x)} + q + P_r + E_{gg} + E_{rg} + E_{fg} - A_{bg} - E_{vg} - Q_g$
(4)	$\Delta G_{(x)} = G_{(x+1)} - G_{(x)} = (P_r+Q) - (E_{vg}+A_{bg}+Q_g)$
(5)	$G = (1,45n^2 - 2108,82n + 764621,55) * 10^6$
(6)	$G_{(x+1)} = G_{(x)} + E - S$
(7)	A_v / A_{nv}
(8)	$A_c = A_v + A_{nv}$
(9)	$P = \sum (A_{(u)} * P_{(u)})$
(10)	$D_{p1} = A_c / A_g$
(11)	$A_c = A_g - A_t - A_r$
(12)	$D_{pb} = A_t / A_r$
(13)	$C = ES / PT$
(14)	$F = 1,00 - C$
(15)	$I_v = A_v / A_c$
(16)	$V_{(x)} = V_{(x-1)} + P_v + F_r - P_{vf} - E_{vp}$
(17)	$R_{r(x)} = R_{(x-1)} + R_s - E_{vr}$
(18)	$E_s = E_b - R_s$
(19)	$E_g = D_u * E_s$
(20)	$E_{gq} = G * E_g$
(21)	$E_{gg} = E_g - E_{gq}$
(22)	$E_r = E_s - E_g$
(23)	$E_{rq} = D_r * E_r$
(24)	$E_{rg} = E_r - E_{rq}$
(25)	$I_n = f(P_{nv} + P_{vf} + V_z)$
(26)	$S_{(x)} = S_{(x-1)} + I_n + V_{zs} - F_i - F_r - E_{vf}$
(27)	$U_{s(x+1)} = U_s(x) + A_s - E_{fus} - E_{vus}$
(28)	$F_{p(x+1)} = F_{p(x)} + I_n + E_{se} - E_{ss} - E_{fq} - E_{vf} - A_s$
(29)	$Q_{(x+1)} = Q_{(x)} + P_q + E_{rq} + E_{fq} + E_{ftq} + E_{fnq} + E_{gq} + A_{bc} + A_{bt} - q - E_{vq}$
(30)	$E_{vq} = e * A_t$
(31)	$D_{atg} = D_{tg} / A_{tg}$
(32)	$R_{atg(x)} = R_{atg(x-1)} + D_{tg} - ?$

10.2. Diagrama de fluxos hídricos da BHG

10.3. Componentes do Modelo Hidrológico da BHG

10.4. Registro fotográfico da BHG



Foto 01. Fotografia que retrata a densa urbanização da BHG. Nota-se ao fundo o corpo do reservatório cercado pela urbanização que chega até sua margem. Este trecho da BHG apresenta índice de permeabilidade muito reduzido (Foto: SABESP, 2000).



Foto 02. Fotografia tirada a partir da Av. Guarapiranga. Observa-se grande urbanização na bacia hidrográfica da Represa Guarapiranga. As autoconstruções tomaram conta de toda vertente até as margens do reservatório (J. Claudio Estaiano, 2002).



Foto 03. Em primeiro plano avista-se a Estrada M'Boi Mirim. Ao fundo ocupação irregular com baixo padrão, sendo a maioria formada por edificações de autoconstrução. Nota-se a ocupação de toda a vertente de forma irregular ((J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 04. Tomada a partir da Avenida Senador Teotônio Vilela, importante via de acesso aos bairros periféricos da BHG. Trecho comercial do Bairro Cidade Dutra, densamente ocupado, com ruas totalmente impermeabilizadas e vegetação esparsa (J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 05. Fotografia do bairro Interlagos localizado na BHG. Observam-se casas com alto padrão, calçadas arborizadas e gramadas, aumentando o índice de permeabilidade (J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 06 – Bairro residencial localizado no Bairro Interlagos. Notam-se alto padrão das edificações, ruas largas e calçadas arborizadas e gramadas (Foto: Antônio Jaschke Machado, 2006).



Foto 07. Riviera Paulista localiza-se à margem esquerda da Represa Guarapiranga, é um bairro residencial de alto padrão, com presença de áreas livres e arborizadas e várias ruas não asfaltadas. (Foto: Antônio Jaschke Machado, 2006).



Foto 08. Tomada a partir da Estrada da Ponte Alta, trecho da BHG tipicamente rural no município de São Paulo. Observa-se em primeiro plano pequena chácara com plantação de milho. Ao fundo morros cobertos por mata nativa que ocupam a maior parte da BHG (Foto: J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 09. Em primeiro plano área de pastagem no município de Embu-Guaçu. Ao fundo Represa Guarapiranga cercada por manchas de mata (Foto: J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 10. Rio Embu-Guaçu em seu médio curso. As matas ciliares encontram-se preservadas, favorecendo a manutenção do manancial (Foto: Rosiane da Silva Mateus, 2006).



