

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**ANÁLISE INTEGRADA DE USOS DE ÁGUA SUPERFICIAL E SUBTERRÂNEA EM
MACRO-ESCALA NUMA BACIA HIDROGRÁFICA:
O CASO DO ALTO RIO PARANAÍBA**

FERDNANDO CAVALCANTI DA SILVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Walter Collischonn

Banca Examinadora:

Dr. Luciano Meneses Cardoso da Silva	ANA
Profa. Dra. Jussara Cabral Cruz	UFSM
Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira	IPH/UFRGS

Porto Alegre, junho de 2007

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental sob a orientação do Prof. Dr. Walter Collischonn do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

*Não é apropriado ver como separadas
coisas que não se podem distinguir.*

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pela excelente estrutura e pelo ambiente favorável à pesquisa.

Ao professor Walter Collischonn, pela sugestão do tema, pelo entusiasmo em transmitir seus ensinamentos, pela atenção, paciência e por verdadeiramente me orientar nesse trabalho.

Aos membros da banca: Dr. Luciano Meneses, Dra. Jussara Cabral e Dr. André Silveira pelas valiosas contribuições e discussões à versão final desse trabalho.

Aos professores Beatriz Camaño, Carlos André, Alfonso Risso e Joel Goldenfum pelos ensinamentos passados e, por extensão, aos demais professores do IPH.

Ao professor Tucci, pelos ensinamentos nas disciplinas e pelas lições de sua experiência, as quais não se encontram nos livros.

Ao Dr. Leonardo Mitre da ANA pela atenção dispensada aos meus questionamentos por e-mail e ao envio de material quanto aos usos outorgados na bacia em estudo.

Ao professor Hartmut Wittenberg da Universidade de Lueneburg, Alemanha, pelas sugestões e comentários quanto ao uso das formulações linear e não-linear do reservatório subterrâneo em modelos hidrológicos.

À Márcia e a Nadir pela atenção e ajuda com os assuntos da pós.

Ao pessoal da biblioteca do IPH, pelo pronto atendimento e atenção dispensada.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudo.

À cidade de Porto Alegre e ao Estado do Rio Grande do Sul, pela boa acolhida.

Aos professores da UFPB, Ana Cristina Taigy, Clóvis Dias, Carmem Gadelha, Alain Passerat de Silans, Hamilcar Filgueira, Tarciso Cabral e, em especial, Celso Guimarães, por terem tido papel fundamental na minha formação como Engenheiro Civil e pelo incentivo na minha vinda a Porto Alegre.

Ao conterrâneo Adriano Rolim, por me receber e me dar abrigo à época de minha chegada, pelas dicas e pela sempre prestativa ajuda nas disciplinas e, principalmente, com o MGB-IPH.

A Alana, amiga paraibana que conheci em Porto Alegre, pela ajuda nos meus primeiros meses na cidade e pelo incentivo nas horas difíceis.

Ao amigo Christopher Freire, pelas conversas, ensinamentos, questionamentos e incentivo, que me fizeram (e ainda fazem) amadurecer como profissional e também como pessoa, e pelas sugestões e paciência em ler a dissertação.

À grande amiga Lidiane Gonçalves, a Lidi, cuja amizade levarei e mantereí comigo em qualquer lugar e tempo.

Aos amigos Adalberto Meller e Enio Arriero Shinma, pelos melhores momentos vividos em Porto Alegre.

Ao amigo Fernando Dornelles, pelas discussões de disciplina, da dissertação, pela confiança e acolhida nos meus últimos meses em Porto Alegre.

A Tatiana e Fernando, casal arretado, pelos conselhos e amizade construída nesse curto espaço de tempo.

A Claudinéia (Néia), pela amizade e por fazer da sala de hidrologia um divertido ambiente de trabalho.

Aos colegas do IPH: Othon Fialho, Eduardo Puhl, Teresa, Regina, Ruberto, Ane, Elba, Dante, Chico, Angélica, Daniel, Ruti, Leandro, Diogo e, em especial, ao Bruno Collischonn, pela ajuda com o MGB, e ao Juan Martin, pelas dicas de programação.

Aos demais colegas de Porto Alegre, Dani, Sidnei, Karina, Marcos, Franci e Nilson.

Ao amigo Simon Alexandre, pela amizade e tantas conversas divertidas e culturais até altas horas na Internet - grazie, mio fratello.

A Eulina Maria e seus pais, seu Moura e dona Graça, pela amizade, confiança, incentivo e pelas tantas palavras construtivas.

Aos sempre amigos de João Pessoa: Zé Roberto, Jonathan Colaço, Débora Queiroga, Aline Figueiredo, Guto, Kiara, Alane Barbosa, Carlinhos, Nalygia, Aycé, Do Bu, Sidarta e Nacib, presentes mesmo a tanta distância.

A toda minha família, pela sempre calorosa recepção quando de minhas idas para casa; pessoas que sempre torcem por mim.

A minha segunda família, Valdízia, Nalvinha e Tomé (em memória), meus cunhados Cibele, Zanine, Ítalo e minha princesinha Mamá.

A meus pais, Fernando e Dora, pela confiança, pelo apoio na minha vinda a Porto Alegre e em todos os momentos de minha vida, pessoas com as quais sei que sempre poderei contar; e a minha irmã, Ferdnanda, pelo amor e carinho.

E, por fim, a Can, mulher da minha vida, pela paciência, pela compreensão, pelo incentivo, pelo amor, sem os quais eu não conseguiria ter chegado até aqui, e a quem dedico esse trabalho.

*Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós.
Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.*

Antoine de Saint-Exupery.

RESUMO

A gestão integrada dos recursos hídricos constitui um dos fundamentos da lei 9.433/97, que considera a unidade do ciclo hidrológico como requisito necessário ao estabelecimento de critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos. No entanto, na prática do gerenciamento das alocações de água no Brasil, a interdependência entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos não é considerada, devido, principalmente, à falta de informações hidrogeológicas nas bacias e aos aparatos institucionais das autoridades outorgantes terem sempre sido mais voltados à gestão das águas superficiais. Além disso, o conhecimento científico nessa área ainda é escasso, especialmente quanto a estudos que abordem o uso integrado das águas na escala da bacia hidrográfica. Neste trabalho foi realizada uma análise integrada de retiradas de água superficial e subterrânea em uma bacia hidrográfica, utilizando um modelo hidrológico distribuído de simulação de processos de transformação chuva-vazão em grande escala. Diferentes cenários de usos foram simulados e, por meio deles, foram geradas curvas relacionando máximos percentuais de uso de água superficial e subterrânea com seus impactos sobre as vazões mínimas no rio, a partir das quais, se podem definir possíveis limites para outorga integrada de recursos hídricos na escala das bacias hidrográficas. O estudo de caso foi aplicado na bacia do Alto Rio Paranaíba, afluente do Rio Paraná, em Minas Gerais, e os resultados mostraram que a máxima quantidade de água subterrânea que poderia ser retirada na bacia é inferior à recarga estimada do aquífero, para um nível de impacto sobre a vazão no rio atualmente considerado aceitável de acordo com a legislação.

ABSTRACT

Integrated water resources management is the basis for law no. 9433/97, which is known as the National Water Policy. According to that law, the whole hydrologic cycle should be taken in consideration when defining water rights. However, in Brazilian water use allocation practice, surface water and groundwater interaction is not considered due to the lack of hydrogeological information on watersheds and to the water agencies focus on surface water management. Furthermore, scientific knowledge on this subject is still scarce especially on water integrated use in the large-scale. This study aims to analyze surface water and groundwater integrated use in a basin through a rainfall-runoff distributed hydrological model. Different withdrawal scenarios were simulated and curves relating surface water and groundwater use and its impacts on river minimum flows were obtained. These curves may support withdrawal threshold definition in the macro-scale. A case study was applied in the Upper Paranaíba river basin, a tributary of Paraná river in the State of Minas Gerais. Results showed that maximum groundwater withdrawal in the basin should be less than estimated aquifer recharge.

SUMÁRIO

	pág.
Lista de símbolos	vii
Lista de abreviaturas	x
Lista de equações	xii
Lista de tabelas e quadros	xiv
Lista de figuras	xv
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 - Justificativa e relevância do estudo	2
1.2 - Objetivos	3
1.3 - Organização do texto	3
Capítulo 2: Abordagem hidrológica integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos	5
2.1 - Águas superficiais e subterrâneas	6
2.2 - Interação entre águas superficiais e subterrâneas	7
2.2.1. - O balanço hídrico subterrâneo	8
2.2.2. - Mecanismos contribuintes nos corpos hídricos superficiais	11
2.2.3. - Fatores físicos intervenientes na interação entre águas superficiais e subterrâneas	13
2.2.4. - Relações entre corpos hídricos superficiais e as águas subterrâneas	17
2.2.5. - Significado ecológico das interações entre águas superficiais e subterrâneas	21
2.3 - Impactos antrópicos nas águas subterrâneas	22
2.4 - Escalas de análise das interações entre águas superficiais e subterrâneas	24
2.5 - Métodos de análise de vazões mínimas	27
2.5.1. - Curva de permanência	28
2.5.2. - Curva de frequência de vazões mínimas	29
2.5.3. - Separação do escoamento em hidrogramas	30
2.5.4. - Curvas de recessão	32
Capítulo 3: Gestão integrada de outorgas de direito de uso de recursos hídricos	33
3.1 - Outorga de águas superficiais e subterrâneas	33
3.2 - Análise das outorgas emitidas no Brasil	38
Capítulo 4: Adequabilidade de modelos simplificados na representação de aquíferos	42
4.1 - Modelos hidrológicos	42
4.2 - Representação de aquíferos em modelos hidrológicos	44
Capítulo 5: Metodologia	52
5.1 - O modelo MGB-IPH	53
5.1.1. - Balanço de água no solo	55
5.1.2. - Escoamento na célula	58
5.1.3. - Propagação na rede de drenagem	61
5.1.4. - Representação das retiradas de água	62
5.2 - Dados de entrada no modelo	63
5.3 - Calibração e verificação do modelo	65
5.4 - Definição dos cenários de retiradas de água	67
5.4.1. - Primeiro cenário	67

5.4.2. - Segundo cenário	68
5.5 - Curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos	73
Capítulo 6: Aplicação na bacia do alto rio Paranaíba	75
6.1 - Caracterização fisiográfica e hidrológica da bacia	75
6.2 - Usos dos recursos hídricos na bacia	81
6.3 - Simulação dos processos hidrológicos na bacia	84
6.3.1. - Discretização	84
6.3.2. - Dados de entrada	85
6.3.3. - Calibração dos parâmetros	87
6.3.4. - Verificação dos parâmetros	91
6.4 - Curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos	94
6.4.1. - Simulações na bacia do Alto Rio Paranaíba	95
6.4.2. - Generalização das curvas de outorga integrada	110
Capítulo 7: Conclusões e recomendações	117
7.1 - Conclusões gerais	117
7.2 - Recomendações	120
Referências bibliográficas	123
Anexo A: Dedução matemática do parâmetro CB e CB'	A.01
Anexo B: Usos da água outorgados pelo IGAM na bacia do Alto Paranaíba	B.01
Anexo C: Arquivo de entrada principal no modelo – Cell.hig	C.01
Anexo D: Resumo anual das análises dos postos pluviométricos	D.01
Anexo E: Características dos dados e relação dos postos climatológicos	E.01
Anexo F: Valores dos parâmetros fixos usados no modelo	F.01
Anexo G: Resultado das combinações de retirada de água	G.01

LISTA DE SÍMBOLOS

α	parâmetro de lâmina de interceptação
β	parâmetro de potência do reservatório não-linear
λ	calor latente de vaporização
γ	constante psicrométrica
ρ_A	massa específica do ar
ρ_w	massa específica da água
Δ	taxa de variação da pressão de saturação do vapor
Δt	passo de tempo de cálculo
a	parâmetro do reservatório não-linear
b	parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco
c	constante de proporcionalidade
c_p	calor específico do ar úmido
CB	parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo linear
CB'	parâmetro do reservatório subterrâneo não-linear
C_s	parâmetro para calibração da propagação superficial nas células
C_l	parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células
C1, C2 e C3	coeficiente do método de Muskingun-Cunge
CR	ascensão capilar (capillary rise)
$D_{sup_{i,j}}$	drenagem superficial no bloco j da célula i
$D_{int_{i,j}}$	drenagem sub-superficial no bloco j da célula i
$D_{bas_{i,j}}$	drenagem subterrânea no bloco j da célula i
e	número neperiano
e_d	pressão do vapor
e_s	pressão de saturação do vapor
E	taxa de evaporação da água
$E_{i,j}$	evapotranspiração no bloco j da célula i
ET	Evapotranspiração
G	fluxo de energia para o solo
G_{in}	entrada de água subterrânea
G_{out}	saída de água subterrânea
\bar{h}	elevação média do nível do reservatório subterrâneo

i	linha genérica da malha numérica
IAF_j	índice de área foliar
j	coluna genérica da malha numérica
k	tempo de residência médio do reservatório subterrâneo
K	constante de recessão
	parâmetro de tempo do método Muskingun-Cunge
K_{BAS}	parâmetro de escoamento subterrâneo
K_{INT}	parâmetro de escoamento sub-superficial
L	largura do aquífero
P	precipitação
$P_{i,j}$	precipitação menos a interceptação no bloco j da célula i
PC_i	precipitação sobre a cobertura vegetal em qualquer bloco da célula i
$P_{i,j}$	precipitação sobre a camada superficial do solo no bloco j da célula i
q_r	descarga por unidade de comprimento do reservatório subterrâneo
Q	vazão
Q_o	vazão no início da recessão no reservatório subterrâneo
Q_t	vazão no tempo t
Q_{cal}	vazão calculada
Q_{obs}	vazão observada
Q_{cel}	vazão de saída da célula
Q_{SUP}	vazão de saída do reservatório superficial
Q_{INT}	vazão de saída do reservatório sub-superficial
Q_{BAS}	vazão de saída do reservatório subterrâneo
Q_{Total}	vazão total de saída da bacia ou <i>runoff</i>
Q_{GW}	descarga subterrânea nos corpos superficiais
QR_S^{t+1}	vazão de saída do trecho de rio no intervalo $t+1$
QR'_S	vazão de saída do trecho de rio no intervalo t
QR_e^{t+1}	vazão de entrada do trecho de rio no intervalo $t+1$
QR'_e	vazão de entrada do trecho de rio no intervalo t
r_a	resistência aerodinâmica
r_s	resistência superficial
R_L	radiação líquida na superfície

R_I	recarga por infiltração (percolação)
R_{SW}	recarga por corpos superficiais
ΔS	variação no armazenamento
S	armazenamento
S'	capacidade específica de um aquífero não-confinado
$SF_{i,j}^k$	lâmina interceptada ao final do intervalo de tempo no bloco j da célula i
$SF_{i,j}^{k-1}$	lâmina interceptada no início do intervalo de tempo no bloco j da célula i
SIL_j	capacidade do reservatório de interceptação do bloco j de qualquer célula
t	tempo
TK_S	parâmetro de retardo do reservatório superficial
TK_I	parâmetro de retardo do reservatório sub-superficial
TK_B	parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo
V_{SUP}	volume no reservatório superficial
V_{INT}	volume no reservatório sub-superficial
V_{BAS}	volume no reservatório subterrâneo
W	armazenamento na camada do solo
W_c	limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo
W_m	armazenamento máximo na camada do solo
W_z	limite de armazenamento para haver escoamento sub-superficial
$W_{i,j}^{k-1}$	armazenamento na camada do solo ao início do intervalo de tempo
$W_{i,j}^k$	armazenamento na camada do solo ao final do intervalo de tempo
x	direção no plano horizontal
X	peso da integração da vazão no espaço no método de Muskingun-Cunge
XL	índice de porosidade do solo
y	direção no plano horizontal
z	direção perpendicular ao plano horizontal

LISTA DE ABREVIATURAS

AAGISA-PB	Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba
AESA-PB	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
DAEE-SP	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
BFI	<i>baseflow index</i>
CGIAR-CSI	<i>Consortium for Spatial Information</i>
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IAF	índice de área foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IGARF	<i>Impact of Groundwater in River Flows</i>
IGARN	Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IWMI	<i>International Water Management Institute</i>
GIS	<i>Geographic Information Systems</i>
GRAPES	<i>Groundwater and River resources Action Program at a European Scale</i>
GWP	<i>Global Water Partnership</i>
MGB	Modelo de Grandes Bacias
MMA	Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MOCOM-UA	<i>Multiple-Objective Complex Evolution – University of Arizona</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NATURATINS-TO	Instituto Natureza do Estado do Tocantins
PDM	<i>Probability Distributed Model</i>
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SEMAR-PI	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais - PI
SEMARH-GO	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás

SEPLANTEC-SE	Secretaria de Estado do Planejamento -SE
SERHID-RN	Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos -RN
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRH-BA	Superintendência de Recursos Hídricos - BA
SRH-CE	Secretaria dos Recursos Hídricos - CE
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SUDERHSA-PR	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – PR
TM	<i>Thematic Mapper</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1: Balanço hídrico em uma bacia hidrográfica	08
Equação 2.2: Balanço hídrico do aquífero	09
Equação 2.3: Curva de recessão exponencial	32
Equação 4.1: Reservatório linear	46
Equação 4.2: Curva de recessão em função das características do aquífero I	47
Equação 4.3: Curva de recessão em função das características do aquífero II	47
Equação 4.4: Reservatório não-linear	48
Equação 5.1: Balanço de água no solo	55
Equação 5.2: Relação entre a capacidade de interceptação e o IAF	56
Equação 5.3: Regra de esvaziamento do reservatório de interceptação – eq. 1	56
Equação 5.4: Regra de esvaziamento do reservatório de interceptação – eq. 2	56
Equação 5.5: Regra de esvaziamento do reservatório de interceptação – eq. 3	56
Equação 5.6: Penmann-Monteith	57
Equação 5.7: Cálculo do escoamento superficial – eq. 1	57
Equação 5.8: Cálculo do escoamento superficial – eq. 2	57
Equação 5.9: Cálculo da condição δ	57
Equação 5.10: Cálculo do escoamento sub-superficial	58
Equação 5.11: Cálculo do escoamento subterrâneo	58
Equação 5.12: Vazão do reservatório linear superficial	59
Equação 5.13: Vazão do reservatório linear sub-superficial	59
Equação 5.14: Vazão do reservatório linear subterrâneo	59
Equação 5.15: Vazão do reservatório não-linear subterrâneo	59
Equação 5.16: Tempo de retardo do reservatório subterrâneo	59
Equação 5.17: Cálculo do parâmetro CB	60
Equação 5.18: Cálculo do parâmetro CB' – fórmula geral	60
Equação 5.19: Cálculo do parâmetro CB' – fórmula para $\beta = 0,5$	60
Equação 5.20: Volume armazenado no reservatório superficial	60
Equação 5.21: Volume armazenado no reservatório sub-superficial	61
Equação 5.22: Volume armazenado no reservatório subterrâneo	61
Equação 5.23: Vazão de saída na célula	61
Equação 5.24: Propagação na rede de drenagem	61

Equação 5.25: Determinação do coeficiente C_1	62
Equação 5.26: Determinação do coeficiente C_2	62
Equação 5.27: Determinação do coeficiente C_3	62
Equação 5.28: Coeficiente de Nash-Sutcliffe	66
Equação 5.29: Coeficiente de Nash-Sutcliffe logaritmizado	66
Equação 5.30: Erro de volume	66
Equação 5.31: Cálculo da vazão de recarga estimada	69

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELAS

Tabela 5.1: Postos avaliados no cálculo do CB e valores de CB obtidos.	70
Tabela 6.1: Frequência de classe de uso do solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.	77
Tabela 6.2: Frequência de tipos de solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.	77
Tabela 6.3: Frequência de estruturas geológicas na bacia do Alto Rio Paranaíba.	79
Tabela 6.4: Características hidrogeológicas dos sistemas aquíferos presentes na bacia do Alto Rio Paranaíba.	80
Tabela 6.5: Frequência dos blocos do modelo MGB-IPH.	84
Tabela 6.6: Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos (modelo linear)	89
Tabela 6.7: Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células (modelo linear) ...	89
Tabela 6.8: Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos (modelo não-linear)...	89
Tabela 6.9: Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células (modelo não-linear)	89
Tabela 6.10: Valores das estatísticas do ajuste do modelo para representação linear e não-linear do reservatório subterrâneo no período de calibração (1970-1987).....	90
Tabela 6.11: Valores das estatísticas do ajuste nos períodos de calibração e verificação.	92
Tabela 6.12: Vazões de referência observada e calculada no período de verificação.....	93
Tabela 6.13: Vazões de referência calculadas no período de aplicação sem e com as retiradas outorgadas na bacia.	95
Tabela 6.14: Vazões de referência calculadas sem retiradas de água para a bacia do Alto Rio Paranaíba.	98
Tabela 6.15: Vazões de referência para os diferentes CB.....	112

QUADROS

Quadro 3.1: Critérios de outorga de água superficial baseados em vazões mínimas de referência.....	34
Quadro 6.1: Postos pluviométricos utilizados na simulação.....	86
Quadro 6.2: Postos fluviométricos utilizados na simulação.	87
Quadro 6.3: Postos climatológicos utilizados na simulação.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuição global de água	6
Figura 2.2: Componentes do balanço hídrico regional	8
Figura 2.3: Balanço hídrico simplificado em um aquífero em equilíbrio dinâmico	9
Figura 2.4: Balanço hídrico completo em um aquífero.....	10
Figura 2.5: Balanço no aquífero em situação de desequilíbrio	11
Figura 2.6: Processos de geração de escoamento superficial.....	12
Figura 2.7: Sistemas de fluxo da água subterrânea	14
Figura 2.8: Fluxo preferencial de água subterrânea devido a camadas de diferentes permeabilidades.....	16
Figura 2.9: Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo.....	18
Figura 2.10: Interação entre rio-aquífero pelo armazenamento lateral	19
Figura 2.11: Condições de rede de fluxo em lagos/banhados	19
Figura 2.12: Interações entre banhados e fluxos subterrâneos de água	20
Figura 2.13: Zona hiporréica.....	22
Figura 2.14: Efeitos locais do bombeamento de água em poços.	25
Figura 2.15: Bombeamento de água em aquífero hidraulicamente desconectado ao rio.....	25
Figura 2.16: Efeitos das retiradas de água superficial e subterrânea sobre a hidrologia regional.....	26
Figura 2.17: Curva de permanência no posto Derocal no Rio das Fêmeas (BA)	29
Figura 3.1: Número de outorgas emitidas pela União, Estados e Distrito Federal até 2004....	39
Figura 3.2: Percentual de outorgas emitidas por unidade federativa	39
Figura 3.3: Vazões outorgadas pela União, Estados e Distrito Federal até 2004	40
Figura 3.4: Percentual de vazões outorgadas pela União e unidades federativas	40
Figura 3.5: Vazões outorgadas acumuladas para uso subterrâneo das águas em Minas Gerais	41
Figura 4.1: Modelo simplificado de um reservatório subterrâneo linear	47
Figura 4.2: Ajuste de recessão com reservatório linear e não-linear na bacia de Arvorezinha.	49
Figura 4.3: Seção esquemática do aquífero-rio.....	49
Figura 4.4: Ajuste de recessão com reservatório linear e não-linear no rio Paranaíba	50
Figura 5.1: Fluxograma metodológico	52

Figura 5.2: Bacia discretizada em células quadradas ligadas entre si por canais de drenagem.	53
Figura 5.3: Célula do modelo dividida em blocos de uso, tipo e cobertura do solo	54
Figura 5.4: Estrutura de cálculo de uma célula com dois blocos	54
Figura 5.5: Células do modelo em que foram feitas as retiradas de água no cenário atual de usos.....	68
Figura 5.6: Valores do parâmetro CB (em horas) para recessões de diferentes rios brasileiros.	70
Figura 5.7: Hidrogramas dos rios Grande, Paranaíba e Braço Sul.....	71
Figura 5.8: Células do modelo em que foram feitas as retiradas de água nos cenários hipotéticos.	72
Figura 5.9: Curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos.....	73
Figura 6.1: Localização da bacia em estudo.	75
Figura 6.2: Relevo da bacia do Alto Rio Paranaíba.	76
Figura 6.3: Uso do solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.	77
Figura 6.4: Distribuição dos tipos de solos na bacia do Alto Rio Paranaíba.	78
Figura 6.5: Distribuição das estruturas geológicas na bacia do Alto Rio Paranaíba.....	79
Figura 6.6: Perfil hidrogeológico esquemático na bacia do Paraná	80
Figura 6.7: Localização dos pontos de extração de água superficial e subterrânea na bacia do Alto Paranaíba.	82
Figura 6.8: Percentual por tipo de uso das águas superficiais na bacia do Alto Paranaíba.....	83
Figura 6.9: Percentual por tipo de uso das águas subterrâneas na bacia do Alto Paranaíba. ...	83
Figura 6.10: Distribuição espacial dos blocos do modelo na bacia do Alto Paranaíba.....	85
Figura 6.11: Localização dos postos pluviométricos e fluviométrico utilizados na simulação.	86
Figura 6.12: Séries de vazões observadas em Santana dos Patos referentes aos períodos de calibração, verificação e aplicação.....	88
Figura 6.13: Hidrogramas observado e calculados com reservatório linear e não-linear de janeiro de 1980 a janeiro de 1981.	90
Figura 6.14: Hidrograma de vazões diárias calculado e observado no rio Paranaíba no período de calibração (01/01/1977 – 01/01/1981).....	91
Figura 6.15: Hidrogramas de vazões diárias calculado e observado no rio Paranaíba de janeiro de 1989 a janeiro de 1990.	92

Figura 6.16: Curvas de permanência de vazões diárias calculada e observada no rio Paranaíba no período de verificação (01/01/1988 – 31/12/2005).	93
Figura 6.17: Curvas de frequências de vazões mínimas anuais de 7 dias de duração calculada e observada no rio Paranaíba no período de verificação (01/01/1988 – 31/12/2005).....	94
Figura 6.18: Hidrogramas de vazões diárias calculadas no rio Paranaíba de janeiro de 2005 a dezembro de 2006 sem e com as retiradas atualmente outorgadas na bacia.....	96
Figura 6.19: Curvas de permanência calculadas no rio Paranaíba no período de aplicação (01/01/1988 – 31/12/2005) sem e com as retiradas outorgadas na bacia.....	97
Figura 6.20: Curvas de frequência de vazões mínimas de 7 dias calculadas no rio Paranaíba no período de aplicação (01/01/1988 – 31/12/2005) sem e com as retiradas outorgadas na bacia	97
Figura 6.21: Cenários hipotéticos simulados na bacia do Alto Paranaíba.	99
Figura 6.22: Curvas de outorga de uso integrado de água para a bacia do Alto Rio Paranaíba para retiradas no período seco (de abril à outubro).....	100
Figura 6.23: Hidrogramas calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).....	102
Figura 6.24: Vazões médias mensais calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).	103
Figura 6.25: Médias anuais das vazões mínimas de 3 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).	104
Figura 6.26: Curvas de permanência calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).	104
Figura 6.27: Curvas de frequência de vazões mínimas com duração de 7 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Paranaíba (abril à outubro).....	105
Figura 6.28: Curvas de outorga integrada para a bacia do Alto Rio Paranaíba para retiradas de água durante todo o ano.	106
Figura 6.29: Hidrogramas calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).	107
Figura 6.30: Vazões médias mensais calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).....	108
Figura 6.31: Médias anuais das vazões mínimas de 3 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).	108

Figura 6.32: Curvas de permanência calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).....	109
Figura 6.33: Curvas de frequência de vazões mínimas com duração de 7 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).....	110
Figura 6.34: Cenários hipotéticos simulados para dois dos valores do parâmetro CB	111
Figura 6.35: Curvas de impacto na $Q_{7,10}$ das retiradas de água em bacias com $CB = 800$ horas.	113
Figura 6.36: Curvas de impacto na $Q_{7,10}$ das retiradas de água em bacias com $CB = 15.000$	115

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

A hidrologia é definida como uma geociência que descreve e prevê a ocorrência e a distribuição de água na Terra, estudando o fenômeno dinâmico global de circulação da água, conhecido por ciclo hidrológico. Em uma primeira análise, o conceito de ciclo hidrológico pode parecer demasiado simplificado, no entanto, os fenômenos nele envolvidos são extremamente complexos. Horton (1931) evidencia essa complexidade ao afirmar que *qualquer superfície natural pode ser considerada como uma unidade de área na qual o ciclo hidrológico atua*. Essas unidades, por sua vez, formam muitos outros ciclos de extensão continental, regional e local que se relacionam entre si por meio de diferentes fenômenos, interagindo de forma sistêmica em um único grande ciclo.

Considerando a integração entre os componentes do ciclo hidrológico, as águas superficiais e subterrâneas constituem um único recurso e não componentes isolados, devendo, por isso, serem gerenciadas como partes integradas, que se inter-relacionam no ciclo hidrológico. A compreensão dos princípios básicos dessas inter-relações é essencial para um gerenciamento e planejamento efetivos dos usos da água, como fundamentado na Lei 9.433/97 (Brasil, 1997), que menciona o caráter integrado do ciclo hidrológico, considerando a unidade desse ciclo como fundamento jurídico-institucional de sua concepção. No entanto, na prática do gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, raramente é abordado o aspecto interdependente desses sistemas.

Em um cenário crescente de utilização dos recursos hídricos, uma gestão mais eficaz das águas pode ser obtida ao se considerar a inter-relação entre os componentes superficiais e subterrâneos do ciclo hidrológico e ao se definir critérios de outorga que considerem o uso conjunto e integrado dos mananciais superficiais e das reservas subterrâneas, predizendo os possíveis impactos desses usos sobre a disponibilidade hídrica nas bacias, como prescrito na legislação.

No Brasil, em virtude da escassez de informações hidroclimatológicas e, em particular, de informações hidrogeológicas, sobretudo quanto à caracterização dos aquíferos e da quantificação dos usos da água, critérios para alocação integrada dos recursos hídricos praticamente inexistem. Além disso, poucos são os estudos encontrados na literatura que abordam o caráter integrado de uso das águas na escala da bacia hidrográfica, sendo necessário, por isso, o emprego de metodologias simplificadoras que permitam definir critérios de outorga que considerem a gestão integrada dos recursos hídricos.

A definição de critérios integrados para a alocação dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica pode ser obtida agregando informações conjuntas e prognosticando cenários futuros dos usos da água, analisando seus impactos, em macro-escala, sobre a disponibilidade hídrica na bacia, o que poderia ser feito por meio de modelos. A aplicação de modelos na avaliação integrada dos usos dos recursos hídricos é ainda escassa, mas poderia auxiliar na resposta a questões como:

- Quais os efeitos de retiradas de água superficial, juntamente com as extrações subterrâneas, sobre a vazão de um rio?
- Qual o período de tempo decorrido entre o início da retirada de água superficial e subterrânea e o final do efeito sobre a vazão do rio?
- Quais as máximas vazões de retirada para se respeitar os critérios de vazão ecológica, considerando usos conjuntos das águas superficiais e subterrâneas em macro-escala?
- Como compatibilizar as retiradas de vazão superficial e subterrânea numa bacia hidrográfica para que os processos de outorga levem em conta o efeito que uma exerce sobre a outra?

1.1 - JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Ao se considerar dentre as ferramentas de gestão instituídas pela Lei 9.433/97 (Brasil, 1997), a outorga, vê-se que a mesma se sustenta na racionalização, na multiplicidade e na abordagem integrada dos usos da água. Quando da outorga para uso superficial, verifica-se que a mesma se baseia na manutenção de vazões mínimas de referência possíveis de serem retiradas em toda a bacia, uma visão macro do limite de uso. Por outro lado, quando da outorga de água subterrânea, o foco das atenções se concentra no ponto de captação da água, uma visão micro do limite de uso, e se baseia nas especificidades e características do poço como obra de engenharia em si e nos efeitos adjacentes (a poços vizinhos ou cursos d'água) que a exploração possa causar. Nesse caso, não são considerados os limites de retirada de água subterrânea na bacia hidrográfica, unidade de planejamento dos recursos hídricos, nem tampouco há o cruzamento de informações no sentido de avaliar o aspecto integrado da gestão dos usos.

Tendo em vista a crescente demanda dos recursos hídricos, é de se esperar um aumento de conflitos relacionados à sua utilização, os quais podem ser agravados pelo descontrole e pela falta de mecanismos legais e técnicos quanto ao seu uso apropriado. Na

prática atual da gestão dos recursos hídricos no Brasil, a inexistência de critérios de outorga de águas subterrâneas, a desconsideração dos usos conjuntos das águas de superfície e do subsolo e da predição dos seus efeitos sobre a disponibilidade hídrica nas bacias constituem a principal justificativa desse trabalho.

1.2 - OBJETIVOS

Esta pesquisa tem por objetivo geral o desenvolvimento de uma metodologia que permita a definição de alternativas de critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos que considerem os usos integrados das águas superficiais e subterrâneas na macro-escala da bacia hidrográfica, a partir da avaliação dos impactos que diferentes cenários de usos podem ter sobre o escoamento dos rios.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- avaliar a aplicabilidade do modelo hidrológico MGB-IPH na representação em macro-escala da inter-relação entre os usos superficiais e subterrâneos em uma bacia hidrográfica;
- avaliar a representação simplificada de aquíferos em modelos hidrológicos, na reprodução das vazões de recessão em hidrogramas;
- aplicar a metodologia desenvolvida, como estudo de caso, na bacia do alto rio Paranaíba em Minas Gerais, à montante da estação Santana dos Patos.

Ressalta-se que sendo este trabalho aplicado a uma escala de macro-bacia, não será analisada a interação detalhada dos fluxos de água entre os rios e os aquíferos, os quais podem ser bastante variáveis por toda a bacia; nem os impactos localizados que as retiradas de água subterrânea podem provocar, como, por exemplo, a influência do bombeamento no nível freático e entre poços adjacentes.

1.3 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto apresenta-se distribuído em 7 capítulos, divididos e dispostos de forma a torná-lo mais objetivo e conciso. O presente capítulo apresenta uma breve introdução do tema, a justificativa e os objetivos do trabalho.

Os capítulos 2, 3 e 4 apresentam as revisões bibliográficas relacionadas, respectivamente, à física dos processos das inter-relações entre as águas superficiais e

subterrâneas, à abordagem integrada da gestão desses recursos e à adequabilidade de modelos simplificados na representação dessas inter-relações.

No Capítulo 2 é feita uma breve discussão sobre alguns aspectos quantitativos das águas superficiais e subterrâneas no ciclo hidrológico e são discutidos os processos e fatores que influenciam e atuam na interação entre esses recursos. São abordadas, ainda, algumas das metodologias que podem ser utilizadas para estimar a influência da água subterrânea sobre a vazão de base de rios.

No Capítulo 3 é apresentada uma discussão quanto aos processos atuais de outorga de direito de uso de recursos hídricos superficiais e subterrâneos no cenário brasileiro, expondo os fundamentos dos critérios utilizados.

No Capítulo 4 é feita uma discussão sobre a representação dos aquíferos nos modelos hidrológicos e sua adequabilidade em reproduzir, simplificadamente, as retiradas de água superficial e subterrânea em bacias hidrográficas.

As etapas metodológicas desenvolvidas são apresentadas no Capítulo 5. Nesse capítulo, é descrito o modelo hidrológico MGB-IPH, utilizado na pesquisa para simular usos conjuntos superficiais e subterrâneos da água, servindo como ferramenta para o desenvolvimento de procedimentos que possibilitem definir limites de outorga de uso desses recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica.

O Capítulo 6 apresenta o estudo de caso: uma aplicação na bacia do Alto Rio Paranaíba, no trecho à montante da estação Santana dos Patos, no estado de Minas Gerais. Nesse capítulo, é feita uma descrição de suas características fisiográficas e hidrológicas, dos usos dos recursos hídricos e da preparação dos dados de entrada no modelo.

O Capítulo 7 apresenta uma discussão sobre os resultados encontrados, com algumas recomendações para um futuro aprimoramento da metodologia.

CAPÍTULO 2: ABORDAGEM HIDROLÓGICA INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEOS

As águas superficiais e subterrâneas representam os principais componentes do ciclo hidrológico na litosfera e compreendem quase que a totalidade dos aproveitamentos dos recursos hídricos pelo homem (Brasil, 2006).

As interações que ocorrem entre os corpos d'água superficiais e os aquíferos são bastante complexas, e, para serem bem entendidas devem ser analisadas dentro de uma perspectiva *hidrogeoecológica* (Sophocleous, 2002). Nessa perspectiva, as interações entre as águas superficiais e subterrâneas são dependentes de forma unívoca das características do clima, do solo, da geologia e dos fatores bióticos presentes na bacia hidrográfica.

Essa análise dos recursos hídricos como um todo integrado, no entanto, é muito difícil de ser posta em prática, especialmente quando os estudos básicos e os aparatos legais e institucionais necessários à sua implementação são incipientes. Por isso, considerações essenciais de como os usos das águas superficiais e subterrâneas exercem influência sobre a disponibilidade hídrica da bacia são ainda inexistentes.

Neste capítulo, inicialmente é apresentada uma discussão sobre as inter-relações entre as águas superficiais e subterrâneas e sobre os principais mecanismos locais responsáveis por essas interações, os quais não constituem escopo principal dessa pesquisa, mas são importantes para o entendimento da dinâmica física desses sistemas na macro-escala da bacia. O capítulo apresenta também uma descrição sucinta dos principais impactos que as atividades humanas podem provocar sobre as águas subterrâneas em decorrência de seu uso intensivo. Ao final do capítulo, são abordados alguns dos métodos usualmente encontrados na literatura que são utilizados para a determinação de vazões de referência de outorga no Brasil e que permitem estimar a proporção do escoamento em rios que deriva da contribuição subterrânea, a partir de dados de vazões.

Nesse texto, a interação entre os corpos superficiais e subterrâneos de água está relacionada aos aspectos gerais da contribuição subterrânea à vazão de base do rio, que pode provir tanto de descargas de aquíferos confinados quanto de não-confinados, embora, no caso desses últimos a conexão com os processos superficiais do ciclo hidrológico seja mais direta e os efeitos de sua exploração normalmente de maiores impactos sobre o regime fluvial do que no caso dos aquíferos confinados (Dingman, 2002).

2.1 - ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

As águas superficiais são as que escoam ou estão armazenadas sobre a superfície da Terra, devido à contribuição das águas de precipitação, da recarga de aquíferos ou do escoamento de outros corpos d'água superficiais (Tucci, 2004). Já as águas subterrâneas são constituídas pela parcela da água precipitada sobre a superfície, que se infiltra para o subsolo para ser armazenada nos interstícios do solo e das rochas (Delleur, 1998).

Os recursos hídricos superficiais representam importante reserva de água, sendo possivelmente a fonte de mais fácil captação para uso em atividades humanas. Entretanto, esses mananciais representam parcela reduzida na distribuição global de água – apenas cerca de 0,9% do total de água doce. As águas subterrâneas, por outro lado, constituem um recurso estratégico no caso de falha das outras fontes, correspondendo a cerca de 30% do total de água doce no planeta – Figura 2.1.

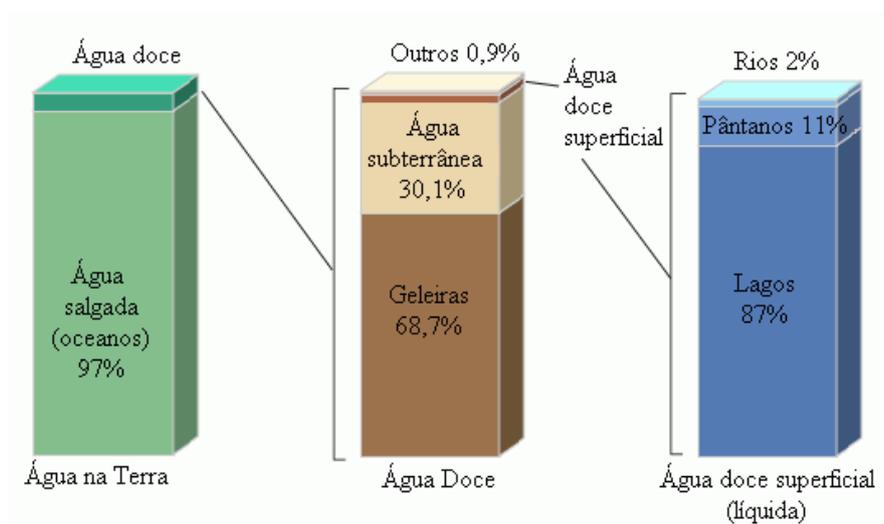


Figura 2.1: Distribuição global de água (fonte: adaptado de Estados Unidos, 2006).