Foto 11. Área de extração mineral de areia na BHG, no município de São Paulo. A extração de areia ocorre na planície de inundação do Rio Embu Guaçu em seu alto curso. O Rio Embu Guaçu é o maior contribuinte da Represa Guarapiranga (Foto: Antônio Jaschke Machado, 2006).



Foto 12. Entrada do Parque Guarapiranga. Área de proteção na porção SW do reservatório, constituindo-se como um dos remanescentes de mata na BHG (Foto: Antônio Jaschke Machado, 2006).



Foto 13. Placa com indicação da Área de Proteção Municipal da Cidade de São Paulo APA Capivari-Monos, ocupando trechos da BHG (Foto: Antônio Jaschke Machado, 2006).



Foto 14. Vista aérea da Estação de Tratamento de Água Alto da Boa Vista (ETA ABV). É nesta estação que a água aduzida da Represa Guarapiranga é tratada atualmente (SABESP, 2002).



Foto 15. Entrada da Estação de Tratamento de Esgoto Embu Guaçu. Uma das ETEs locais na BHG (Foto: J. Claudio Estaiano, 2006).



Foto 16. Um dos muitos córregos poluídos que deságuam diretamente na Represa Guarapiranga. Nota-se o leito tomado por lixo e esgoto (Foto: J. Claudio Estaiano, 2006).

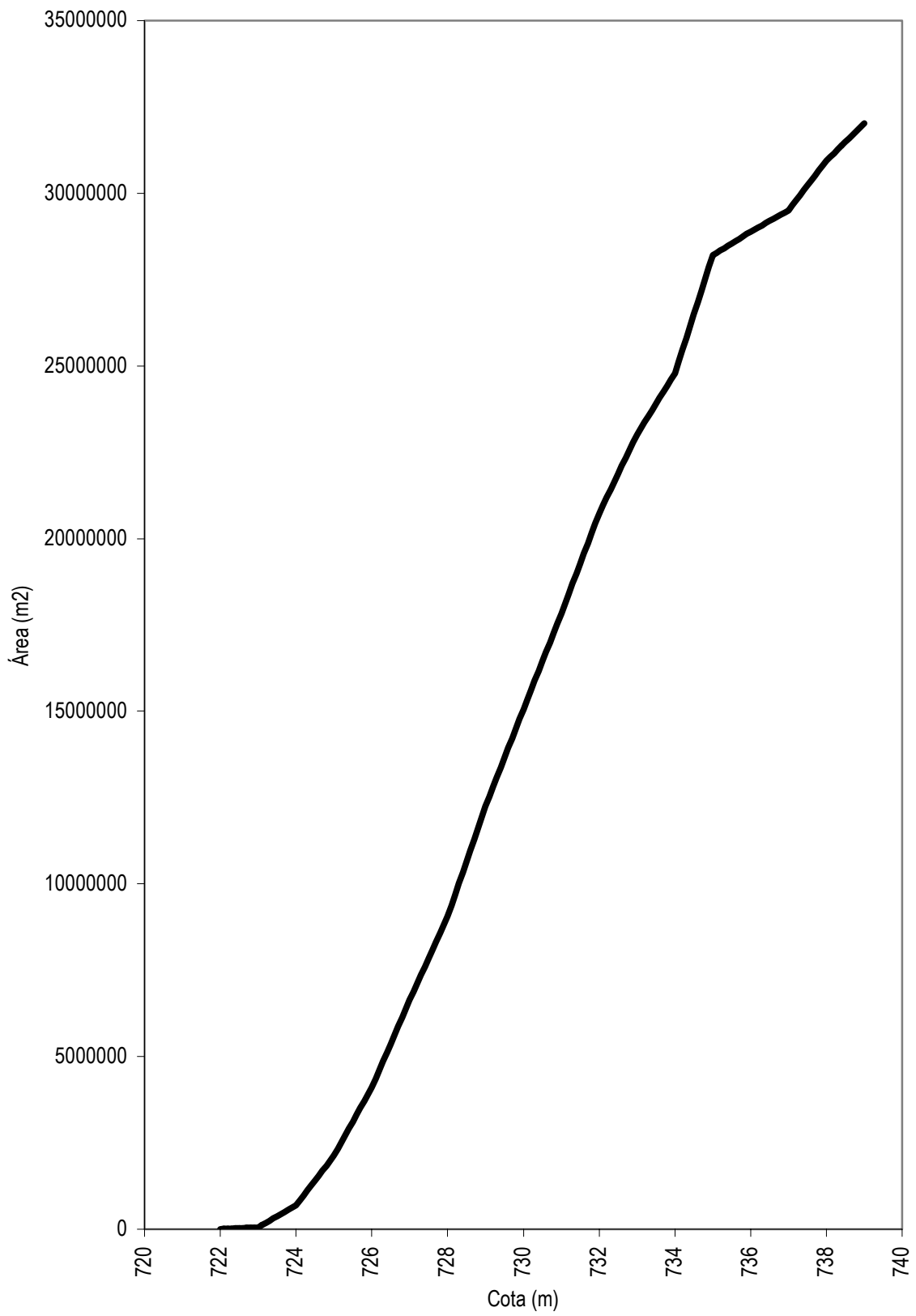


Foto 17. O local onde se encontra o automóvel é um trecho do leito da Represa Guarapiranga que ficou exposto durante o período de estiagem em 2001. (Foto: Rosiane da Silva Mateus, 2001).



Foto 18. A área apresentada é próxima à da foto anterior e mostra que o leito da represa, antes exposto, está atualmente recoberto por água. (Foto: J. Claudio Estaiano, 2006).

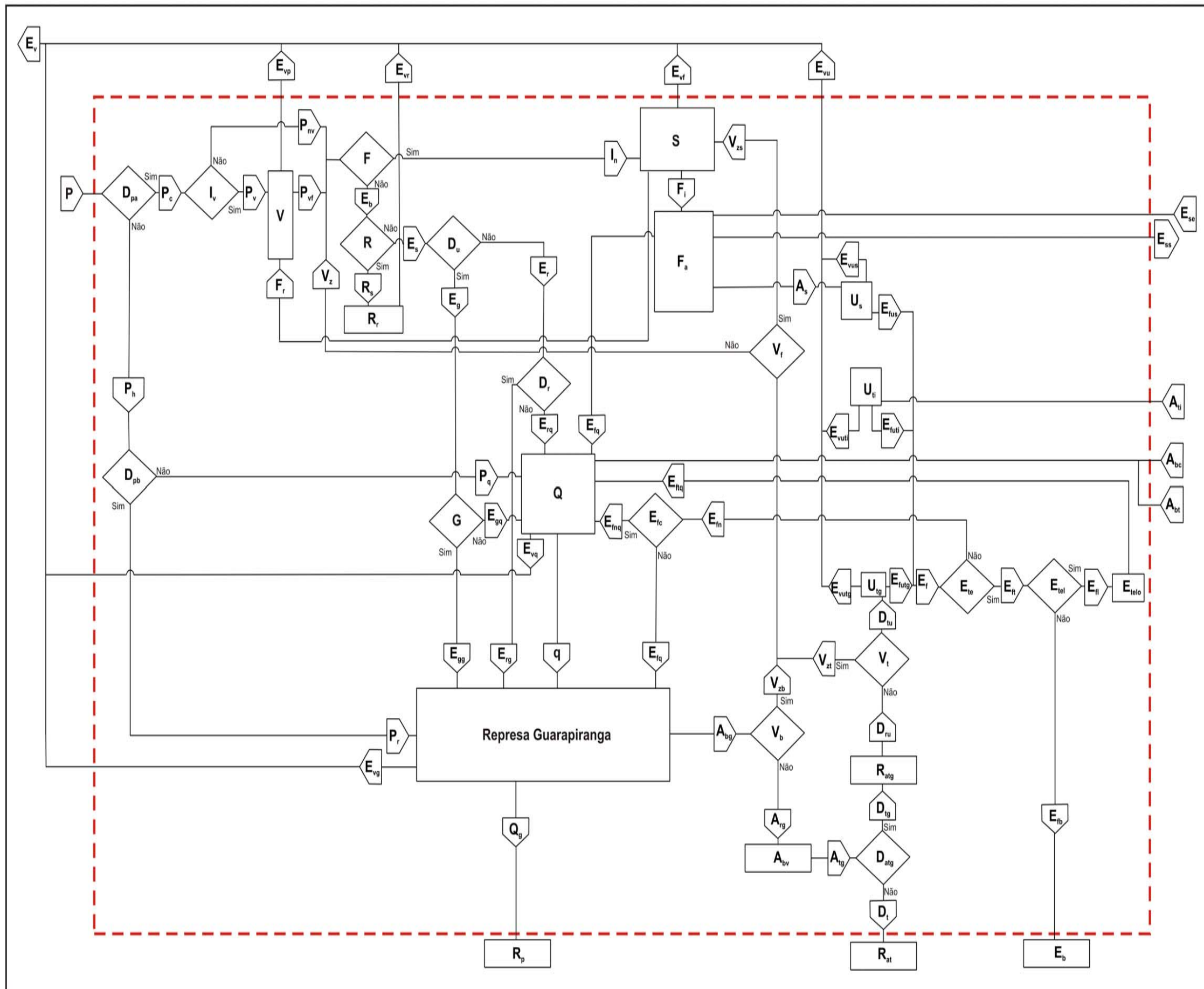
10.5. Área da Represa Guarapiranga em função do nível.