Aproximadamente 10% de toda a água doce superficial do mundo encontram-se no Brasil, o que torna o nosso país um dos mais ricos do mundo em termos de disponibilidade de volume de água doce superficial (Brasil, 2002a). Todavia, sua distribuição varia significativamente de um ano a outro e também espacialmente pelo território nacional. Assim, há regiões com abundância de água de boa qualidade e outras, como o semi-árido nordestino e áreas densamente urbanizadas e de intensa exploração agrícola, que sofrem sérios problemas de escassez hídrica.

Quanto às águas subterrâneas, no Brasil, seu volume a menos de 1.000 m de profundidade e de boa qualidade para consumo humano está estimado em 112.000 km³ (Brasil, 2006).

As águas subterrâneas são um importante componente do ciclo hidrológico na terra, por desempenhar dois papéis fundamentais: um quanto ao equilíbrio natural do sistema hidrológico e outro como fonte imprescindível de água para uso humano (Custodio, 2002). Na natureza, a água subterrânea atua em vários processos geológicos, contribuindo para níveis de rios, lagos, lagoas e banhados; para a manutenção de ecossistemas e para a estabilidade geotécnica de solos e rochas. Como fonte para uso humano, é um importante aporte no abastecimento de centros urbanos, sendo, atualmente, utilizada por cerca de 60% da população brasileira que se abastece por mananciais de sub-superfície (Brasil, 2000), e áreas rurais, possibilitando o desenvolvimento de áreas agrícolas irrigáveis. Justamente, por isso, têm gerado grandes benefícios à sociedade e à economia de diversos países (Espanha, 2002).

Segundo Llamas (2004), o aumento significativo da exploração de água subterrânea se fez possível devido, principalmente, a fatores tecnológicos (progresso do conhecimento científico na ocorrência, movimento e exploração da água subterrânea); econômicos (o verdadeiro custo da água subterrânea é geralmente baixo com relação aos benefícios econômicos diretos obtidos do seu uso); institucionais (a exploração da água subterrânea pode ser facilmente realizada por usuários individuais, indústrias ou pequenos municípios); e de segurança (possibilidade de enfrentar a variabilidade interanual da precipitação).

No Brasil, o aumento constante no consumo de água subterrânea se deve, principalmente, à crescente demanda de água, ao comprometimento e à poluição das reservas superficiais, ao melhor conhecimento dos aquíferos, embora ainda bastante escasso, e ao aprimoramento das empresas de perfuração de poços (Cabral *et al.*, 2006).

Exemplos de regiões que têm na água subterrânea um manancial imprescindível para o desenvolvimento de suas atividades econômicas, e que, por isso, fazem uso intensivo das mesmas, são relatadas em Stromberg *et al.* (1996), Alley *et al.* (1999), Custodio (2002), Freire (2002), Schuster *et al.* (2002), Postel & Richter (2003), Sophocleous (2005) e Silva *et al.* (2006b).

2.2 - INTERAÇÃO ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

Nos últimos anos, o interesse em estudos relacionados à interação entre as águas superficiais e subterrâneas tem aumentado, visando incluir os efeitos de sua exploração sobre

rios, lagos, banhados e estuários (Winter, 1999). A perspectiva em se considerar a interação que um manancial exerce sobre o outro é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos dentro de uma visão integrada do ciclo hidrológico na bacia.

A extração de água de corpos hídricos superficiais, principalmente daqueles com características predominantemente influentes, ou seja, que contribuem para o fluxo subterrâneo, pode provocar a diminuição da contribuição superficial ao aquífero e, conseqüentemente, promover uma depleção do lençol freático. Da mesma forma, todo volume de água subterrânea retirado de um aquífero implica, também, em uma redução da sua contribuição aos corpos hídricos superficiais. Por isso, as alocações de água superficial e subterrânea de forma segregada não são apropriadas em virtude dos efeitos inter-relacionados entre esses sistemas.

2.2.1. - O balanço hídrico subterrâneo

O balanço hídrico regional em uma bacia implica no emprego de uma equação que relaciona os volumes que entram, que saem e que nela ficam armazenados. Considerando a bacia representada na Figura 2.2, para um determinado intervalo de tempo, o balanço hídrico é dado pela equação:

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S, \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde: P é a precipitação, ET é a evapotranspiração, Q é a vazão de saída, G_{in} é a entrada de água subterrânea (caso em que o aquífero na área delimitada pela bacia superficial recebe contribuição de aquíferos adjacentes), G_{out} é a saída de água subterrânea e ΔS é a variação no armazenamento.

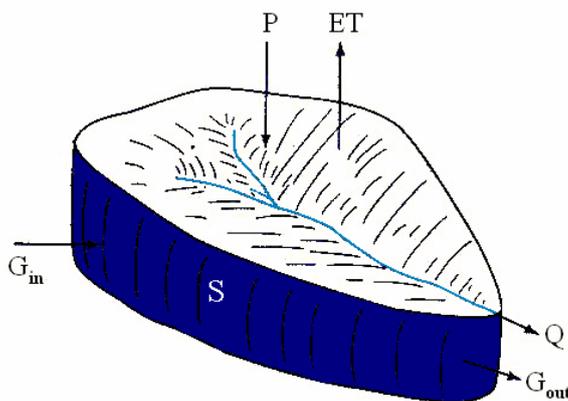


Figura 2.2: Componentes do balanço hídrico regional (adaptado de Dingman, 2002).

Na prática, ao se determinar o balanço hídrico em longo período numa bacia, se considera nula a variação do armazenamento subterrâneo e se despreza a contribuição de entrada da água subterrânea. Essa simplificação considera o aquífero em equilíbrio dinâmico, isto é, a taxa média de recarga igual à taxa média de descarga e a variação do armazenamento igual a zero, em longo período (Figura 2.3).



Figura 2.3: Balanço hídrico simplificado em um aquífero em equilíbrio dinâmico
(adaptado de Alley *et al.*, 1999).

Entretanto, dependendo das particularidades topográficas e geológicas da bacia, e em cenários de exploração intensiva dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente quando a influência da descarga subterrânea no escoamento de base dos rios é significativa, essa avaliação simplista pode ser insuficiente e desconsiderar efeitos indesejáveis importantes.

Um balanço hídrico completo do reservatório subterrâneo, representado no esquema da Figura 2.4, é expresso pela Equação 2.2:

$$R_I + R_{SW} + G_{in} - (CR + Q_{GW} + G_{out}) = \Delta S, \quad (\text{eq. 2.2})$$

onde: R_I é a recarga por infiltração (percolação), R_{SW} é a recarga por contribuição de corpos superficiais, CR é a ascensão capilar (movimento ascendente de água subterrânea na camada da franja capilar) e Q_{GW} é a descarga subterrânea nos corpos superficiais; os demais termos foram definidos anteriormente.

Em relação ao armazenamento subterrâneo, esses componentes podem ser separados em:

- componentes de recarga: infiltração e contribuição de corpos superficiais.
- componentes de descarga: ascensão capilar e descarga em corpos superficiais.

A determinação da descarga subterrânea em corpos hídricos superficiais (Q_{GW}), de maior interesse nesse trabalho, pode ser realizada a partir de metodologias que utilizam dados medidos de vazão. Essas metodologias são bastante adequadas para comparar a contribuição subterrânea no volume escoado superficialmente em um rio, embora se deva tomar cuidado com a imprecisão dos dados, principalmente nas vazões mínimas (Smakhtin, 2001). Quanto aos demais componentes de recarga e descarga no aquífero, Dingman (2002) apresenta uma série de métodos para sua quantificação.

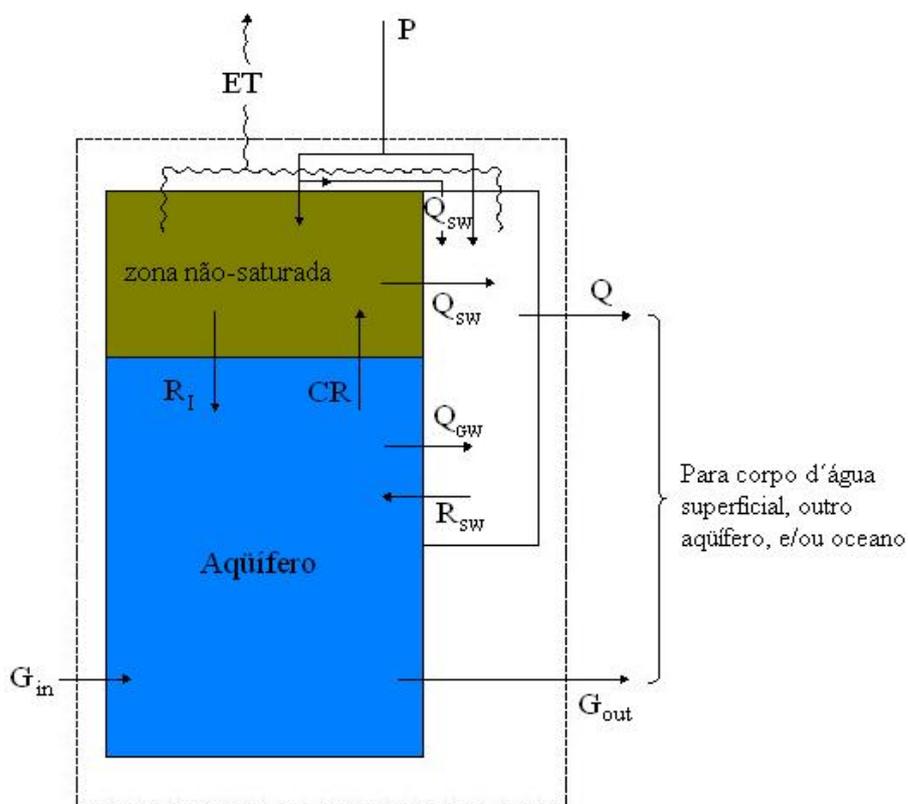


Figura 2.4: Balanço hídrico completo em um aquífero (adaptado de Dingman, 2002).

No caso do aquífero em equilíbrio representando na Figura 2.3, supondo uma situação de interrupção desse equilíbrio por efeito de extrações por bombeamento, o reservatório subterrâneo entra num regime transitório, no qual a retirada de água subterrânea deve ser equilibrada, ou pela diminuição no armazenamento S (que sempre ocorre), ou pela combinação do aumento da recarga induzida, ou da diminuição da descarga – Figura 2.5. Alguns dos efeitos de explorações de água subterrânea sobre o equilíbrio do reservatório subterrâneo são demonstrados em Levine & Salvucci (1999).



Figura 2.5: Balanço no aquífero em situação de desequilíbrio (adaptado de Alley *et al.*, 1999).

A depleção do volume armazenado no aquífero tende a ser um efeito mais direto do que a recarga ou descarga induzidas (Sophocleous, 2002). Esse efeito continua até que um novo equilíbrio seja atingido, o qual pode levar um curto (alguns anos) ou um longo período de tempo para ser alcançado (centenas de anos), dependendo do tamanho da bacia e de suas características geológicas e hidrológicas e da localização e vazão bombeada pelos poços.

Quanto ao aumento da recarga, o mesmo pode se dar pelo aumento na infiltração, que tende a ser maior em zonas de maior profundidade do lençol, ou pelo aumento da contribuição de corpos d'água superficiais: poços próximos a rios podem, localmente, reverter o gradiente potencial e induzir recarga pelo rio.

Já a diminuição da descarga do aquífero pode ser provocada pela redução na descarga em corpos superficiais ou pelo rebaixamento do lençol freático, diminuindo a água disponibilizada na camada não-saturada pela ascensão capilar.

2.2.2. - Mecanismos contribuintes nos corpos hídricos superficiais

Do ponto de vista dos corpos hídricos superficiais, podem ser identificados três mecanismos principais que contribuem para seu escoamento: a precipitação direta, o escoamento superficial e o escoamento sub-superficial. Alguns ou todos esses mecanismos podem atuar simultaneamente em um dado rio, e sua importância relativa pode variar sazonalmente ou mesmo durante um evento.

Precipitação direta

A precipitação direta, também chamada interceptação no canal, é aquela que cai diretamente sobre a superfície de água ou sobre o canal do rio e é incorporada ao seu escoamento. Esse mecanismo pode ser um componente significativo na vazão de pico e também na vazão total de eventos.

Escoamento superficial

O escoamento superficial é aquele que ocorre sobre a superfície do terreno quando esta se encontra saturada ou quando a taxa de precipitação supera a capacidade de infiltração. Na literatura, são encontrados dois processos que procuram explicar a formação do escoamento superficial (Tucci, 1998): o processo Hortoniano (Horton, 1933 e Horton, 1945) e o processo Dunniano (Dunne & Black, 1970).

Na teoria de Horton, Figura 2.6a, o escoamento superficial ocorre quando a intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração do solo para uma dada duração.

Na teoria Dunniana, Figura 2.6b, o escoamento superficial ocorre pela saturação abaixo da superfície: a chuva, ao infiltrar, percola até o reservatório subterrâneo, elevando o lençol freático até que o mesmo atinja a superfície, havendo geração de escoamento superficial.

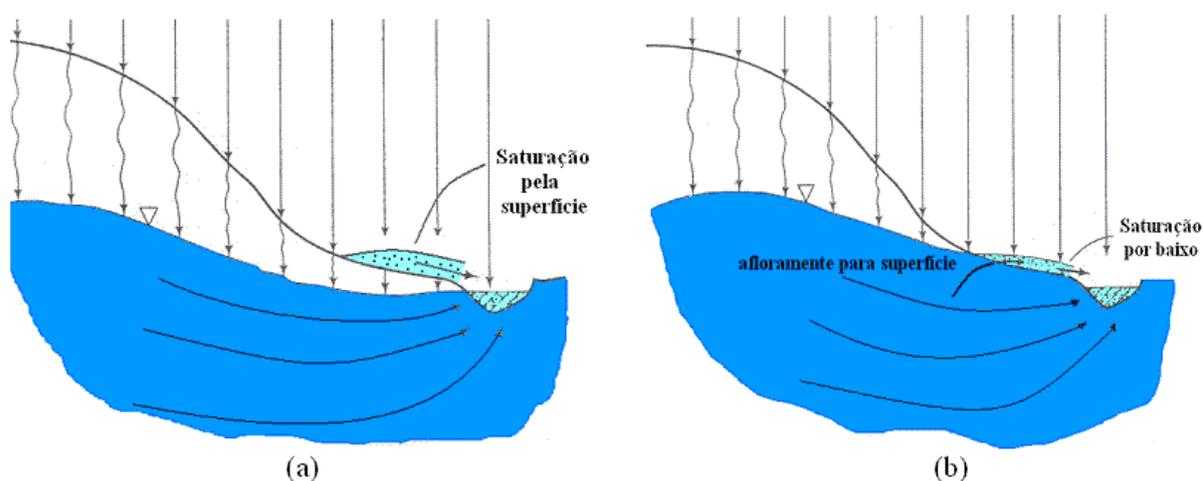


Figura 2.6: Processos de geração de escoamento superficial: (a) Hortoniano; (b) Dunniano (adaptado Dingman, 2002).

Escoamento sub-superficial

O escoamento sub-superficial é aquele que acontece a uma velocidade maior que a do escoamento subterrâneo e menor que a do escoamento superficial. Esse escoamento ocorre sob a superfície do terreno e contribui para o escoamento nos corpos d'água superficiais como resposta a um evento chuvoso. Essa contribuição pode se dar a partir da zona saturada (aquífero) ou da zona não saturada.

Na zona saturada, a contribuição aos corpos superficiais pode advir da elevação do lençol freático e da saturação da camada não-saturada superior, em local onde o lençol está próximo à superfície (essa contribuição rápida do reservatório subterrâneo é em resposta a um evento chuvoso, diferente da descarga subterrânea mais lenta, que pode ser significativa

durante todo o regime hidrológico, inclusive no período de estiagem). Esse processo pode ser expressivo nas vazões dos rios, principalmente durante eventos chuvosos em condições precedentes de alta umidade no solo, quando mesmo uma pequena percolação de água pode promover a elevação do lençol nas proximidades dos corpos d'água.

No caso de lençóis freáticos rasos, a contribuição sub-superficial pode ocorrer também pela pressurização da franja capilar. Quando a água percola no solo, ainda que em pequena quantidade, a franja capilar, que se estende acima do aquífero, muda de uma condição de pressões negativas para positivas, promovendo a elevação do nível freático (Dingman, 2002). Em regiões de solo raso, sob os quais se encontra uma camada de solo impermeável ou de baixa condutividade hidráulica, pode haver, ainda, acúmulo de água acima dessa camada impermeável, criando uma zona saturada que contribui diretamente ao escoamento superficial (fluxo local), não chegando a percolar até o aquífero regional.

O escoamento sub-superficial na zona não-saturada, também chamado de *interflow* ou *throughflow*, ocorre numa região entre a superfície do terreno e o nível superior do lençol subterrâneo e pode ser devido à saturação da zona não-saturada por elevação do lençol frático, por escoamento matricial ou por meio de macroporos no solo. No primeiro caso, a saturação do solo ocorre em zonas de baixa profundidade do lençol freático, segundo processos semelhantes aos descritos anteriormente.

Já o escoamento matricial, explicado pela Lei de Darcy (Hubbert, 1940), sendo, por isso, também chamado de escoamento Darciano, ocorre quando a água infiltrada pela precipitação satura o solo, criando um gradiente hidráulico e gerando, assim, escoamento. Esse escoamento não contribui significativamente durante o evento, mas é a principal fonte de água sub-superficial nos períodos de recessão em muitas regiões (Dingman, 2002).

Um escoamento sub-superficial a velocidades maiores pode ocorrer em terrenos declivosos contendo macroporos produzido por raízes ou animais que habitam o solo. Os macroporos, por estarem conectados, podem permitir a passagem da água através do solo a velocidades muito superiores às de Darcy, podendo contribuir rapidamente para o escoamento em zonas saturadas (Kirkby, 1988).

2.2.3.- Fatores físicos intervenientes na interação entre águas superficiais e subterrâneas

A topografia e a geologia interferem de forma expressiva na dinâmica de trocas entre os corpos superficiais e os aquíferos. Geralmente, em um aquífero não-confinado, a linha

freática segue forma semelhante à da topografia do terreno, sendo, também, bastante dependente das características geológicas da região. Esses dois mecanismos, por outro lado, determinam apenas a distribuição espacial das zonas de recarga e descarga, e não as taxas em que elas ocorrem, as quais são mais influenciadas pelo clima. Dessa forma, o tripé: topografia, geologia e clima, constitui o principal responsável pela interação entre águas superficiais e subterrâneas (Tóth, 1970).

Efeitos da topografia

A topografia pode criar um complexo padrão de fluxo da água subterrânea dominante em uma região que, por sua vez, exerce uma influência mútua nas águas superficiais e subterrâneas (Freeze & Cherry, 1979).

Dependendo das características topográficas, os fluxos subterrâneos podem ser classificados em (Figura 2.7):

- Sistemas de fluxo local;
- Sistemas de fluxo intermediário;
- Sistemas de fluxo regional.