Organização: Rosiane da Silva Mateus. Fonte: EMAE.

DIAGRAMA DE FLUXOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DA REPRESA GUARAPIRANGA

LEGENDA



Fluxos hídricos	Controladores de fluxos hídricos	Armazenadores	
A_{cp}	adução de água bruta do Capivari	A_{cp}	adução de água bruta do Capivari
A_{bg}	adução de água da Represa Guarapiranga para ETAABV	A_{bg}	adução de água da Represa Guarapiranga para ETAABV
A_{ta}	adução de água bruta do Taquacetuba	A_{ta}	adução de água bruta do Taquacetuba
A_{rg}	adução real da Represa Guarapiranga para ETAABV	A_{rg}	adução real da Represa Guarapiranga para ETAABV
A_{ab}	escoamento de água tratada na ETAABV	A_{ab}	escoamento de água tratada na ETAABV
A_{si}	adução de água tratada do sistema integrado	A_{si}	adução de água tratada do sistema integrado
A_s	adução de água subterrânea	A_s	adução de água subterrânea
D_o	adução de água tratada para outras bacias	D_o	adução de água tratada para outras bacias
D_{ab}	adução de água tratada na ETAABV para reservatórios da BHG	D_{ab}	adução de água tratada na ETAABV para reservatórios da BHG
D_{us}	distribuição de água tratada para usuários da BHG	D_{us}	distribuição de água tratada para usuários da BHG
E_b	escoamento bruto	E_b	escoamento bruto
E_t	escoamento total de efluentes in natura	E_t	escoamento total de efluentes in natura
E_d	escoamento de efluente desviado para ETE Barueri	E_d	escoamento de efluente desviado para ETE Barueri
E_{el}	escoamento de efluente tratado em ETEs locais	E_{el}	escoamento de efluente tratado em ETEs locais
E_{en}	escoamento de efluentes	E_{en}	escoamento de efluentes
E_{nt}	escoamento de efluentes não tratados para os canais fluviais	E_{nt}	escoamento de efluentes não tratados para os canais fluviais
E_{st}	escoamento subterrâneo para canais fluviais	E_{st}	escoamento subterrâneo para canais fluviais
E_{tr}	escoamento de efluente para tratamento	E_{tr}	escoamento de efluente para tratamento
E_{cs}	escoamento de efluentes tratados para canais fluviais	E_{cs}	escoamento de efluentes tratados para canais fluviais
E_{us}	escoamento de efluente de usuários de água subterrânea	E_{us}	escoamento de efluente de usuários de água subterrânea
E_{ug}	escoamento de efluente dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga	E_{ug}	escoamento de efluente dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga
E_{ut}	escoamento de efluentes de usuários de água tratada do sistema integrado	E_{ut}	escoamento de efluentes de usuários de água tratada do sistema integrado
E_g	escoamento em galerias	E_g	escoamento em galerias
E_{gg}	escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga	E_{gg}	escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga
E_{gr}	escoamento de galerias para canais fluviais	E_{gr}	escoamento de galerias para canais fluviais
E_r	escoamento superficial (runoff)	E_r	escoamento superficial (runoff)
E_{rg}	escoamento superficial para Represa Guarapiranga	E_{rg}	escoamento superficial para Represa Guarapiranga
E_{rt}	escoamento superficial para a Represa Guarapiranga	E_{rt}	escoamento superficial para a Represa Guarapiranga
E_{rf}	escoamento superficial para canais fluviais	E_{rf}	escoamento superficial para canais fluviais
E_s	escoamento saído	E_s	escoamento saído
E_{se}	escoamento subterrâneo profundo de entrada	E_{se}	escoamento subterrâneo profundo de entrada
E_{sa}	escoamento subterrâneo profundo de saída	E_{sa}	escoamento subterrâneo profundo de saída
E_e	evaporação na BHG	E_e	evaporação na BHG
E_{es}	evaporação de água do solo	E_{es}	evaporação de água do solo
E_{ev}	evaporação da Represa Guarapiranga	E_{ev}	evaporação da Represa Guarapiranga
E_{evt}	evapotranspiração da vegetação na área vegetada	E_{evt}	evapotranspiração da vegetação na área vegetada
E_{ec}	evaporação dos canais fluviais	E_{ec}	evaporação dos canais fluviais
E_{er}	evaporação da retenção superficial	E_{er}	evaporação da retenção superficial
E_{eu}	evaporação dos usuários de água da BHG	E_{eu}	evaporação dos usuários de água da BHG
E_{evs}	evaporação dos usuários de água subterrânea	E_{evs}	evaporação dos usuários de água subterrânea
E_{evt}	evaporação dos usuários de água tratada do sistema integrado	E_{evt}	evaporação dos usuários de água tratada do sistema integrado
E_{evg}	evaporação dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga	E_{evg}	evaporação dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga
F_i	fluxo interno	F_i	fluxo interno
F_r	fluxo de absorção radicular na área vegetada	F_r	fluxo de absorção radicular na área vegetada
I_n	Infiltração	I_n	Infiltração
P	precipitação na BHG	P	precipitação na BHG
P_c	precipitação na área de contribuição da Represa Guarapiranga	P_c	precipitação na área de contribuição da Represa Guarapiranga
P_t	precipitação nos tributários da Represa Guarapiranga	P_t	precipitação nos tributários da Represa Guarapiranga
P_b	precipitação nos corpos hídricos da BHG	P_b	precipitação nos corpos hídricos da BHG
P_{nv}	precipitação na área não vegetada da área de contribuição	P_{nv}	precipitação na área não vegetada da área de contribuição
P_v	precipitação na área da Represa Guarapiranga	P_v	precipitação na área da Represa Guarapiranga
P_{vg}	precipitação na área vegetada da área de contribuição	P_{vg}	precipitação na área vegetada da área de contribuição
P_{vf}	precipitação final na área vegetada da área de contribuição	P_{vf}	precipitação final na área vegetada da área de contribuição
q	escoamento fluvial	q	escoamento fluvial
Q	escoamento da Represa Guarapiranga para rio Pinheiros	Q	escoamento da Represa Guarapiranga para rio Pinheiros
R_s	retenção superficial	R_s	retenção superficial
V_s	vazamento em superfície	V_s	vazamento em superfície
V_{sb}	vazamento de água bruta	V_{sb}	vazamento de água bruta
V_{st}	vazamento em subsuperfície	V_{st}	vazamento em subsuperfície
V_{stg}	vazamento de água tratada	V_{stg}	vazamento de água tratada
D_{bg}	distribuidor de água tratada da Represa Guarapiranga	D_{bg}	distribuidor de água tratada da Represa Guarapiranga
D_{pa}	distribuidor de precipitação a	D_{pa}	distribuidor de precipitação a
D_{pb}	distribuidor de precipitação b	D_{pb}	distribuidor de precipitação b
D_r	de runoff	D_r	de runoff
D_u	de drenagem urbana por galerias de água pluvial	D_u	de drenagem urbana por galerias de água pluvial
E_{nt}	de efluentes não tratados para os canais fluviais	E_{nt}	de efluentes não tratados para os canais fluviais
E_{tr}	de tratamento de efluentes	E_{tr}	de tratamento de efluentes
E_{el}	de proporção de efluentes para ETE local	E_{el}	de proporção de efluentes para ETE local
F	coeficiente de infiltração	F	coeficiente de infiltração
G	de fluxos em galerias pluviais	G	de fluxos em galerias pluviais
I_v	intercepção vegetal	I_v	intercepção vegetal
R	capacidade de retenção superficial	R	capacidade de retenção superficial
V_s	de vazamentos na adução de água bruta	V_s	de vazamentos na adução de água bruta
V_{st}	de vazamentos na rede de distribuição	V_{st}	de vazamentos na rede de distribuição
V_{stg}	de direção de fluxos de vazamentos na rede de distribuição	V_{stg}	de direção de fluxos de vazamentos na rede de distribuição
A_{bg}	Estação de Tratamento Alto da Boa Vista	A_{bg}	Estação de Tratamento Alto da Boa Vista
E_{ab}	Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri	E_{ab}	Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri
E_{ut}	Estação de Tratamento de Esgoto Local	E_{ut}	Estação de Tratamento de Esgoto Local
F_s	estoque de água no aquífero	F_s	estoque de água no aquífero
Q	estoque nos canais fluviais	Q	estoque nos canais fluviais
R_s	estoque retido em superfícies	R_s	estoque retido em superfícies
R_{rg}	reservatórios de água tratada em outras regiões da RMSP	R_{rg}	reservatórios de água tratada em outras regiões da RMSP
R_{ug}	reservatórios de água tratada na BHG	R_{ug}	reservatórios de água tratada na BHG
R_p	Rio Pinheiros	R_p	Rio Pinheiros
S	estoque de água no solo	S	estoque de água no solo
U_{rg}	reservatórios dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga	U_{rg}	reservatórios dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga
U_{ut}	reservatórios dos usuários de água tratada do sistema integrado	U_{ut}	reservatórios dos usuários de água tratada do sistema integrado
U_s	reservatórios dos usuários de água subterrânea	U_s	reservatórios dos usuários de água subterrânea
V	estoque na vegetação	V	estoque na vegetação
- - - - -	Limite da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga	- - - - -	Limite da Bacia Hidrográfica da Represa Guarapiranga