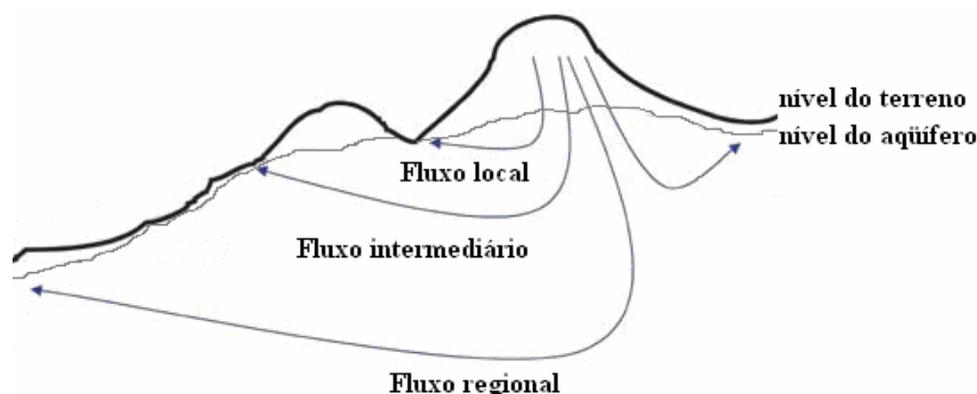


Figura 2.7: Sistemas de fluxo da água subterrânea (fonte: Austrália, 2006).

Os sistemas de fluxos locais respondem mais rapidamente ao movimento da água subterrânea, sendo as zonas de recarga e descarga bastante próximas (cerca de alguns quilômetros uma da outra). Os fluxos regionais ocorrem em zonas com maior capacidade de armazenamento e permeabilidade do que os fluxos locais, sendo as áreas de descarga muito distantes (50 quilômetros ou mais) das de recarga, respondendo, por isso, mais lentamente ao movimento da água subterrânea. Por fim, os sistemas de fluxos intermediários apresentam

características entre as dos fluxos locais e dos fluxos regionais, estando as zonas de descarga entre 5 e 10 quilômetros dos locais de recarga (Sophocleous, 2002).

Devido às suas características, os fluxos de água subterrânea apresentam tempos de resposta diferentes quando sujeitos a modificações na dinâmica do seu sistema. Os fluxos locais respondem mais rapidamente mesmo a pequenas alterações antrópicas na bacia, enquanto que os fluxos regionais podem levar centenas de anos para serem afetados, mesmo para grandes modificações na bacia (Austrália, 2006).

Genericamente, as áreas de topografia mais acidentadas possuem predominância de fluxo local, enquanto que as áreas mais planas tendem a apresentar sistemas de fluxos intermediários ou regionais. Winter *et al.* (1998) mencionam que os sistemas de fluxos locais são mais dinâmicos e, por isso, têm uma maior ligação com os corpos superficiais. Entretanto, por serem de resposta mais rápida, sua contribuição, em termos de volume e ao longo do tempo, pode ser menos significativa que a contribuição dos sistemas de fluxos intermediários ou regionais.

Esses tipos de fluxos são também dependentes da geometria global do sistema: quando a profundidade da camada impermeável é pequena com relação à distância do divisor subterrâneo, há uma tendência para predomínio de fluxo local; por outro lado, quando essa camada é mais profunda, há tendência de sistemas regionais. Na prática, a direção de movimento da água subterrânea pode conter um ou mais desses tipos de fluxos.

Efeitos da geologia

Os fatores geológicos mais relevantes na dinâmica do fluxo de água subterrânea são (Dingman, 2002):

- Litologia: relacionada com a composição mineral, a distribuição granulométrica e a forma das rochas ou grãos do solo, os quais controlam a distribuição da condutividade hidráulica;
- Estratigrafia: relações geométricas entre as formações das camadas do solo (tipicamente em camadas);
- Estrutura pedológica: relacionada à disposição, arranjo e posição relativa das formações.

Esses três fatores estão diretamente relacionados ao modo como se distribuem espacialmente os aquíferos e às principais características do movimento da água subterrânea (Freeze & Cherry, 1979).

As variações na geologia, que muitas vezes não são aparentes por observações de superfície, podem originar uma grande variabilidade de configurações nos sistemas de fluxo subterrâneo, mesmo para perfis topográficos semelhantes (Freeze & Witherspoon, 1967). Unidades geológicas de diferentes permeabilidades podem afetar sobremaneira a distribuição das infiltrações e exfiltrações; por exemplo, numa camada altamente permeável, confinada entre camadas menos permeáveis, o fluxo de água subterrânea na direção do corpo superficial tende a seguir um caminho preferencial por essa camada, como representado na Figura 2.8, independentemente da configuração topográfica do terreno.

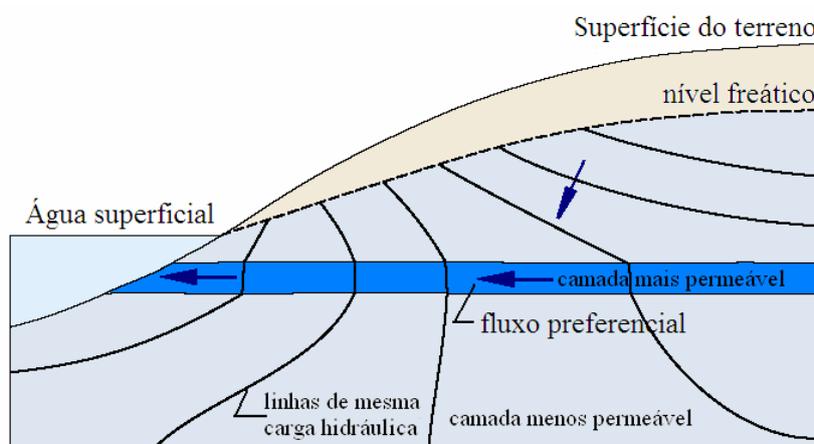


Figura 2.8: Fluxo preferencial de água subterrânea devido a camadas de diferentes permeabilidades (adaptado de Winter *et al.*, 1998).

Efeitos do clima

A variação do clima está diretamente relacionada às intensidades e configurações em que as interações entre as águas superficiais e subterrâneas ocorrem. Regiões de clima predominantemente úmido tendem a ter corpos superficiais mais influenciados pela regularização subterrânea, do que regiões de clima mais seco, ainda que apresentem características fisiográficas semelhantes.

O aspecto climático está fortemente relacionado com a taxa entre recargas e descargas na bacia. De maneira geral, sob condições de baixa precipitação, o fluxo nos corpos superficiais resulta, em sua maior parte, da contribuição subterrânea, causando uma diminuição do nível freático. Por outro lado, em condições de alta precipitação, o aumento gradativo dos níveis superficiais de água pode elevar a infiltração para o aquífero, aumentando a recarga na direção subterrânea (Sophocleous, 2002).

As condições hidroclimáticas afetam, principalmente, os padrões de infiltração próximos às margens dos corpos superficiais, nas quais o lençol freático intercepta a

superfície (Winter *et al.*, 1998). Nessa zona, a água infiltrada durante ou após um evento chuvoso pode elevar rapidamente o nível freático, resultando no aumento do fluxo subterrâneo de água para o corpo superficial (sistema de fluxo local).

2.2.4. - Relações entre corpos hídricos superficiais e as águas subterrâneas

Dependendo das características fisiográficas e climáticas de uma região, as águas subterrâneas podem influenciar e/ou serem influenciadas por praticamente todos os tipos de corpos hídricos superficiais. Nos itens a seguir, são discutidas as principais relações que os aquíferos podem estabelecer com rios, lagos, banhados e o oceano.

Água subterrânea e rios

Os rios podem estabelecer três configurações com os sistemas de fluxo subterrâneo (Larkin & Sharp, 1992):

- rios efluentes: as águas subterrâneas escoam na direção do corpo d'água superficial;
- rios influentes: as águas superficiais contribuem para o fluxo subterrâneo;
- rios em ambas as condições: os rios contribuem ou recebem água subterrânea durante algumas épocas do ano, ou mesmo em uma posição ou outra de seu curso.

De maneira geral, para haver descarga subterrânea em um canal, condição efluente, a altura do nível do lençol freático nas proximidades do rio deve ser maior que a altura d'água no canal. No caso oposto, para a água superficial infiltrar no reservatório subterrâneo, condição influente, a altura do nível freático próximo ao rio deve ser menor que a altura de água na sua calha.

Quanto às condições de descarga da água subterrânea nos cursos fluviais, podem ser identificados três tipos de rios: perene, intermitente e efêmero, os quais dependem da regularidade com que o aquífero contribui na vazão de base. Em rios perenes, a vazão de base é, aproximadamente, contínua no tempo, ao contrário dos rios intermitentes, os quais recebem água apenas durante certo período do ano, o que os torna influente ou efluente dependendo da época do ano. Já em rios efêmeros, o nível de água subterrânea encontra-se sempre abaixo do canal, o que o torna exclusivamente influente quando há escoamento.

Sophocleous (2002) distingue três relações físicas entre os rios e o nível de água subterrâneo: o sistema hidraulicamente conectado em condição efluente, o sistema hidraulicamente conectado em condição influente e o sistema hidraulicamente desconectado.

Quando o nível subterrâneo intercepta o nível do canal, o sistema superfície-aquífero é dito hidraulicamente conectado, e nele, dependendo da distribuição do potencial hidráulico, pode haver uma condição efluente ou influente (Figuras 2.9a e 2.9b, respectivamente). Por outro lado, quando há uma camada não-saturada entre o nível subterrâneo e o nível superficial, o sistema é dito hidraulicamente desconectado (Figura 2.9c e Figura 2.9d).

No caso do sistema hidraulicamente desconectado, pode haver uma elevação da linha freática abaixo do leito do rio, caso a taxa de recarga através da zona não-saturada no fundo do canal seja maior que a taxa de recarga em suas áreas laterais (Winter *et al.*, 1998). Nessa situação, ainda há interações entre o aquífero e a superfície líquida, podendo uma redução no nível freático ocasionar perdas no canal. Essa interação pode ocorrer por influência da franja capilar, na qual a água ocupa os espaços na região não-saturada do solo acima da superfície do lençol freático. Assim, ao ser bombeada água do aquífero, a altura da franja capilar pode diminuir e afetar a contribuição subterrânea no escoamento do rio por meio da zona não-saturada. Apenas no caso de profundidades críticas do lençol freático (Figura 2.9d), pode ser desconsiderada a influência da ascensão capilar (Bouwer & Maddock, 1997).

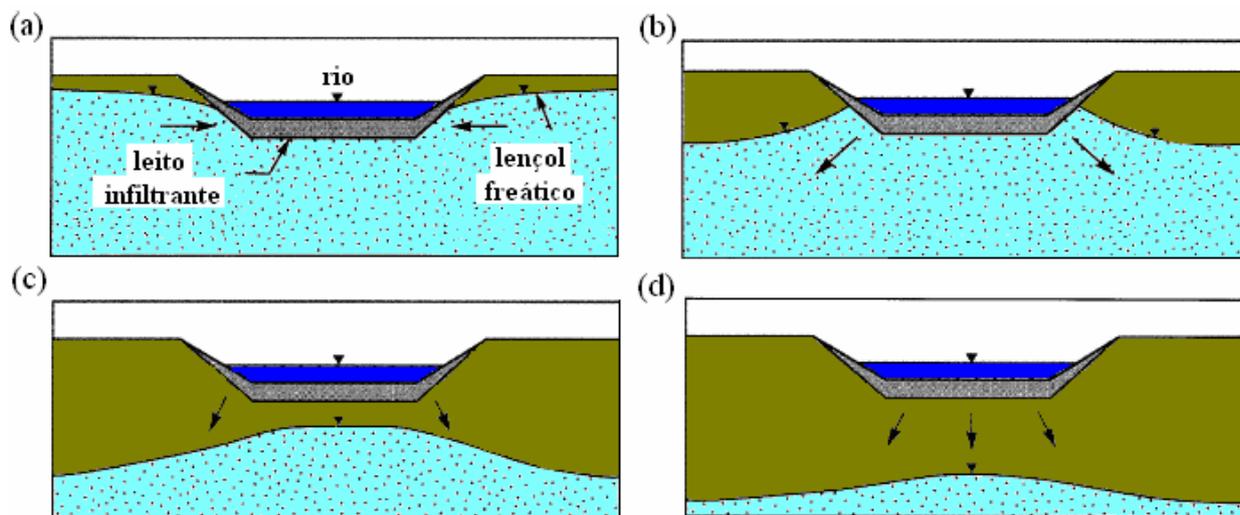


Figura 2.9: Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo: (a) sistema superfície-aquífero hidraulicamente conectado (condição efluente); (b) sistema hidraulicamente conectado (condição influente); (c) sistema hidraulicamente desconectado (nível freático alto); (d) sistema hidraulicamente desconectado (nível freático baixo). (adaptado de Peterson e Wilson, 1998, *apud* Sophocleous, 2002).

Um caso comum de interação entre quase todos os tipos de rios e aquíferos ocorre durante uma rápida elevação do nível da água na calha do rio, devido a precipitações intensas

ou descargas de reservatórios. Nestes casos, a água pode mover-se lateralmente na direção das margens dos rios, e se armazenar nessas zonas (armazenamento lateral) - Figura 2.10. No processo de armazenamento lateral, enquanto o nível d'água no rio não se eleva acima da sua calha, a maior parte do volume armazenado lateralmente a ele retorna após alguns dias ou semanas. Na medida em que o nível no rio se eleva, até ocupar a planície de inundação, a água pode infiltrar no solo e passar a contribuir para a recarga do aquífero. Neste caso, o retorno da água de recarga para o rio pode levar de semanas a anos, dependendo das características topográficas e geológicas na região.

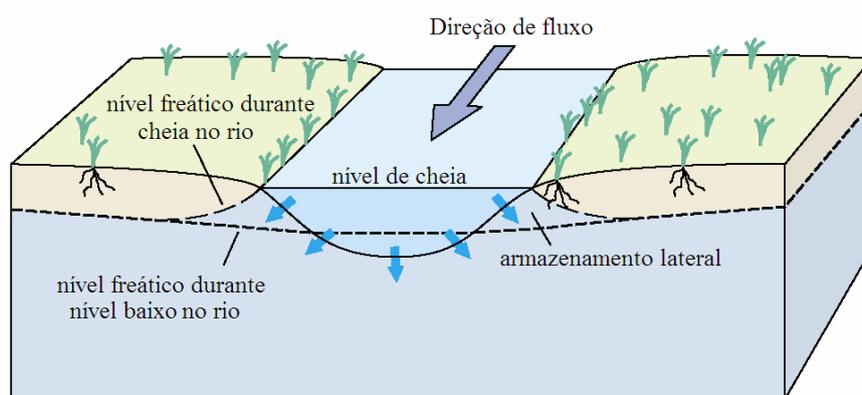


Figura 2.10: Interação entre rio-aquífero pelo armazenamento lateral (adaptado de Winter *et al.*, 1998).

Água subterrânea, lagos e banhados

Da mesma forma que os rios, os lagos (naturais ou artificiais) e banhados podem estabelecer três configurações de interação com as águas subterrâneas: condição efluente (Figura 2.11a); condição influente (Figura 2.11b) e condição efluente/influente (Figura 2.11c), sendo esta última configuração a mais freqüente (Winter *et al.*, 1998).

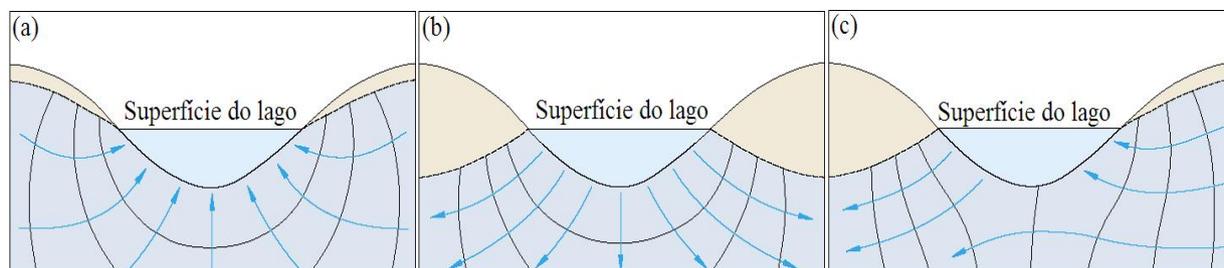


Figura 2.11: Condições de rede de fluxo em lagos/banhados: (a) condição efluente; (b) condição influente; (c) condição efluente/influente (adaptado de Winter *et al.*, 1998).

Embora as configurações de fluxo superficial-subterrâneo em lagos sejam semelhantes às dos rios, as interações entre elas diferem em vários aspectos. Em lagos, o nível da água não

varia tão rapidamente, assim, o armazenamento lateral é de menor importância; a evaporação em lagos é geralmente maior, devido a maior área superficial e a menor frequência de reposição das águas; e os lagos frequentemente têm em seus leitos uma quantidade maior de depósitos orgânicos, que podem afetar a distribuição de zonas de maior e menor permeabilidade e de trocas bioquímicas entre as águas superficiais e subterrâneas (Winter *et al.*, 1998).

No caso dos banhados, eles estão geralmente localizados em áreas onde há descarga de água subterrânea ou onde a drenagem de água a partir da superfície é bastante lenta. Ao contrário dos rios e lagos, no entanto, os banhados nem sempre ocupam regiões baixas do relevo ou depressões (Winter *et al.*, 1998). Em áreas de maior declividade ou quando há mudanças na inclinação do lençol freático, o aquífero pode interceptar a superfície do terreno e nela descarregar diretamente, permitindo o crescimento de plantas típicas de banhado (Figura 2.12a); descontinuidades geológicas de sub-superfície podem também modificar o sistema de fluxo local e propiciar o afloramento da água (Figura 2.12b). Outros tipos de banhados são formados ao longo do curso de rios, especialmente naqueles de menor velocidade (Figura 2.12c). E em regiões de maior altitude ou regiões planas extensas, podem ser formados banhados de características influentes, cujo acúmulo de água se dá, predominantemente, pela contribuição de precipitações ou descarga de rios (Figura 2.12d).

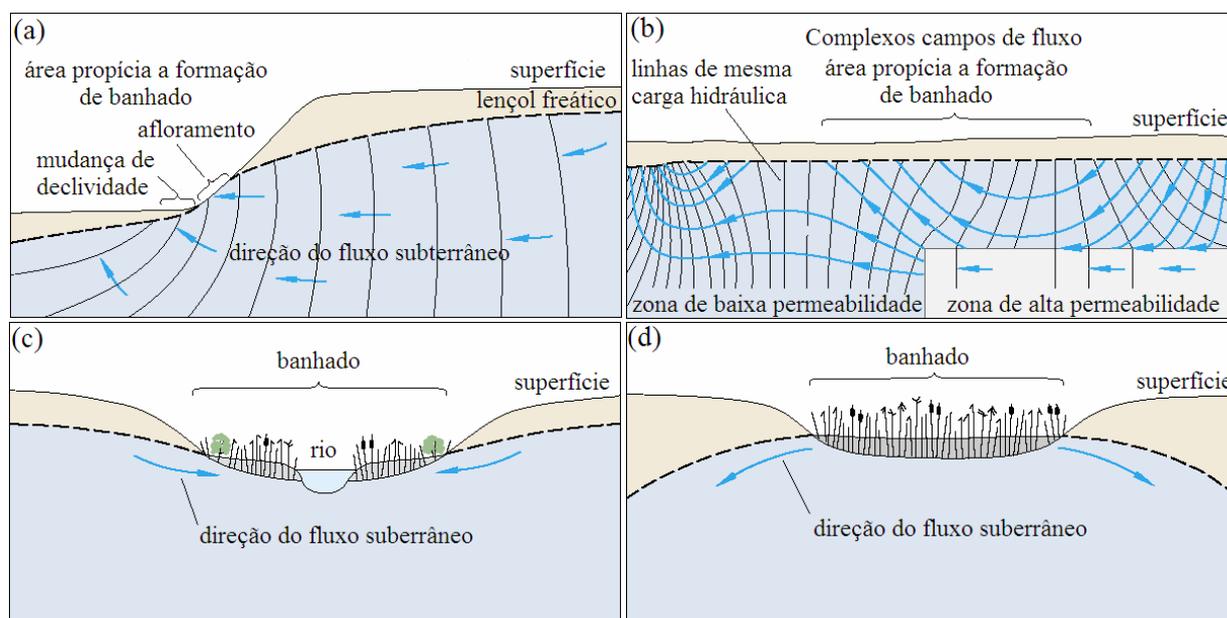


Figura 2.12: Interações entre banhados e fluxos subterrâneos de água: (a) em regiões de grande declividade ou com mudanças de inclinação do lençol; (b) em regiões de descontinuidades geológicas; (c) ao longo do curso de rios; (d) em regiões de maior altitude ou extensamente planas (adaptado de Winter *et al.*, 1998).