Anexo 10.2. Componentes do Modelo Hidrológico da BHG

Natureza	Símbolo	Definição	Unidade de Medida	Variável / Constante	Valor numérico ou função	Função ou Técnica para determinar	Fonte primária
Controlador	A_{rg}	área da Bacia da Represa Guarapiranga	m^2	Constante	613132962,8	Cartográfica	Programa Guarapiranga, 2000
Controlador	A_t	área dos tributários da Represa Guarapiranga	m^2	Constante	Desprezível	Cartográfica	Programa Guarapiranga, 2000
Controlador	A_r	área da Represa Guarapiranga	m^2	Variável	Valores tabelados (anexo 10.5)	Função do nível da Rep. Guarap. no dia	EMAE
Controlador	A_c	área de contribuição da Represa Guarapiranga	m^2	Variável	$A_c = A_g - A_t - A_r$	Modelo	
Controlador	A_v	área vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga	m^2	Constante	524234052,4	Cartográfica	Programa Guarapiranga, 2000
Controlador	A_{nv}	área não vegetada da área de contribuição da Represa Guarapiranga	m^2	Constante	94881214,73	Cartográfica	Programa Guarapiranga, 2000
Controlador	D_{p1}	distribuidor de precipitação 1	adim	Variável	$D_{p1} = A_c / A_g$	Modelo	
Controlador	D_{p2}	distribuidor de precipitação 2	adim	Variável	$D_{p2} = A_t / A_r$	Modelo	
Controlador	I_v	interceptação vegetal	adim	Variável	$I_v = A_v / A_c$	Modelo	
Controlador	$A_{(u)}$	área representada pelo posto u	m^2	Constantes	Valores tabelados (Figura 24)	Cartográfica - Método de THIESSSEN	DAEE
Insumo	$P_{(u)}$	precipitação nos postos u { 1 =< u =< ? }	m^3/dia	Variável	Valores tabelados	Medida instrumental	DAEE
Fluxo hídrico	P	precipitação na Bacia da Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$P = \text{Soma}(A_{(u)} * P_{(u)})$	Método de THIESSSEN	DAEE
Fluxo hídrico	P_h	precipitação nos corpos hídricos da BHG	m^3/dia	Variável	$P_h = P * A_t$	Modelo	
Fluxo hídrico	P_q	precipitação nos canais fluviais	m^3/dia	Variável	Desprezível	Modelo	
Fluxo hídrico	P_r	precipitação na área da Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$P_r = P * A_r$	Modelo	
Fluxo hídrico	P_c	precipitação na área de contribuição da Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$P_c = P * A_c$	Modelo	
Fluxo hídrico	P_{nv}	precipitação na área não vegetada da área de contribuição	m^3/dia	Variável	$P_{nv} = P * A_{nv}$	Modelo	
Fluxo hídrico	P_v	precipitação na área vegetada da área de contribuição	m^3/dia	Variável	$P_v = P * A_v$	Modelo	
Fluxo hídrico	P_{vf}	precipitação final na área vegetada	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{vp}	evapotranspiração da vegetação na área vegetada	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	F_r	fluxo de absorção radicular na área vegetada	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Armazenador	$V(x)$	Estoque na vegetação	m^3	Variável	$V_{(x)} = V_{(x-1)} + P_v + F_r - P_{vf} - E_{vp}$	Modelo	
Fluxo hídrico	V_z	vazamento em superfície	m^3/dia	Variável		Estimativa	HIRATA, 2001
Insumo	C	coeficiente de escoamento	adim	Constante	Valores tabelados (Figura 22)	Tabela Pruski, 2004	PRUSKI, 2004
Controlador	F	coeficiente de infiltração	adim	Constante	Valores tabelados (Figura 25)	Tabela Pruski, 2004	PRUSKI, 2004
Fluxo hídrico	I_n	infiltração	m^3/dia	Variável	$I_n = f(P_{nv} + P_{vf} + V_z)$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_b	escoamento bruto	m^3/dia	Variável	$E_b = P_{nv} + P_{vf} + V_z - I_n$	Modelo	
Controlador	R	capacidade de retenção superficial				Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_s	escoamento saldo	m^3/dia	Variável	$E_s = E_b - R_s$	Modelo	
Fluxo hídrico	R_s	fluxo de retenção superficial	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{vr}	evaporação da retenção superficial	m^3/dia	Variável		Considerado Resíduo	
Armazenador	R	Estoque retido em superfície	m^3	Variável	$R_{(x)} = R_{(x-1)} + R_s - E_{vr}$	Sustituído por simplificação	
Controlador	D_u	controlador de drenagem urbana por galerias de água pluvial	adim	Constante	Determinar valor	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_g	escoamento em galerias	m^3/dia	Variável	$E_g = D_u * E_s$	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_r	escoamento superficial (runnof)	m^3/dia	Variável	$E_r = E_s - E_g$	Sustituído por simplificação	
Controlador	G	controlador de fluxos em galerias pluviais	adim	Constante	Determinar valor	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{gq}	escoamento de galerias para canais fluviais	m^3/dia	Variável	$E_{gq} = G * E_g$	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{gg}	escoamento de galerias para a Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$E_{gg} = E_g - E_{gq}$	Sustituído por simplificação	
Armazenador	G	Galerias Pluviais	m^3	Variável		Sustituído por simplificação	
Controlador	D_r	controlador de runnof	adim	Constante	Determinar valor	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{rq}	escoamento superficial para canais fluviais	m^3/dia	Variável	$E_{rq} = D_r * E_r$	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{rg}	escoamento superficial para a Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$E_{rg} = E_r - E_{rq}$	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{vf}	evaporação de água do solo	m^3/dia	Variável		Considerado Resíduo	
Armazenador	S	Estoque de água no solo	m^3	Variável	$S_{(x)} = S_{(x-1)} + I_n + V_z - F_i - F_r - E_{vf}$	Modelo	
Fluxo hídrico	F_i	fluxo interno	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	