Muitos lagos e banhados são dependentes de um fluxo relativamente estável de contribuição subterrânea durante as mudanças sazonais e a variabilidade climática anual, por isso, eles podem ser muito sensíveis aos efeitos da exploração intensiva de água subterrânea e às mudanças de uso do solo, que podem modificar a recarga e o fluxo subterrâneo de água para a sua área.

Água subterrânea e o oceano

A interação entre águas superficiais e subterrâneas em terrenos costeiros é afetada principalmente por descargas de sistemas de fluxos subterrâneos regionais, pela evapotranspiração e pela variação da maré (Winter *et al.*, 1998).

Nessas áreas, a predominância dos sistemas de fluxo subterrâneo regionais está associada com a declividade do terreno: como a zona costeira costuma encontrar-se em um plano mais baixo que zonas continentais mais interiores, o lençol deixa de ter uma declividade mais acentuada e passa a ser quase paralelo ao terreno. Quanto à evapotranspiração, como a profundidade do lençol é mais baixa, pode ocorrer a taxas mais elevadas, ocasionando perdas significativas de água.

Nas zonas costeiras afetadas pela variação da maré, a interação entre as águas superficiais e subterrâneas ocorre de maneira semelhante àquela nos vales aluviais em situações de cheia. A principal diferença, entretanto, está no fato de que a previsibilidade, tanto temporal quanto em magnitude, da variação superficial da maré é maior que no caso de rios; e, neste caso, a água de contribuição oceânica tem composição química diferente, geralmente salobra ou salgada, que pode afetar a qualidade da água subterrânea.

2.2.5. - Significado ecológico das interações entre águas superficiais e subterrâneas

A inter-relação entre as águas superficiais e subterrâneas tem importância significativa quanto às condições ecológicas dos ambientes aquáticos em função das características qualitativas da água, especialmente se fatores como o pH, a temperatura e o oxigênio dissolvido forem alterados (Winter *et al.*, 1998).

O fluxo entre os corpos d'água superficiais e o aquífero é responsável pela existência de um habitat dinâmico para a fauna aquática próximo à interface dessa interação, numa região chamada de zona hiporréica, Figura 2.13. A zona hiporréica, que, etimologicamente, significa 'sob rio' (Estados Unidos, 2006), é uma camada sob o leito dos corpos superficiais,

na qual a água escoar através de pequenos segmentos do solo (tanto na direção superficial-subterrânea, quanto na direção contrária).

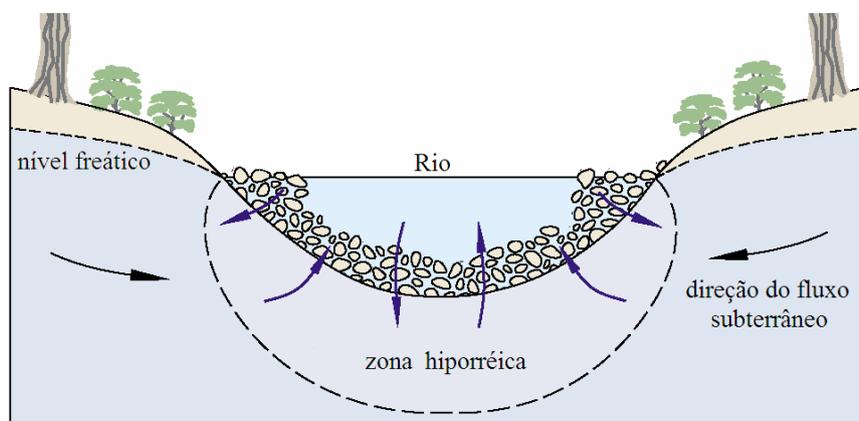


Figura 2.13: Zona hiporréica
(adaptado de Winter *et al.*, 1998).

Devido à mistura entre águas superficiais e subterrâneas, a zona hiporréica propicia trocas químicas e biológicas, que possibilitam a sobrevivência de diversos organismos que desempenham papéis fundamentais na ciclagem de nutrientes e no fluxo de energia dos níveis inferiores para os superiores na rede trófica (Negrello Filho, 2005).

O movimento da água nessa zona também promove a ocorrência de transferências químicas que afetam o suprimento de carbono, oxigênio e nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, que, por sua vez, afetam as características biológicas dos organismos aquáticos. A importância da zona hiporréica como fonte de nutrientes para os organismos aquáticos é discutida em Vallet *et al.* (1994).

Winter *et al.* (1998) destacam, ainda, como importância ecológica da interação entre as águas superficiais e subterrâneas, a atividade bioquímica que ocorre na zona hiporréica. Os processos bioquímicos nessa zona exercem influência mútua sobre a qualidade da água, tanto superficial quanto subterrânea, como demonstrado em estudo desenvolvido por Gunten & Lienert (1993).

2.3 - IMPACTOS ANTRÓPICOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A exploração desordenada dos recursos hídricos subterrâneos tem resultado numa significativa diminuição da reserva de água em muitos aquíferos pelo mundo (Llamas, 2004). Há um uso intensivo da água subterrânea quando se extrai uma fração expressiva da reserva

renovável interanual dos aquíferos, de modo a se modificar significativamente o seu regime hidrogeológico e a causar mudanças importantes na interação rio-aquífero (Espanha, 2002).

As atividades humanas, ao afetarem a integridade física e ecológica dos sistemas de águas superficiais e subterrâneas, podem reduzir a conectividade entre esses sistemas, alterar os processos de recarga e descarga do aquífero e causar contaminações orgânicas ou inorgânicas dos corpos d'água ou do próprio reservatório subterrâneo (Sophocleous, 2002). Llamas (2004) acrescenta, ainda, os rebaixamentos excessivos do nível de água em poços, a degradação da qualidade da água, a subsidência ou colapso do terreno e os impactos em corpos d'água superficiais e no ciclo da água no conjunto da bacia hidrográfica.

A degradação da qualidade da água subterrânea é devida, em grande parte, à contaminação pontual desde a superfície, que não é causada pelo uso da água subterrânea propriamente, mas pelo mau uso da terra, pelo inadequado manejo das atividades humanas ou pela intrusão salina em aquíferos costeiros. Um exemplo de contaminação das águas subterrâneas por atividades agrícolas é descrito em Carriger (2005), e Silva *et al.* (2006b) expõe o caso da poluição dos aquíferos por fontes urbanas no Recife/PE.

Dentre as obras hidráulicas, os reservatórios certamente são os maiores responsáveis por alterações no regime hidrológico entre os mananciais superficiais-subterrâneos (Winter *et al.*, 1998). Devido ao aumento da carga hidráulica sobre a superfície do solo provocada pelo volume de água represado, a elevação permanente do nível freático nas proximidades dos barramentos a até distâncias consideráveis pode aumentar a recarga do aquífero em algumas áreas e diminuir em outras, afetando todo o sistema de recargas e descargas na bacia.

Um outro fenômeno que pode ser causado pela exploração de água subterrânea é o da subsidência do terreno, de conseqüências mais agravantes em áreas urbanas. As subsidências causadas pela extração de água subterrânea são as que atingem maior extensão espacial, e uma vez ocorridas, tanto em aquíferos confinados quanto não-confinados, raramente podem ser revertidas (Scott, 1979). Uma abordagem mais completa sobre esse fenômeno é apresentada por Cabral *et al.* (2006), e casos de subsidência em decorrência da extração de água subterrânea são discutidos por Larson *et al.* (2001) e Bell (2006).

Os efeitos de retiradas de água subterrânea sobre o escoamento em corpos superficiais geralmente se antecedem ao aparecimento de zonas de recarga induzida (Sophocleous, 2002). Em rios de regime efluente, considerando uma situação em que o sistema é submetido a intensas retiradas de água subterrânea e em que a recarga induzida não ocorra, a captura das descargas naturais do aquífero ocorre quase que simultaneamente ao declínio no seu armazenamento. Em conseqüência disto, as vazões do fluxo de base tendem a diminuir

gradativamente até que um novo equilíbrio no sistema aquífero/rio seja alcançado. O significado desta inércia para efeitos de gestão é significativo, uma vez que outorgas atuais poderiam estar sendo concedidas desconsiderando efeitos de caráter cumulativo.

Internacionalmente, preocupações quanto aos impactos da sobreexploração de água subterrânea nas vazões fluviais podem ser verificadas em estudos desenvolvidos pelo GRAPES da Comissão Europeia (Acreman, 2006) e pelo IGARF do Water Resource Systems Research Laboratory da Universidade de Newcastle na Inglaterra (NCL, 2006).

No Brasil, Schuster *et al.* (2002) alertam para casos como os dos rios de algumas bacias do oeste baiano, como as dos rios Branco, Fêmeas, Formoso e Grande, nas quais as vazões outorgadas superficialmente já estão próximas do limite máximo estabelecido pela SRH da Bahia. De acordo com os autores, esse fato, aliado à construção de poços profundos com grandes vazões (cerca de 500 m³/h) por produtores agrícolas na região, pode provocar a diminuição das vazões fluviais. Scroccaro (2006) também relata o número de outorgas emitidas no Estado do Paraná na região de Maringá, com destaque para a perfuração de poços profundos que estariam provocando interferência na vazão dos rios na região.

2.4 - ESCALAS DE ANÁLISE DAS INTERAÇÕES ENTRE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

Nos itens anteriores, foram abordados os principais mecanismos físicos que controlam e que se relacionam com as interações entre as águas superficiais e subterrâneas, as quais podem ser avaliadas dentro de uma visão pontual (escala local) ou de uma visão integral na bacia (escala regional).

Na abordagem pontual ou localizada, essas interações são consideradas em áreas específicas da bacia, ou seja, em uma escala local restrita. Geralmente, as práticas comuns de planejamento de uso dos recursos hídricos subterrâneos consideram apenas essa abordagem, ao levar em conta, exclusivamente, a análise do efeito do bombeamento de poços em áreas de sua proximidade, isto é, em determinar a extensão e influência do cone de depleção provocado pela retirada de água do aquífero pelos poços.

Nesta pesquisa, é importante salientar que a abordagem utilizada para simulação dos usos superficiais e subterrâneos da água, não objetiva representar os efeitos de interação local, embora esse tema tenha sua importância e, por isso, tenha sido discutido ao longo do texto. Dessa forma, não são considerados na modelagem casos como os dos efeitos localizados do bombeamento de água por poços sobre outros poços adjacentes, ou o efeito das retiradas de

água subterrânea sobre a configuração do lençol freático e do escoamento em rios em seus arredores, como representado na Figura 2.14.

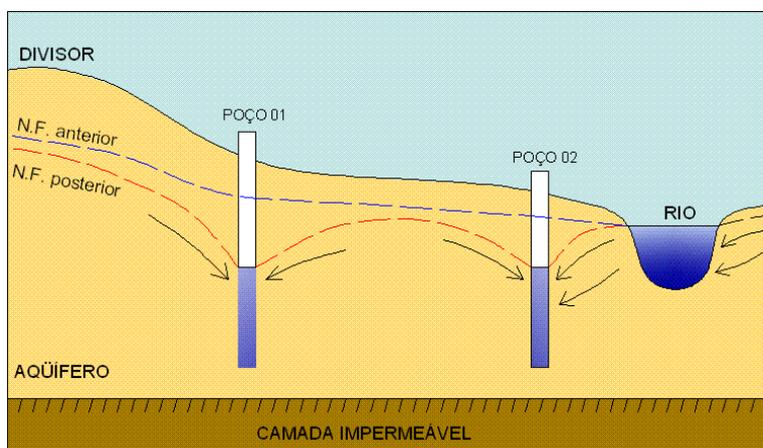


Figura 2.14: Efeitos locais do bombeamento de água em poços.

Outro caso que a pesquisa não tem intenção de abordar é o do efeito do bombeamento de poços em sistemas rio-aquífero hidráulicamente desconectados, como representado na Figura 2.15. Neste caso, a vazão extraída pelo poço geralmente não exerce influência significativa sobre a contribuição no escoamento do curso d'água superficial (Dingman, 2002).

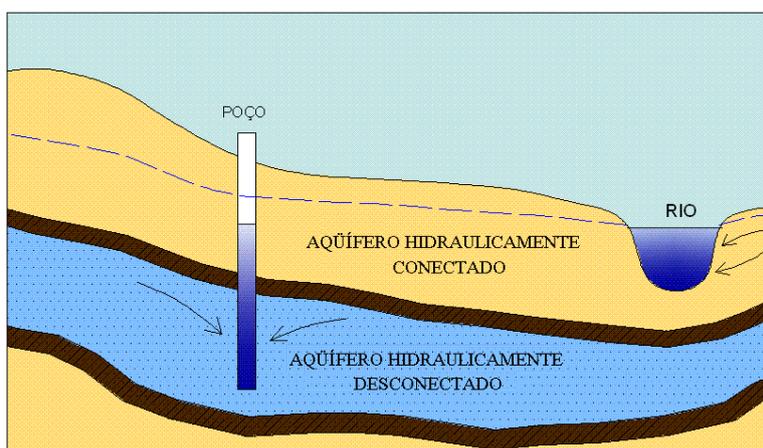


Figura 2.15: Bombeamento de água em aquífero hidráulicamente desconectado ao rio.

Uma simplificação adotada nesta pesquisa é de desconsiderar a entrada de água subterrânea na bacia (termo G_{in} na Equação 2.1 e na Figura 2.2), ou seja, as simulações não consideram o caso em que a bacia recebe contribuição de aquíferos adjacentes. Essa análise

simplificada pode ser aceitável para grandes bacias, uma vez que a variação subterrânea é, geralmente, menos significativa (Dingman, 2002).

Uma outra abordagem que pode ser considerada na análise da interação entre as águas superficiais e subterrâneas é a integral ou regional, na qual o efeito dessa interação é analisado na bacia como um todo, dentro de uma visão sistêmica e integradora do ciclo hidrológico, não sendo de interesse, portanto, a análise dos processos de inter-relações pontuais por si só. Esta é a abordagem considerada nessa pesquisa, por se entender que é nessa escala que são avaliados os custos, os benefícios e os riscos no planejamento dos recursos hídricos (Arnold *et al.*, 2000).

Nesse tipo de abordagem, pode-se avaliar a interação entre os mananciais superficiais e subterrâneos a partir das vazões em postos fluviométricos, considerando ser a vazão o fenômeno integrador dos processos que atuam na escala da bacia (Smakhtin, 2001). Assim, a interconexão e a interdependência entre os fenômenos que atuam no ciclo hidrológico podem ser consideradas, sendo possível avaliar os efeitos conjuntos da exploração da água subterrânea e da extração de água superficial sobre o escoamento do rio, englobando também os demais processos que operam no regime hidrológico na bacia - como representado na Figura 2.16.

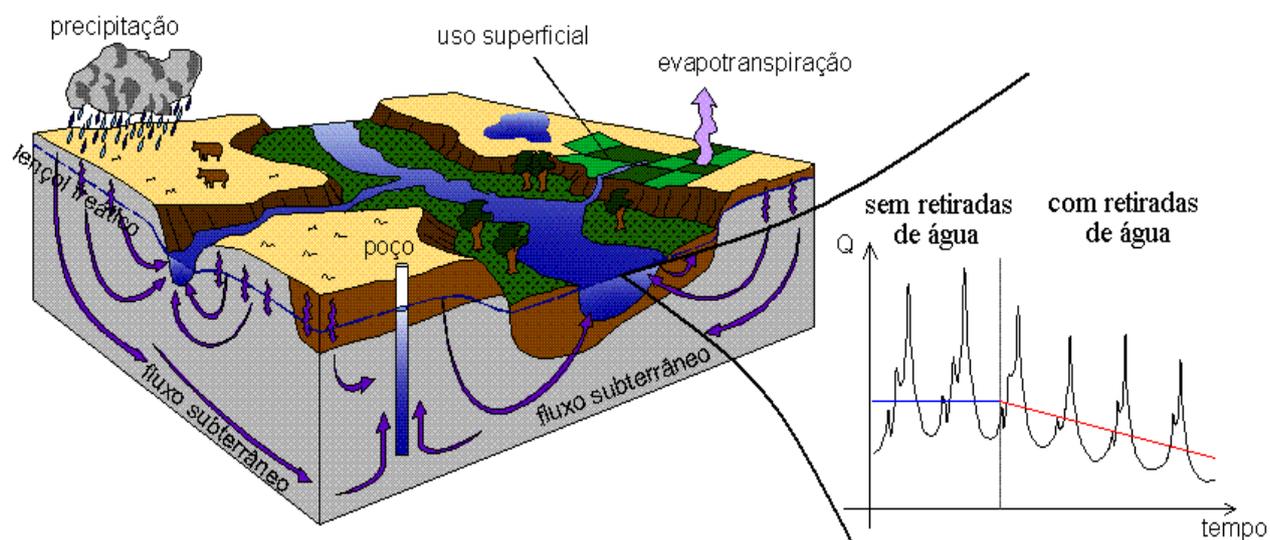


Figura 2.16: Efeitos das retiradas de água superficial e subterrânea sobre a hidrologia regional.

Ao se considerar a escala regional é possível analisar de forma mais integrada as inter-relações entre as águas superficiais e subterrâneas porque se podem avaliar os impactos dos usos dos recursos hídricos sobre a hidrologia regional da bacia, uma vez que todas as fases do

ciclo hidrológico, ou pelo menos as mais importantes, e também as características gerais da bacia (clima, topografia, geologia e usos do solo) estão mais conectadas (Dingman, 2002).

No item a seguir, são apresentados alguns dos métodos usualmente utilizados para estimar, a partir de séries observadas de vazão, a parcela do escoamento em rios que deriva da reserva subterrânea. Esses métodos também são utilizados para definição de vazões de referência para outorga de direito de uso de recursos hídricos superficiais.

2.5 - MÉTODOS DE ANÁLISE DE VAZÕES MÍNIMAS

A influência da contribuição subterrânea no escoamento de cursos hídricos superficiais tem maior importância, principalmente, no período de estiagem quando as vazões nesses corpos são resultantes, em sua maioria, da descarga subterrânea, considerando que nesse período o curso d'água esteja sob condição efluente. Dessa forma, é necessário o estudo de metodologias que permitam avaliar as vazões no período de recessão e a parcela de contribuição subterrânea nas mesmas.

A análise de vazões mínimas tem importância ainda nos estudos de qualidade da água e na determinação da menor vazão a ser mantida nos rios após a alocação dos usos em processos de outorga (Tucci, 2002). Várias são as metodologias encontradas na literatura sobre métodos de análise de vazões mínimas, algumas das quais apresentadas em Gifford & Oxon (1980), Krokli (1989), Leppajarvi (1989), Vogel & Kroll (1989), Nathan & McMahon (1990), Smakhtin (2001), Tucci (2002) e Tucci (2004).

Neste trabalho serão abordados métodos de análise baseados nas curvas de permanência ou duração, curvas de frequência de vazões mínimas, separação do escoamento em hidrogramas e curvas de recessão. Essas curvas permitem uma estimativa bastante adequada dos percentuais utilizados para determinação da proporção do escoamento fluvial originário do reservatório subterrâneo e para se estabelecerem critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos superficiais (Smakhtin, 2001). Deve-se, entretanto, ter cautela quanto ao seu uso, pelas imprecisões que os dados medidos de vazão podem conter, principalmente nas vazões mínimas, que são justamente as que estão mais relacionadas com o aporte subterrâneo no escoamento dos rios.

2.5.1. - Curva de permanência

A curva de permanência exprime a relação entre as vazões ou níveis observados e a percentagem de tempo em que cada vazão ou nível é igualado ou excedido no período de tempo selecionado (dia, mês ou ano). Usualmente, os níveis de água são utilizados para estudos de calado mínimo em projetos de navegação, enquanto que as vazões são usadas quando se deseja conhecer a disponibilidade hídrica do curso d'água.

Por meio das curvas de permanência é possível estabelecer índices e análises do efeito de diferentes fatores sobre a bacia, como a contribuição subterrânea, a geologia, a aridez e as intervenções antrópicas, as quais estão relacionadas com as características das vazões do rio e, por conseguinte, com as características da curva de permanência (Smakhtin, 2001). Dentre os vários elementos que podem ser extraídos dessa curva estão informações quanto à variabilidade do escoamento e das vazões mínimas, ao grau de intermitência do rio e à proporção do escoamento superficial que se origina do armazenamento subterrâneo.