Fluxo hídrico	E_{fq}	escoamento subterrâneo para canais fluviais	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	A_s	adução de água subterrânea	m^3/dia	Variável		Estimativa	HIRATA, 2001
Fluxo hídrico	E_{ss}	escoamento subterrâneo profundo de saída	m^3/dia	Variável	0	Suposto desprezível ou inexistente	
Fluxo hídrico	E_{se}	escoamento subterrâneo profundo de entrada	m^3/dia	Variável	0	Suposto desprezível ou inexistente	
Armazenador	F_a	Estoque de água no subsolo	m^3	Variável	$F_{a(x)} = F_{a(x-1)} + I_n + E_{se} - E_{ss} - E_{fq} - E_{vf} - A_s$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{vus}	evaporação dos usuários de água subterrânea	m^3/dia	Variável		Considerado Resíduo	
Fluxo hídrico	E_{fus}	escoamento de efluentes de usuários de água subterrânea	m^3/dia	Variável	$E_{fus} = A_s$	Se $E_{vus} = 0$ então $E_{fus} = A_s$	
Armazenador	U_s	Reservatórios dos Usuários de Água Subterrânea	m^3	Variável	$U_{s(x)} = U_{s(x-1)} + A_s - E_{fus} - E_{vus}$	Modelo	
Fluxo hídrico	A_{ti}	adução de água tratada do sistema integrado	m^3/dia	Variável	Valores tabelados	Registro operacional	EMAE
Fluxo hídrico	E_{vuti}	evaporação dos usuários de água tratada do sistema integrado	m^3/dia	Variável		Considerado Resíduo	
Fluxo hídrico	E_{futi}	escoamento de efluentes de usuários de água tratada do sistema integrado	m^3/dia	Variável	$E_{vuti} = A_{ti}$	Se $E_{futi} = 0$ então $E_{vuti} = A_{ti}$	
Armazenador	U_{ti}	Reservatórios dos usuários de água tratada do Sistema Integrado	m^3	Variável	$U_{ti(x)} = U_{ti(x-1)} + A_{ti} - E_{futi} - E_{vuti}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{fn}	escoamento de efluentes	m^3/dia	Variável		Sustituído por simplificação	
Controlador	E_{fc}	controlador de efluentes não tratados para os canais fluviais	adim	Constante	Determinar valor	Sustituído por simplificação	
Fluxo hídrico	E_{fg}	escoamento de efluentes não tratados para a Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$E_{fg} = E_{fc} * E_{fn}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{fnq}	escoamento de efluentes não tratados para os canais fluviais	m^3/dia	Variável	$E_{fnq} = E_{fn} - E_{fg}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{ftq}	escoamento de efluentes tratados para os canais fluviais	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	A_{bt}	adução de água bruta do Taquacetuba	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	A_{bc}	adução de água bruta do Capivari	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	E_{vq}	evaporação dos canais fluviais	m^3/dia	Variável	$E_{vq} = e * A_t$	Modelo	
Fluxo hídrico	$q(a)$	vazão diária dos tributários a da Represa Guarapiranga {1=< a =< 5}	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro instrumental	SABESP DAEE?
Fluxo hídrico	q	escoamento fluvial	m^3/dia	Variável	$q = \text{soma}(q_{(a)})$	Modelo	
Armazenador	Q	Estoque nos canais fluviais	m^3	Variável	$A_{bt} - q - E_{vq}$	Modelo	
Insumo	e	evaporação no tanque	m / dia	Variável	Valores Tabelados	Registro instrumental	SABESP
Fluxo hídrico	E_{vg}	evaporação da Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável	$E_{vg} = e * A_r$	Modelo	
Fluxo hídrico	A_{bg}	adução de água da Represa Guarapiranga para ETA ABV	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	Q_g	escoamento da Represa Guarapiranga para o Rio Pinheiros	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	EMAE
Insumo	n	nível da Represa Guarapiranga	m	Variável	Valores Tabelados	Registro instrumental	SABESP
Armazenador	G	Estoque na Represa Guarapiranga	m^3	Variável	$G = (1,45n^2 - 2108,82n + 764621,55) * 10^6$ $G_{(x)} = G_{(x-1)} + q + P_r + E_{gg} + E_{rg} + E_{tg} - A_{bg} - E_{vg} - Q_g$	Modelo de regressão	EMAE
Fluxo hídrico	A_g	adução real da Represa Guarapiranga para ETA ABV	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	A_{tg}	escoamento de água tratada na ETA ABV	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Armazenador	A_{bv}	Estação de Tratamento Alto da Boa Vista	m^3	Variável	$A_{bv(x)} = A_{bv(x-1)} + A_g - A_{tg}$	Modelo	
Controlador	D_{at}	distribuidor de água tratada da Represa Guarapiranga	adim	Variável	$D_{at} = D_{tg} / A_{tg}$	Modelo	SABESP
Fluxo hídrico	D_{tg}	adução de água tratada na ETA ABV para reservatórios da BHG	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Armazenador	R_{atg}	Reservatórios de água tratada na BHG	m^3	Variável	$R_{atg(x)} = R_{atg(x-1)} + D_{tg} - D_{ru}$	Modelo	
Fluxo hídrico	D_t	adução de água tratada para outras bacias hidrográficas	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Armazenador	R_{at}	Reservatórios de água tratada em outras regiões da RMSP	m^3	Variável	Este total é Irrelevante para a pesquisa	Este total é Irrelevante para a pesquisa	
Fluxo hídrico	D_{tu}	adução de água tratada na BHG	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Fluxo hídrico	E_{vutg}	evaporação dos usuários de água tratada da Represa Guarapiranga	m^3/dia	Variável		Considerado Resíduo	
Fluxo hídrico	E_{futg}	escoamento de efluente dos usuários de água tratada na BHG	m^3/dia	Variável	$E_{futg} = D_{tu}$	se $E_{vutg} = 0$ então $E_{futg} = D_{tu}$	
Armazenador	U_{tg}	Reservatórios dos usuários de água tratada na BHG	m^3	Variável	$U_{tg(x)} = U_{tg(x-1)} + D_{tu} - E_{vutg} - E_{futg}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_f	escoamento total de efluente <i>in natura</i>	m^3/dia	Variável	$E_f = E_{futg} + E_{futi} + E_{fus}$	Modelo	
Controlador	E_{te}	tratamento de efluentes	adim	Variável	$E_{te} = E_{ft} / E_f$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{ft}	escoamento de efluente para tratamento	m^3/dia	Variável		Estimativa	SABESP
Controlador	E_{tel}	controlador da proporção de efluentes para ETE local	adim	Variável	$E_{tel} = E_{fl} / E_{ft}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{fl}	escoamento de efluente tratado em ETEs locais	m^3/dia	Variável	Valores Tabelados	Registro operacional	SABESP
Armazenador	E_{tel}	Estação de Tratamento de Esgoto Local	m^3	Variável	$E_{tel(x)} = E_{tel(x-1)} + E_f - E_{fb}$	Modelo	
Fluxo hídrico	E_{fb}	escoamento de efluente desviado para a ETE Barueri	m^3/dia	Variável		Estimativa	SABESP