Os valores característicos da curva de permanência são os pontos extremos, nos quais geralmente existem inflexões marcantes que retratam o comportamento das vazões máximas e das estiagens extremas; e o trecho médio, que representa a faixa dominante de vazões no rio (Tucci, 2002).

Com relação à influência subterrânea sobre a vazão do rio, uma informação importante que pode ser extraída dessa curva é quanto às descargas abaixo da vazão mediana (Q_{50}), que corresponde à descarga que se iguala ou excede 50% do período. Essas vazões representam uma parte da curva de permanência que pode ser interpretada como um indicativo da contribuição subterrânea ao escoamento fluvial. Se a declividade da curva de permanência abaixo da Q_{50} for pequena, a contribuição subterrânea é normalmente significativa, ao contrário, uma declividade alta, indica uma contribuição pequena ou bastante variável (Smakhtin, 2001).

Um índice de interesse nesse estudo que pode ser extraído da curva de permanência é a relação entre a Q_{90} e a Q_{50} , as descargas que se igualam ou excedem 90% e 50% do período, respectivamente. Esse índice pode ser interpretado como representativo da proporção do escoamento do rio que se origina do reservatório subterrâneo, desconsiderando os efeitos de escala da bacia (Nathan & McMahon, 1990).

A Figura 2.17 mostra a curva de permanência calculada com dados diários do período de janeiro de 1984 a dezembro de 1995 na estação Derocal (46455000) no Rio das Fêmeas. Esse rio, localizado no oeste baiano e inserido na Bacia do Rio Grande (afluente da margem

esquerda do Médio São Francisco), apresenta uma vazão bastante regularizada em virtude da contribuição subterrânea do aquífero Urucuia (Schuster *et al.*, 2002), que é observada pela pequena declividade da curva de permanência (eixo das vazões em escala logarítmica). A relação entre a Q_{90} e a Q_{50} nessa estação resultou num percentual de contribuição subterrânea de 87%. Pimentel *et al.* (2000), utilizando o método do mínimo local (Sloto & Crouse, 1996) para separação do escoamento na mesma estação fluviométrica e para o mesmo período de dados, chegou ao valor médio de contribuição subterrânea no escoamento de base de 91%, com valores anuais variando entre 82% e 95%, o que mostra a razoabilidade em se utilizar o índice Q_{90}/Q_{50} na determinação da proporção subterrânea no escoamento fluvial, quando da inexistência de métodos mais precisos.

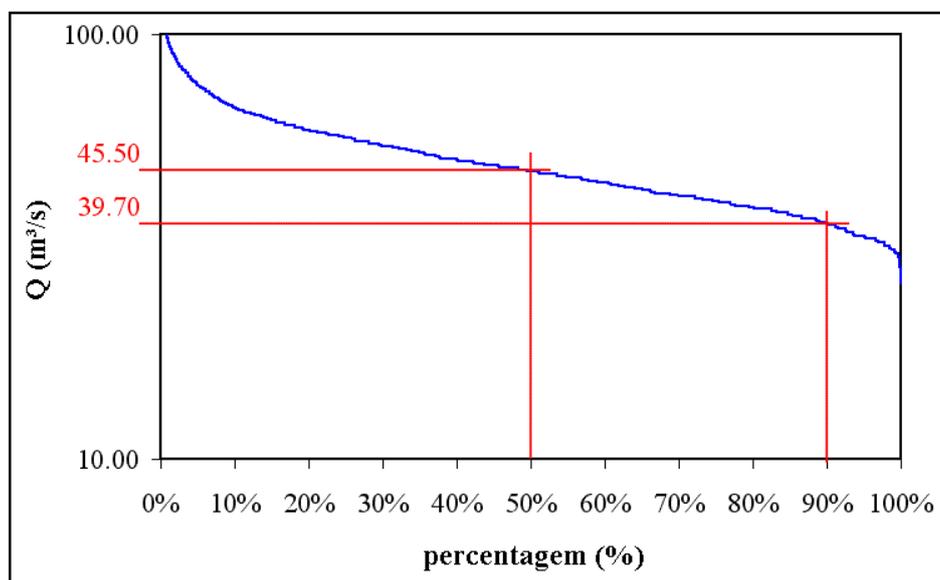


Figura 2.17: Curva de permanência no posto Derocal no Rio das Fêmeas (BA)

Uma outra aplicabilidade da curva de permanência, no caso da gestão das águas no Brasil, é na definição de limites de outorga superficial por muitos dos órgãos gestores de recursos hídricos, que utilizam percentuais dos índices Q_{90} e Q_{95} para estabelecer limites da máxima vazão de retirada de água nos rios.

2.5.2. - Curva de frequência de vazões mínimas

A curva de frequência de vazões mínimas relaciona o tempo de retorno (ou a probabilidade de não-excedência) de uma vazão que permanece no rio durante um

determinado intervalo de tempo, sendo normalmente construída com base em séries de vazões mínimas.

A curva de frequência procura inferir a função cumulativa de probabilidades da população da qual a amostra foi retirada (das vazões, por exemplo). Isso permite estimar níveis de frequência e, reciprocamente, os riscos de ocorrência de valores maiores ou menores que um dado nível de vazão (Tucci, 2002).

A estimativa do tempo de retorno das amostras de dados pode ser determinada pelo uso de funções de ajuste das distribuições de frequência das variáveis analisadas. Dentre as fórmulas comumente utilizadas citam-se as distribuições de Weibull, Normal, Log-normal e a distribuição Assintótica de Extremos I (Lanna, 2004).

As durações mais comuns utilizadas para análise de frequência de vazões mínimas são as de 1, 3, 7, 15, 30, 60, 90 e 180 dias, sendo a determinação desses valores realizada pela pesquisa do valor mínimo por meio de médias móveis dessas durações. Normalmente, durações maiores, como 7 ou 30 dias, apresentam maior interesse ao usuário, já que a seqüência de vazões baixas é que representa uma situação desfavorável para a demanda ou para as condições de conservação ambiental. Procedimentos para determinação de curvas de vazões mínimas são encontrados em Tucci (2002), Lanna (2004) e Clarke (2004).

No Brasil, a vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$) é utilizada para estudos de qualidade da água em rios e na definição de percentuais outorgáveis de água superficial, como fazem os órgãos gestores de recursos hídricos em Minas Gerais (IGAM) e em São Paulo (DAEE). Uma das vantagens da utilização da vazão mínima de 7 dias é que ela é menos sensível a erros de medição e, na maioria dos casos, não apresenta grande diferença com relação à mínima de 1 dia de duração (Smakhtin, 2001).

No Capítulo 3, são discutidos alguns dos aspectos relacionados à emissão de outorgas por órgãos gestores de recursos hídricos no Brasil, os quais, em sua maioria, utilizam como critérios para outorga de água superficial, percentuais de índices extraídos de curvas de permanência e de frequência de vazões mínimas.

2.5.3. - Separação do escoamento em hidrogramas

Um outro método empregado para estipular a proporção da vazão no rio que se origina do aquífero é o da separação do escoamento em hidrogramas. Revisões sobre essas técnicas podem ser encontradas em Hall (1968) e Brodie & Hostetler (2006).

A análise do escoamento de base em hidrogramas a partir de métodos de separação do escoamento pode fornecer informações importantes quanto à magnitude e ao intervalo de tempo de contribuição da vazão subterrânea ao rio. Esses métodos podem ser divididos, basicamente, em dois tipos: as técnicas de separação por evento e as técnicas de separação contínua.

Nas técnicas de separação por evento, a parcela do escoamento superficial é separada no hidrograma observado tendo como limites o início da ascensão do hidrograma e o fim da contribuição superficial na vazão total no rio (*runoff*). Os métodos mais utilizados para identificar esses pontos são o método de descarga constante, o método de declividade constante e o método côncavo (Tucci, 2004).

A vazão de base em um hidrograma pode ser separada também por uma técnica gráfica de bastante aplicação desenvolvida por Bernes em 1939 (Kulandaiswamy & Seetharaman, 1969). Essa técnica consiste em graficar o hidrograma em uma escala semi-logarítmica, na qual os trechos retilíneos indicam onde o escoamento é exclusivamente formado pela vazão de base.

As técnicas de separação por evento têm pouca relevância para o estudo das vazões mínimas, pois estão mais voltadas à estimativa do escoamento superficial durante um evento de cheia. Já as técnicas de separação contínuas estão mais direcionadas à determinação do escoamento de base para um longo período de observação (um ano, vários anos ou todo o período de dados), inclusive nas épocas de baixas vazões. Essas técnicas normalmente fazem uso de filtros digitais que permitem o isolamento da vazão proveniente do reservatório subterrâneo daquela gerada em resposta a um evento chuvoso. Várias dessas técnicas têm sido reportadas na literatura, podendo ser citados os trabalhos de Birtles (1978), Nathan & McMahon (1990), Chapman (1991) e Sloto & Crouse (1996).

Os índices que podem ser expressos a partir da separação do escoamento, geralmente incluem o volume médio anual do fluxo de base e a descarga de base média diária de longo período. Dentre esses índices, um de grande aplicação e importância nos estudos de vazões mínimas é o *baseflow index* (BFI), que é uma taxa adimensional definida pela divisão do volume escoado subterraneamente pelo volume total escoado. Em rios de bacias com grande contribuição subterrânea no seu escoamento, o BFI se aproxima de 1, mas chega a se igualar a zero em rios efêmeros.

2.5.4. - Curvas de recessão

A curva de recessão é o resultado, no hidrograma, da depleção do escoamento durante períodos sem eventos chuvosos e representa, dessa forma, a relação entre o armazenamento e a saída de água na bacia. A taxa de decremento e, conseqüentemente, a forma da curva de recessão dependem, principalmente, das características geológicas e da distância do curso d'água aos divisores da bacia (Smakhtin, 2001).

A análise das recessões para o entendimento dos processos que influenciam o escoamento de base pode ser feita a partir de segmentos individuais ou coletivos de recessões obtidas do hidrograma, sendo possível empregar, para isso, métodos gráficos ou analíticos. Os métodos gráficos consistem em representar as múltiplas curvas de recessões e, a partir dessas, obter uma curva envelope, a qual se correlaciona com as principais condições e características do escoamento de base. Sujono *et al.* (2004) descrevem as principais técnicas utilizadas na elaboração dessas curvas.

Já nos métodos analíticos, são aplicadas equações matemáticas para ajuste das recessões. A formulação matemática clássica desse método é a que considera a curva de recessão como uma função de decaimento exponencial, dada pela equação:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-ct}, \quad (\text{eq. 2.3})$$

onde: Q_t é o escoamento no tempo t ; Q_0 é o escoamento no início da recessão e c é uma constante.

Nessa função, o termo e^{-ct} pode ser substituído pela constante de recessão K . Quanto maior o valor dessa constante, também denominada fator de depleção, maior é a influência do escoamento de base no período de recessão (Brodie & Hostetler, 2006).

As curvas de recessão podem ser aplicadas para avaliar as conseqüências das retiradas de água subterrânea sobre a disponibilidade hídrica do rio, uma vez que os efeitos das extrações exercem maior influência durante o escoamento de base, no qual a água, dependendo das características do canal, pode ser totalmente proveniente do armazenamento subterrâneo. Tallaksen (1995) apresenta uma revisão sobre as análises de curvas de recessão e suas várias aplicações.

No Capítulo 4, é abordada a representação dos aquíferos em modelos hidrológicos, cuja fundamentação está em formulações matemáticas relacionadas à curva de recessão nos hidrogramas.

CAPÍTULO 3: GESTÃO INTEGRADA DE OUTORGAS DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS

A implementação de políticas de gestão integrada dos recursos hídricos, com vistas a atender às demandas de água e a minimizar os impactos sobre a disponibilidade hídrica das bacias e sobre os ecossistemas, deve considerar a interdependência entre os mananciais superficiais e subterrâneos, os biomas que deles dependem e a sustentabilidade do sistema como um todo. Essa abordagem holística, entretanto, é uma tarefa difícil no sentido de se tentar traduzir questões socioeconômicas e políticas complexas, em questões técnicas que possam ser quantificadas sistematicamente (Alley & Leake, 2004).

A Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH tem como um de seus objetivos o uso integrado das águas, considerando a unicidade do ciclo hidrológico. Dentre os instrumentos da PNRH, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos é o mecanismo pelo qual o uso integrado e múltiplo pode ser tecnicamente aplicado, procurando assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos das águas e o efetivo exercício de direitos a seu acesso. A aplicação de critérios integrados de outorgas de águas superficiais e subterrâneas, no entanto, ainda está fora da realidade atual do planejamento de recursos hídricos no Brasil.

Neste capítulo, são discutidos os critérios de outorga utilizados na gestão dos recursos hídricos no País e as metodologias comumente empregadas para a definição desses critérios. Cruz (2001) apresenta uma discussão mais abrangente sobre diferentes sistemas de definição de critérios de outorga adotados pelo mundo. Ao final do capítulo, é feita uma caracterização das outorgas emitidas no Brasil desde a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, em 1997.

3.1 - OUTORGA DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

As águas superficiais, segundo os Artigos 20 e 26 da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988), podem ser de domínio dos Estados, no caso dos corpos hídricos superficiais localizados exclusivamente no território estadual, ou da União, no caso dos corpos hídricos localizados em terreno da União, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham. Com relação a essas águas, devido a sua utilização em larga escala em praticamente todos os setores da economia, já vêm sendo adotados critérios para análise de pedidos de outorgas para seu uso por

praticamente todos os órgãos gestores de recursos hídricos do País. Esses critérios estão baseados na definição de vazões mínimas de referência, as quais caracterizam uma condição de garantia hídrica no manancial. A partir dessa condição de criticidade é que são realizados os cálculos de alocação da água, de modo que, quando da ocorrência da situação de escassez, todos os usuários, ou pelo menos os mais prioritários, mantenham, de certa forma, os usos outorgados em operação (Bahia, 2003).

No Quadro 3.1 são mostradas as vazões de referência adotadas em alguns órgãos gestores de recursos hídricos no Brasil para a definição de limites máximos de água superficial outorgáveis em suas bacias hidrográficas. Como se observa, os critérios utilizados estão baseados em vazões de estiagem definidas estatisticamente a partir de curvas de análise de vazões mínimas, como as vazões com 90% e 95% de permanência no rio, Q_{90} e Q_{95} , respectivamente, obtidas da curva de permanência; e a vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno, $Q_{7,10}$, obtida da curva de frequência de vazões mínimas. Os métodos utilizados para gerar essas curvas foram discutidos no capítulo anterior, no item 2.5.

Quadro 3.1: Critérios de outorga de direito de uso de água superficial baseados em vazões mínimas de referência.

Órgão gestor de R.H.	Critério para outorga de água superficial
IGAM-MG	até 30% da $Q_{7,10}$
DAEE-SP	até 50% da $Q_{7,10}$
NATURATINS-TO	até 75% da Q_{90}
SRH-BA	até 80% da Q_{90}
SRH-CE	até 90% da Q_{90}
AESA-PB (antiga AAGISA-PB)	até 90% da Q_{90}
IGARN (antiga SERHID-RN)	até 90% da Q_{90}
SEPLANTEC-SE	até 100% da Q_{90}
SUDERHSA-PR	até 50% da Q_{95}
ANA (Nacional)	até 70% da Q_{95}
SEMARH-GO	até 70% da Q_{95}
SEMAR-PI	até 80% da Q_{95}

Fonte: Brasil, 2005a (atualizado)

O quadro mostra que os percentuais outorgáveis baseados em vazões mínimas de referência variam amplamente entre as regiões. É interessante observar que nos Estados da região nordeste, onde a disponibilidade de água é, no geral, pequena, os limites dos percentuais de outorga superficial são menos restritivos do que limites estabelecidos na região centro-sul, na qual a oferta hídrica natural é maior (salvo regiões de uso intensivo da água).

Quanto às águas subterrâneas, uma primeira dificuldade que surge no seu gerenciamento é devido ao conflito entre legislações. Pela Constituição Federal de 1988, essas águas são de domínio exclusivo dos Estados (Brasil, 1988). Por outro lado, as águas minerais, que são águas subterrâneas com propriedades físico-químicas específicas, por serem consideradas recursos minerais (e não recursos hídricos), segundo o Código de Mineração (Brasil, 1967) e o Código das Águas Minerais (Brasil, 1972), são de domínio da União, estando sujeitas à lavra pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM e não à outorga de direito de uso.

A Lei 9.433/97 não se pronuncia quanto às atribuições legais de gerenciamento dessas águas, que têm sido tratadas pela Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, pela aprovação de resoluções como a Resolução CNRH nº 15 (Brasil, 2001) e a Resolução CNRH nº 22 (Brasil, 2006), que estabelecem diretrizes gerais para a gestão das águas subterrâneas, considerando seu aspecto indissociável com as águas superficiais.

As indefinições com relação às pertinências das responsabilidades legais sobre as águas subterrâneas podem criar dificuldades no estabelecimento de critérios de uso dessas águas. De uma forma ou de outra, mesmo com a previsão legal das emissões de outorga para esses usos, pode-se verificar que diversos órgãos estaduais ainda não possuem procedimentos ou critérios consolidados para análise e emissão dessas outorgas.

Essa desatenção com o planejamento dos usos subterrâneos das águas não é exclusiva do Brasil. Na maioria dos países, a exploração dos recursos hídricos subterrâneos não foi adequadamente planejada, financiada ou controlada pelas autoridades de água existentes (Llamas, 2004). O resultado foi uma tendência para a gestão da água superficial e o freqüente mau gerenciamento das fontes de água subterrânea, sendo quase inexistente o manejo integrado desses dois recursos, embora, tradicionalmente, as leis reconheçam a sua conexão física.

Em decorrência da baixa importância relativa e da ausência, até algum tempo atrás, de dispositivos legais que delegassem competência para a gestão e proteção das águas subterrâneas, o conhecimento e a informação sobre a sua exploração, captação, controle, proteção, usos e outorga, ou inexistem ou, quando existem, pertencem a órgãos, instituições científicas ou usuários, sem, contudo, apresentar um mínimo de uniformidade e, muito menos, sem um tratamento científico adequado que garanta a preservação, a proteção e a interação desses recursos com as disponibilidades superficiais de água (Dantas & Peixinho, 2006).

No caso brasileiro, em alguns Estados, os pedidos de outorga para uso da água subterrânea se baseiam em testes de bombeamento ou em função da média da capacidade específica dos aquíferos (quando existem informações hidrogeológicas suficientes). Porém, a maior parte dos Estados se preocupa apenas com a tomada de precauções por parte do usuário no que se refere à qualidade da água, de modo a evitar a contaminação do aquífero (Brasil, 2005a).

Na prática, os critérios para outorga de água subterrânea se baseiam mais em normas construtivas de poços e testes de bombeamento, avaliando impactos em poços vizinhos, se houver, do que na interferência entre águas superficiais e subterrâneas (Lanna, 2006).

Nesse sentido, é relevante a recomendação dessa discussão entre as autoridades outorgantes, visando à definição de metodologias para a consolidação de critérios de outorga para exploração de água subterrânea na escala da bacia hidrográfica, considerando os aspectos técnicos em termos de disponibilidade hídrica, além de sua inter-relação com as águas superficiais.

A maioria das proposições na definição de retirada segura de água subterrânea está fundamentada na quantidade de água que pode ser extraída regularmente e permanentemente do aquífero sem deplecionar perigosamente a sua reserva (Dingman, 2002). Um mal-entendimento comum foi, e ainda o é, o de se acreditar que a extração de água subterrânea seria segura se a taxa média anual de extração não excedesse a taxa média anual da recarga natural do aquífero, prática conhecida na literatura como *safe-yield*, volume seguro, volume sustentado, volume perene ou volume ótimo (Fetter, 1994 *apud* Llamas, 2004).

Os critérios baseados apenas no conceito de *safe-yield* ignoram a descarga natural da água subterrânea nos corpos superficiais e os demais componentes do balanço hídrico no aquífero (ver item 2.2.1). Dessa forma, pode-se estar determinando uma taxa de exploração que pareça segura com relação ao armazenamento subterrâneo, mas que não seja segura quanto à descarga natural nos corpos d'água.