Armazenador	E_b	Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri	m^3	Variável	Este total é Irrelevante para a pesquisa	Este total é Irrelevante para a pesquisa
Fluxo hídrico	E_v	evaporação na Bacia Hidrográfica do Guarapiranga (BHG)	m^3/dia	Variável	Este total é Irrelevante para a pesquisa	Este total é Irrelevante para a pesquisa
Fluxo hídrico	E_{vu}	evaporação dos usuários de água na BHG	m^3/dia	Variável	Este total é Irrelevante para a pesquisa	Considerado Resíduo
Armazenador	R_p	Rio Pinheiros	m^3	Variável	Este total é Irrelevante para a pesquisa	Este total é Irrelevante para a pesquisa
Controlador	V_b	controlador de vazamentos na adução de água bruta	adim	Variável		
Controlador	V_t	controlador de vazamentos na rede de distribuição	adim	Variável		
Controlador	V_f	controlador de direção de fluxos de vazamentos na rede de distribuição	adim	Variável		
Fluxo hídrico	V_{zb}	vazamento de água bruta	m^3/dia	Variável	Estimativa	SABESP
Fluxo hídrico	V_{zs}	vazamento em subsuperfície	m^3/dia	Variável	Estimativa	SABESP
Fluxo hídrico	V_{zt}	vazamento de água tratada	m^3/dia	Variável	Estimativa	SABESP