Khan & Mawdsley (1988) citam que apenas quando problemas relacionados à exploração intensiva de água subterrânea começam a aparecer, que estudos são realizados para analisar os volumes retirados de água do aquífero, o que não é uma garantia de que o mesmo possa recuperar sua capacidade anterior. Para se conhecer o grau adequado ou admissível de sobreexploração de um aquífero, é necessário que se analisem, de forma detalhada e atualizada, os efeitos da exploração e das medidas de correção que se adotem (Custodio, 2002).

Um dos atributos mais importante na concepção de critérios para a exploração de água subterrânea, considerando seu aspecto conjunto com as águas superficiais, está na perspectiva de gerenciamento em longo prazo, já que as práticas de exploração dos recursos hídricos nas bacias não são estáticas, ocorrendo de forma dinâmica ao longo dos anos (Alley & Leake, 2004, e Alley *et al.*, 1999).

Na Austrália, o Bureau of Rural Science prevê o desenvolvimento de métodos para avaliar a conectividade entre os corpos superficiais e subterrâneos como base para as decisões de gerenciamento dos recursos hídricos (Fullagar *et al.*, 2006). No Reino Unido, a agência responsável pelo gerenciamento das águas e do meio ambiente - The Environment Agency, tem como um dos objetivos prioritários da sua política de gerenciamento, a consideração da integração entre as águas superficiais e subterrâneas, sendo a filosofia central da agência quanto ao licenciamento de usos dos recursos hídricos, o reconhecimento de que as decisões tomadas quanto à alocação da água subterrânea, frequentemente têm implicações sobre o escoamento nos rios (Reino Unido, 2006).

Na procura de metodologias para um gerenciamento sustentável das águas e nesse cenário de inexistência de critérios de outorga que considerem o uso integrado, é importante que, além do conhecimento adequado da interação entre as águas superficiais e subterrâneas, se avalie a sua relação com o planejamento territorial. Do mesmo modo, junto com esse planejamento global, é necessário impulsionar a tomada de decisões sobre os recursos hídricos à escala regional e estabelecer uma efetiva participação dos usuários nessa gestão, reconhecendo a grande variedade de situações sócio-econômicas e hidrogeológicas existentes, que torna praticamente impossível a aplicação de metodologias únicas em todos os lugares (Espanha, 2002).

No Brasil, uma das dificuldades na gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos está na quase ausência de estudos básicos relacionados às características e capacidade dos aquíferos. Silva *et al.* (2006a) sugerem o planejamento da instalação de redes piezométricas, começando pelo cadastramento dos poços existentes (já que alguns poderiam servir para monitorar o aquífero com baixos custos) e o monitoramento contínuo das intervenções nas bacias e dos níveis piezométricos nos poços, além da análise dos vários efeitos hidrológicos de diferentes taxas de retiradas, da localização de poços, dos limites de extração e da definição de horizontes de planejamento (o que poderia ser facilitado pelo uso de modelos).

O desenvolvimento de metodologias para determinação de limites de outorgas que considerem o uso integrado das águas superficiais e subterrâneas deve ter como fundamento

principal a manutenção de vazões no rio que suportem o ecossistema aquático, as quais são chamadas na literatura de vazões residuais, remanescentes, ecológicas ou ambientais. Os métodos para definição dessas vazões se dividem em seis categorias: (1) métodos hidrológicos; (2) métodos de classificação hidráulica; (3) métodos utilizando regressões múltiplas; (4) métodos de classificação de habitat; (5) métodos holísticos; e, (6) métodos informais (Benetti *et al.*, 2003).

Os critérios atualmente utilizados para definição de outorgas superficiais em rios brasileiros indiretamente estabelecem a vazão ecológica a ser adotada, já que limitam a quantidade de água que deve continuar no rio. Por exemplo, a ANA, ao dispor como limite até 70% da Q_{95} para os usos superficiais, estabelece como vazão remanescente no rio no mínimo 30% da vazão com 95% de permanência.

Essa metodologia está fundamentada nos métodos hidrológicos, os quais apenas presumem que a manutenção de uma vazão de referência, calculada com base em alguma estatística da série histórica, possa acarretar em benefício ao ecossistema, não analisando criteriosamente o aspecto ambiental. A grande limitação desse método é que quanto à definição de uma vazão ecológica, essa metodologia ignora os principais aspectos do regime hidrológico (magnitude, tempo de duração, frequência e época de ocorrência de vazões mínimas e máximas), necessários para o bem-estar do ecossistema fluvial (Collischonn *et al.*, 2005).

Por outro lado, essas metodologias simplificadas podem ser aplicadas visando manter o princípio de precaução do equilíbrio ecológico do sistema, quando dados ecológicos inexistem ou em circunstâncias em que esses dados não possam ser coletados e validados, o que faz com que uma das principais vantagens desses métodos seja, justamente, a pequena quantidade de informações necessárias para sua implementação (Arthington *et al.*, 2006).

No Brasil, os métodos hidrológicos são ainda os únicos utilizados nos processos de outorga das águas superficiais e, de igual forma, da vazão ecológica. As metodologias aplicadas baseiam-se em valores máximos percentuais extraídos de curvas de permanência ou de curvas de probabilidade de vazões mínimas, ambas elaboradas a partir de dados de vazões observadas nos rios.

3.2 - ANÁLISE DAS OUTORGAS EMITIDAS NO BRASIL

Até o final de 2004, o número total de outorgas emitidas no país foi de 95.107, sendo 73.233 em mananciais superficiais e 21.874 em mananciais subterrâneos (Brasil, 2005a). A

Figura 3.1 apresenta um gráfico das outorgas emitidas pela União, Estados e o Distrito Federal, e a Figura 3.2 apresenta a participação de cada um desses no total de outorgas emitidas.

O Estado de Minas Gerais, no qual se encontra inserida a bacia do Alto Rio Paranaíba, utilizada como estudo de caso, apresenta o terceiro lugar no número de outorgas emitidas no País. Até outubro de 2006, o IGAM, órgão gestor dos recursos hídricos nesse Estado, totalizou 18.213 outorgas emitidas, sendo desse total 62% outorgas para uso superficial e os outros 38% para outorgas de uso subterrâneo da água (Minas Gerais, 2006).

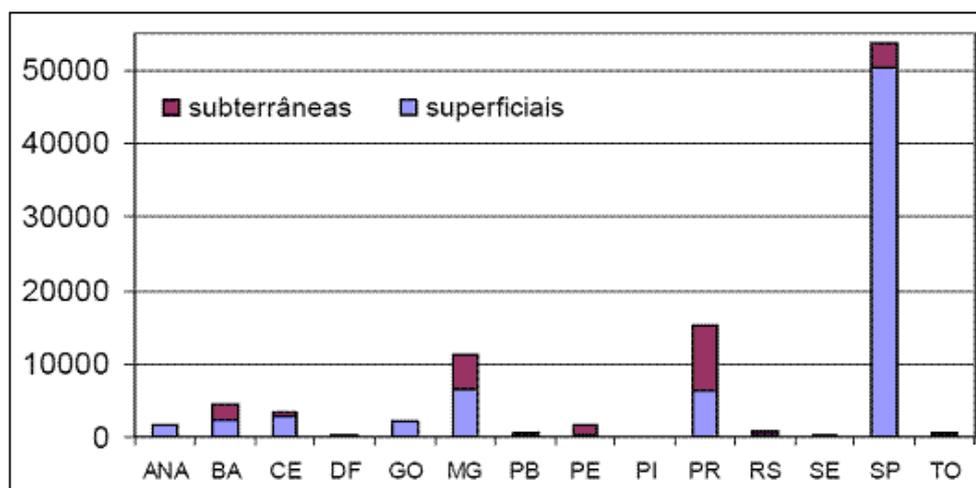


Figura 3.1: Número de outorgas emitidas pela União, Estados e Distrito Federal até 2004.

(fonte: Brasil, 2005a).

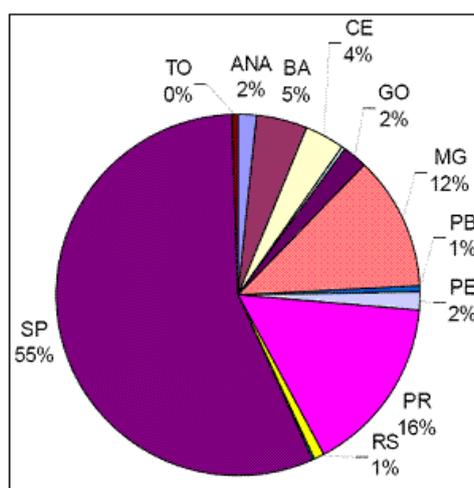


Figura 3.2: Percentual de outorgas emitidas por unidade federativa.

(fonte: Brasil, 2005a).

Com relação às vazões outorgadas, até dezembro de 2004, a União, os Estados e o Distrito Federal somavam 2.304 m³/s, sendo 2.214,50 m³/s outorgados em mananciais

superficiais e 89,50 m³/s outorgados em mananciais subterrâneos (Brasil, 2005a), como mostrados nos gráficos das Figuras 3.3 e 3.4.

No que se refere às vazões outorgadas por Estado, Minas Gerais vem em segundo lugar, totalizando cerca de 1.053 m³/s outorgados até outubro de 2006, sendo desse valor 95% para usos superficiais e 5% para usos subterrâneos (Minas Gerais, 2006).

Embora as vazões outorgadas para uso subterrâneo correspondam a um pequeno percentual do total de usos atualmente outorgados, no planejamento das disponibilidades futuras dos recursos hídricos, deve-se considerar a tendência no aumento dos usos das águas subterrâneas, principalmente em regiões de intensa demanda hídrica, nas quais o número de outorgas para águas superficiais já se encontra próximo ao máximo volume outorgável possível.

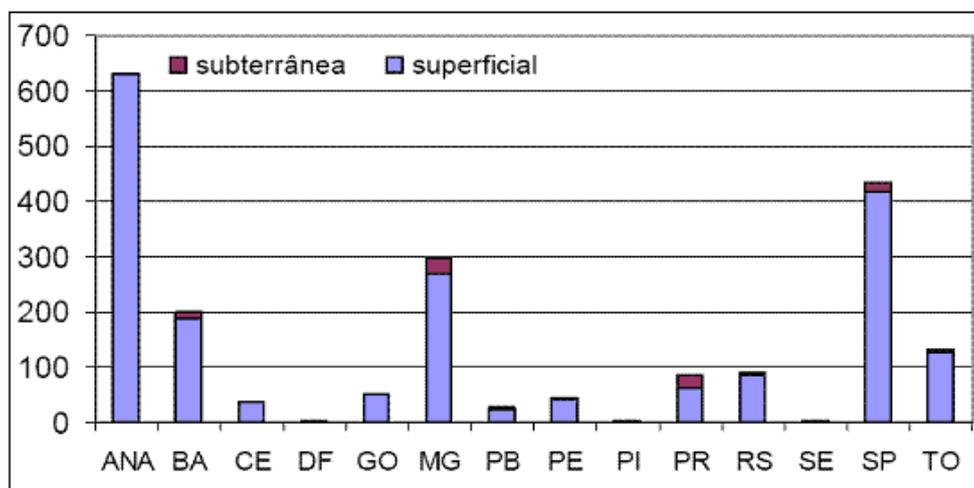


Figura 3.3: Vazões outorgadas pela União, Estados e Distrito Federal até 2004.
(fonte: Brasil, 2005a).

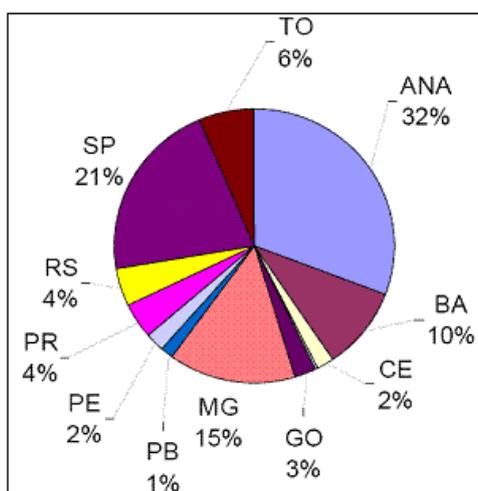


Figura 3.4: Percentual de vazões outorgadas pela União e unidades federativas.
(fonte: Brasil, 2005a).

Em Minas Gerais, a comparação entre as vazões outorgadas para uso subterrâneo dos recursos hídricos do final de 2004 até o final de 2006 mostra um acréscimo de 41%, o que significa que as vazões outorgadas passaram de cerca de 38 m³/s para cerca de 54 m³/s (Minas Gerais, 2006). Isso pode significar um aumento na exploração dos recursos hídricos de mananciais subterrâneos ou uma ampliação no número de usuários cadastrados (melhoria da eficiência do órgão gestor). Na Figura 3.5 são apresentadas as vazões outorgadas acumuladas para os usos subterrâneos em Minas Gerais, na qual é possível perceber essa tendência de crescimento na exploração dos recursos hídricos subterrâneos.

Além do crescente uso das reservas hídricas subterrâneas, deve-se levar em conta os casos clandestinos de uso dessas águas que, devido às suas próprias características de utilização (o próprio usuário pode perfurar o poço) e à ineficiente fiscalização e controle, podem corresponder a até 70% do número de poços cadastrados (Hirata, 2006).

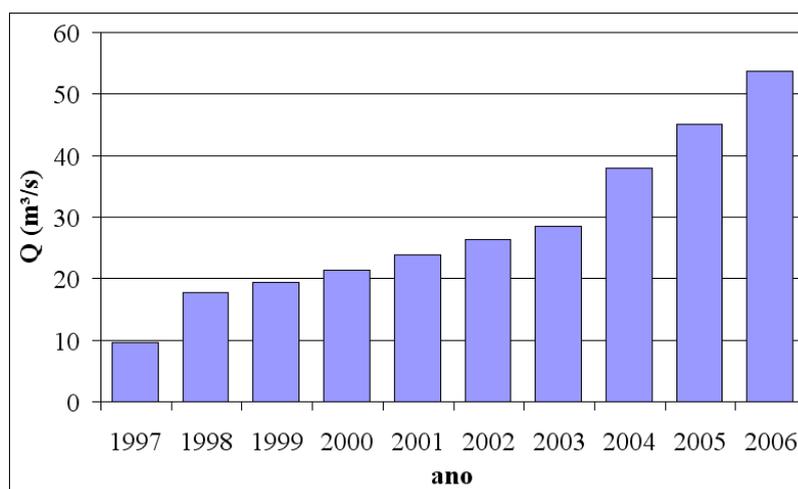


Figura 3.5: Vazões outorgadas acumuladas para uso subterrâneo das águas em Minas Gerais. (fonte: Minas Gerais, 2006).

CAPÍTULO 4: ADEQUABILIDADE DE MODELOS SIMPLIFICADOS NA REPRESENTAÇÃO DE AQUÍFEROS

Nos capítulos anteriores, foram abordados a física dos processos de interação entre as águas superficiais e subterrâneas, as escalas de análise dessas interações e os métodos usualmente empregados na gestão dos recursos hídricos no Brasil no que se refere à definição das outorgas de usos das águas. Como parte final da revisão de literatura necessária ao entendimento da metodologia proposta, nesse capítulo é apresentada uma discussão quanto à representação dos aquíferos em modelos hidrológicos, uma vez que esse tipo de modelo é a ferramenta utilizada para a definição dos critérios de outorga integrada dos recursos hídricos apresentada nesta pesquisa.

4.1 - MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento das bacias hidrográficas e prever condições diferentes das observadas, como, por exemplo, a representação dos efeitos que extrações de água teriam sobre o comportamento das vazões em rios.

Muitos tipos de modelos hidrológicos podem ser encontrados na literatura. Apesar da grande diversidade, esses modelos descrevem, no geral, a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação e evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração e a percolação, a entrada e saída de água subterrânea, e o escoamento superficial, sub-superficial e nos canais de escoamento (Tucci & Collischonn, 2003).

Usualmente, os modelos hidrológicos são classificados de acordo com os tipos de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos). Tucci (1998) e Dingman (2002) apresentam uma discussão mais ampla acerca dos diversos tipos de modelos hidrológicos, mostrando uma classificação geral mais detalhada.

As necessidades de resposta dos modelos em pontos espalhados das bacias, a heterogeneidade dos processos físicos, o aumento da capacidade de processamento dos computadores e a disponibilidade de dados sobre a superfície, especialmente a partir do uso

dos sistemas de processamento remoto, criaram condições para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos distribuídos. A vantagem desses modelos é de possibilitar a representação de parte da variabilidade espacial das variáveis (Dingman, 2002).

O uso de um modelo pressupõe a aplicação de três etapas: a calibração, na qual são ajustados os seus parâmetros, utilizando-se os dados observados; a verificação, na qual é feita uma comparação entre valores observados e calculados, a partir do uso dos parâmetros ajustados na primeira fase; e a aplicação ou prognóstico, na qual se usa o modelo para gerar saídas, a partir de dados de entrada observados.

A calibração é uma etapa fundamental na aplicação dos modelos. Em modelos chuva-vazão a calibração é realizada modificando-se os valores dos parâmetros até que o hidrograma calculado e o observado apresentem características semelhantes, isto é, boa precisão na representação dos picos, das recessões e das vazões médias, nem sempre sendo possível o ajuste atender a todas essas características simultaneamente (Tucci & Collischonn, 2003).

Os métodos de calibração podem ser divididos em manual e automático. Nos métodos de calibração manual é utilizada a técnica de tentativa e erro, na qual o usuário, aliado a sua experiência com o uso anterior do modelo, utiliza a avaliação visual dos hidrogramas, verificando se as vazões calculadas e observadas têm valores aproximados. Já os métodos de calibração automática visam determinar o conjunto ótimo dos valores dos parâmetros do modelo com a mínima intervenção do usuário, cuja experiência é substituída, em grande parte, por uma técnica iterativa e por uma, ou mais de uma, função-objetivo. As principais vantagens dos métodos de calibração automática estão no aumento da eficiência e da rapidez no ajuste dos modelos, principalmente no caso daqueles que apresentam um grande número de parâmetros, e quando a inexperiência do usuário pode tornar o processo de calibração manual lento e tedioso (Tucci, 1998).

Dentre os métodos de calibração automática, têm-se destacado as técnicas iterativas e as de busca global. Entre os métodos de otimização global, as técnicas de Computação Evolucionária têm sido de ampla aplicação (Parsopoulos & Vrahatis, 2002). Essas técnicas exploram um setor de soluções potenciais, denominado população, e detecta a solução ótima do problema através da cooperação e competição entre os indivíduos dessa população, segundo critérios que dependem do valor da função-objetivo ou das funções-objetivo consideradas, até que não haja evolução possível ou que seja atingido um critério de parada pré-definido. Neste trabalho, o modelo hidrológico empregado, o MGB-IPH, tem seus parâmetros calibrados por meio de um algoritmo de otimização global, o MOCOM-UA, explicado sucintamente na metodologia apresentada no próximo capítulo.

4.2 - REPRESENTAÇÃO DE AQUÍFEROS EM MODELOS HIDROLÓGICOS

Um modelo é uma representação simplificada de uma parte do espaço “*que é mais simples do que o sistema real, mas pode reproduzir algumas, entretanto não todas, das suas características*” (Dooge, 1986). A representação em modelos dos fenômenos do ciclo hidrológico exige a simplificação de alguns dos processos que nele atuam.

Nos modelos matemáticos de água subterrânea, os processos ligados ao fluxo subterrâneo da água são relativamente bem representados, por serem consideradas leis e uma base equacional mais ligada à física desses processos (Wang & Anderson, 1982). Nesses modelos, são incluídos os parâmetros mais relacionados às características hidrogeológicas, como a condutividade hidráulica e a capacidade específica do aquífero, mas, por outro lado, os principais processos do ciclo superficial da água (precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração) são considerados de forma simplificada (Anderson & Woessner, 1992).

Já nos modelos hidrológicos, a representação superficial do ciclo hidrológico costuma ser mais bem detalhada do que a representação da parte de fluxo subterrâneo, que é simbolizada por equações que não se relacionam diretamente com parâmetros da hidrogeologia do aquífero.

Um modelo “ideal” seria aquele que pudesse agregar na modelagem dos processos superficiais, as singularidades dos modelos hidrológicos e, na modelagem dos processos subterrâneos da água, as particularidades dos modelos de fluxo subterrâneo. Estudos em que modelos hidrológicos e de água subterrânea foram acoplados com o intuito de melhor representar fisicamente a interação entre esses mananciais são apresentados por Ramireddygari *et al.* (2000) e Sophocleous *et al.* (1999), nos quais os modelos POTYLDLDR (Zovne, 1977 *apud* Ramireddygari *et al.*, 2000) e SWAT (Arnold, 1993 *apud* Sophocleous *et al.*, 1999), respectivamente, foram acoplados ao modelo de água subterrânea MODFLOW (McDonal, 1988 *apud* Sophocleous *et al.*, 1999). Os resultados encontrados pelos autores, no entanto, apresentam limitações na representação dos processos, principalmente pela pouca quantidade de dados hidrogeológicos disponíveis para a calibração e verificação dos parâmetros dos modelos.

Uma das desvantagens em se acoplar os modelos hidrológicos e de água subterrânea está justamente na enorme quantidade de dados necessários para o ajuste dos parâmetros, muitos dos quais, na maioria das vezes, não estarão disponíveis, impossibilitando a validação do modelo. Dessa forma, em estudos em que os processos superficiais e subterrâneos do ciclo

hidrológico precisam ser considerados, a aplicação ou de modelos hidrológicos ou de modelos de água subterrânea pode ser adequada, ressalvadas suas simplificações e limitações na representação de cada um desses processos.

A grande maioria das aplicações de modelos de água subterrânea está voltada à modelagem dos fluxos de água em escala local e do transporte de contaminantes nos aquíferos. Quanto à representação da interação rio-aquífero, a maior parte dos estudos com esses modelos considera, apenas, as influências locais dos bombeamentos entre poços circunvizinhos ou entre poços e rios adjacentes, como mostrado nos trabalhos de Girrard *et al.* (2003), Bahia (2003) e Barreto *et al.* (2006).

Bahia (2003) propõe uma metodologia para determinação do limite de vazão a ser outorgada em poços pela SRH da Bahia, baseando-se, entretanto, na máxima vazão que pode ser extraída do aquífero por poço e na influência do cone de depleção gerado pelo bombeamento entre poços. Essa abordagem é certamente importante quanto às influências locais do uso das águas subterrâneas, mas não do ponto de vista do gerenciamento dos usos na bacia como um todo.

A utilização de modelos hidrológicos para representação dos processos de inter-relação entre rios e aquíferos na escala da bacia é ainda bastante escassa, sendo poucos os trabalhos encontrados na literatura que abordam esse tema, podendo-se citar os trabalhos de Moore & Bell (2002), Hughes (2004) e Corbo *et al.* (2005).

Moore & Bell (2002) incorporaram no modelo hidrológico concentrado chuva-vazão *PDM* (Probability Distributed Model) uma componente de modelagem da água subterrânea para representar a exploração de água de aquíferos e para simular níveis piezométricos em poços. A retirada de água subterrânea foi feita pela diminuição do volume armazenado no reservatório subterrâneo do modelo, o qual representa a relação entre o armazenamento e a vazão de saída do aquífero. A aplicação do modelo mostrou bons resultados no caso em estudo e forneceu uma idéia de como a representação de extrações de água subterrânea pode ser considerada em modelos hidrológicos.

Hughes (2004) adicionou componentes de recarga e descarga subterrânea a um modelo hidrológico chuva-vazão com intervalo de tempo mensal, o *Pitman*, com o objetivo de elaborar estratégias de planejamento de alocação dos recursos hídricos a partir da modelagem de usos de água superficial e subterrânea. O modelo apresentou resultados consistentes com os princípios do escoamento subterrâneo, entretanto, o autor simulou apenas a contribuição subterrânea do aquífero no rio, por não haver dados hidrogeológicos disponíveis.

Corbo *et al.* (2005) apresentaram uma análise simplificada de cenários de uso de água subterrânea e superficial na escala da bacia hidrográfica, utilizando o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH. Como estudo de caso, as simulações foram feitas na bacia do Rio Grande, afluente do Rio São Francisco na Bahia. Os resultados encontrados pelos autores mostraram que o efeito da retirada de água subterrânea foi distribuído ao longo do tempo e o da superficial concentrado no período de captação. Embora não tenham sido feitas simulações de retiradas conjuntas de água superficial e subterrânea, o emprego do modelo foi satisfatório para analisar, preliminarmente, os efeitos das explorações subterrâneas sobre a disponibilidade de água no rio.

A simplificação adotada nos modelos hidrológicos quanto à parte do escoamento subterrâneo da água é a de considerar o aquífero como um ou um conjunto de reservatórios. Usualmente, o reservatório subterrâneo é matematicamente representado por uma equação que relaciona o armazenamento no reservatório e a sua descarga de saída. A definição do tipo de relação matemática, linear ou não-linear, que melhor representa essa função armazenamento-descarga é ainda incerta. Moore (1997) e Brodie & Hostetler (2006) apresentam uma série de equações de modelos de reservatório subterrâneo comumente utilizadas para analisar as recessões em hidrogramas.

Modelos hidráulicos simples sugerem que a relação armazenamento-descarga no reservatório subterrâneo varia de uma condição linear, para aquíferos confinados, a uma condição de função não-linear de potência, para aquíferos não-confinados (Wittenberg, 1994, Tallaksen, 1995; Wittenberg, 1999). Outros autores, entretanto, consideram que em alguns casos, o reservatório linear, tanto para aquíferos confinados quanto não-confinados, é adequado para simular a resposta subterrânea (Hornberger *et al.*, 1998, Chapman, 1999, Fénicia *et al.*, 2006).

O conceito de reservatório linear foi primeiramente introduzido por Maillet em 1905 e é ainda amplamente usado em modelos conceituais (Fénicia *et al.*, 2006). O modelo de reservatório linear assume que o armazenamento subterrâneo S é linearmente proporcional à descarga de saída Q do aquífero:

$$S = k.Q, \tag{eq. 4.1}$$

onde: k é definido como o tempo de residência médio do armazenamento subterrâneo.

Hornberger *et al.* (1998) avaliaram a adequabilidade da representação linear baseando-se num modelo simplificado de reservatório subterrâneo e no princípio de conservação de

massa no aquífero. De acordo com os autores, considerando nula a entrada de água no reservatório subterrâneo durante a recessão, pode-se esperar que a saída de água desse reservatório seja função da elevação do nível subterrâneo de água $\bar{h}(L)$, como representado na Figura 4.1.

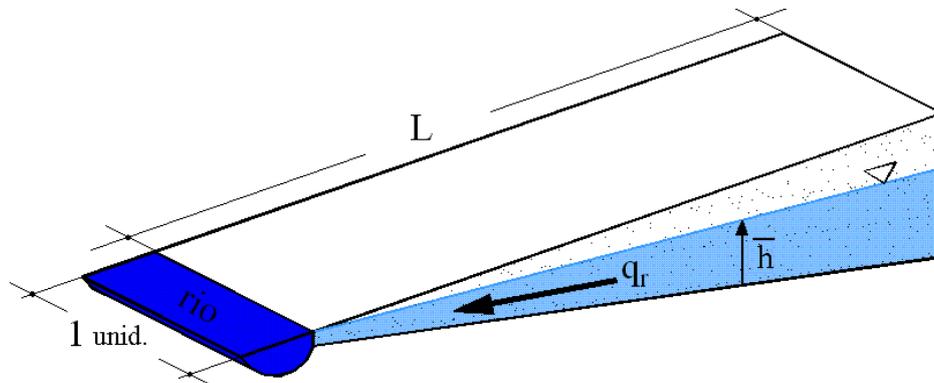


Figura 4.1: Modelo simplificado de um reservatório subterrâneo linear.
(adaptado de Hornberger *et al.*, 1998).

Pela lei de conservação de massa, a descarga (q_r) do reservatório deve ser equilibrada pela variação no armazenamento, a qual depende de $\bar{h}(L)$, da capacidade específica S' (considerando um aquífero não-confinado) e da largura L do aquífero. A partir dessas considerações, a equação de recessão pode ser expressa em função de características simplificadas do aquífero, como indicado nas Equações 4.2 e 4.3, a seguir, que são diretamente comparáveis à Equação 2.3 da recessão em um reservatório linear.

$$q_r = (c \cdot S' \cdot L \cdot \bar{h}_o) \cdot e^{-ct}, \quad (\text{eq. 4.2})$$

ou

$$q_r = q_o \cdot e^{-ct} \quad (\text{eq. 4.3})$$

Em muitos estudos teóricos do fluxo subterrâneo, a relação linear geralmente descreve bem o comportamento da água subterrânea, considerando o escoamento unidirecional em um aquífero não-confinado com espessura constante e condutividade hidráulica uniforme (Fenicia *et al.*, 2006).

Na maioria dos casos, no entanto, o modelo de reservatório linear simples para aquíferos não-confinados, não representa satisfatoriamente as curvas de recessões em diferentes períodos do hidrograma (Tallaksen, 1995). Isso seria devido à variabilidade de

fatores como a distribuição espacial da precipitação, os armazenamentos residuais em corpos superficiais conectados, as condições de umidade na bacia, a espessura da zona saturada do aquífero ou a profundidade de penetração do rio no aquífero (Brodie & Hostetler, 2006).

Dessa forma, uma melhor relação armazenamento-descarga em aquíferos não-confinados deveria ser dada por uma representação não-linear, ou por mais de um reservatório com diferentes valores da constante linear. Para esse último caso, Wittenberg (1999) afirma que a representação por mais de um reservatório não é muitas vezes apropriada, já que em muitas bacias, não é desejável que os aquíferos sejam divididos em zonas de armazenamento independentes, uma vez que eles consistem num sistema hidraulicamente conectado de poros e fissuras. O autor sugere, então, a consideração de um único reservatório não-linear da forma:

$$S = a.Q^\beta, \quad (\text{eq. 4.4})$$

em que o parâmetro β representa uma relação física da vazão de saída do reservatório (sendo igual 1 para o caso de aquíferos confinados, em que a representação linear pode ser aplicada).

Wittenberg (1999) aplicou a formulação do reservatório não-linear, como indicado na Equação 4.4, em várias bacias na Alemanha com diferentes características hidrogeológicas, chegando a valores médios do parâmetro β iguais a 0,5; que, segundo o autor, é o valor representativo desse parâmetro que mais se adequa a aquíferos não-confinados.

A Figura 4.2 mostra ajustes analíticos da recessão no período de 08 à 10/07/2003 na bacia de Arvorezinha, localizada na região centro-norte do Estado do Rio Grande do Sul e de área de 1,19 Km², pela equação do reservatório linear (Equação 4.1) e pela equação do reservatório não-linear (Equação 4.4).

Como se observa, um bom ajuste com a formulação linear para todas as partes dessa curva de recessão só é possível pelo seu seccionamento e pelo ajuste com diferentes valores da “constante” k do reservatório linear (linhas em vermelho, laranja e verde), que varia de valores menores para a parte mais vertical da curva a valores maiores para sua parte mais horizontal. Já com a formulação não-linear (linha azul), observa-se um bom ajuste para toda a curva utilizando-se um único valor para os parâmetros a e β ($a=98,5 \text{ m}^{2,4} \cdot \text{s}^{0,2}$ e $\beta=0,2$), resultados esses coerentes com os encontrados por Wittenberg (1994) para o ajuste de recessões em pequenas bacias na Alemanha e China.

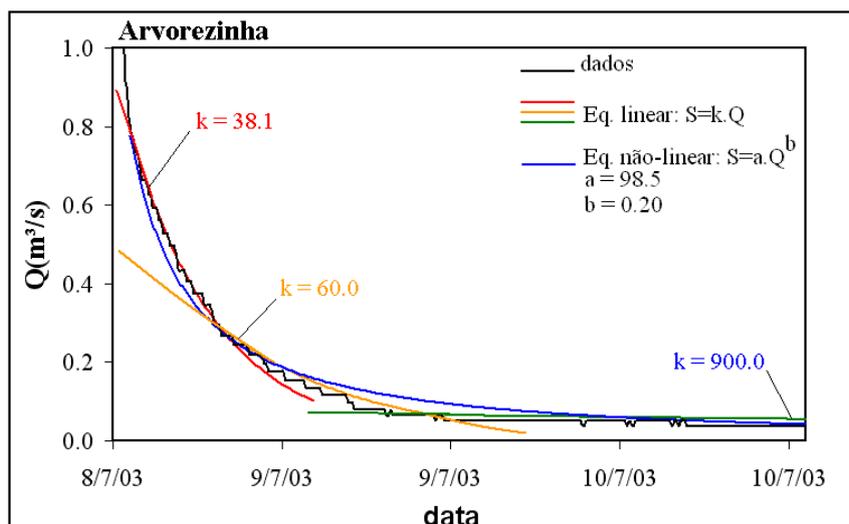


Figura 4.2: Ajuste de recessão com reservatório linear e não-linear na bacia de Arvorezinha.

Isso não significa, entretanto, que o reservatório não-linear seja categoricamente o mais adequado para representar recessões em hidrogramas. O modelo de reservatório linear pode ser aceito como uma boa aproximação em muitas situações práticas. Um desses casos seria para aquíferos não-confinados em que a camada impermeável inferior do aquífero está bem abaixo do rio, resultando em uma pequena variação espacial da profundidade do escoamento subterrâneo, sendo, assim, razoável a aproximação linear – Figura 4.3a. Para casos em que o limite impermeável inferior do aquífero for mais raso – Figura 4.3b, a variação espacial da profundidade do escoamento subterrâneo dever ser levada em consideração, sendo mais adequada a representação não-linear (Chapman, 1999).

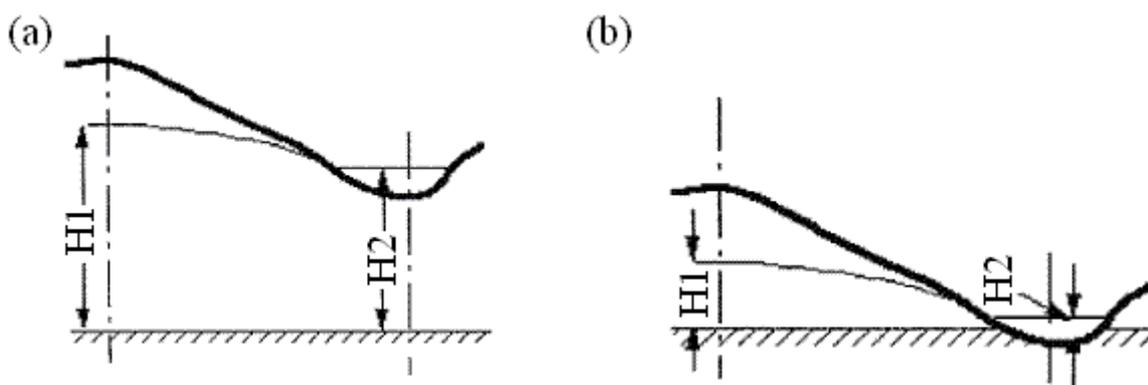


Figura 4.3: Seção esquemática do aquífero-rio: (a) pequena variação no escoamento com a profundidade H; (b) variação significativa na profundidade de escoamento. (fonte: Chapman, 1999).

Segundo Chapman (1999), o modelo linear mostra também uma boa aproximação para a ocorrência de recessões com duração superior a 10 dias. Uma verificação para esse caso é mostrada a seguir para a estação Santana dos Patos, localizada na bacia do Alto Rio Paranaíba, em Minas Gerais, na qual as recessões duram em média 150 dias (de junho a setembro). A Figura 4.4 mostra a recessão no hidrograma do ano de 1997, com ênfase no período de 10/07/97 à 10/08/97, em que se pode observar que o modelo linear e o não-linear resultaram num ajuste praticamente idênticos (linha vermelha – linear com $k=134,8$; linha verde – não-linear com $a=1455$ e $b=0,5$).

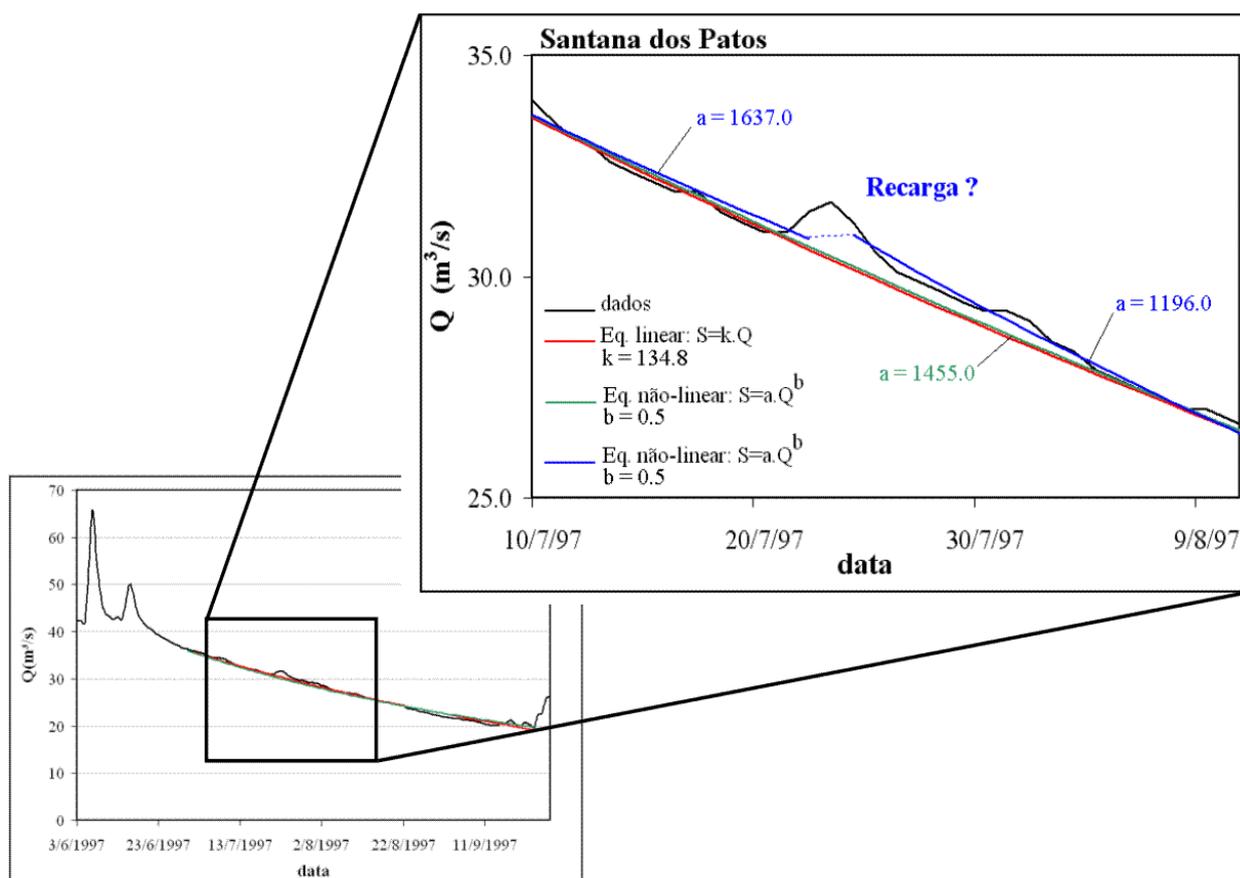


Figura 4.4: Ajuste de recessão com reservatório linear e não-linear no rio Paranaíba.

Na Figura 4.4, é possível verificar que há pequenas elevações nas vazões mesmo no período de recessão do hidrograma, no qual se supõe que há apenas descarga de saída do reservatório subterrâneo. Isso poderia ser o efeito de recargas do aquífero pela contribuição de pequenos eventos chuvosos no escoamento superficial mesmo na estiagem, fazendo com que o período de recessão seja composto por não uma, mas diferentes curvas de recessões de diferentes inclinações. Assim, seria possível variar os parâmetros do reservatório não-linear

para melhorar o ajuste (linha azul na figura) para essas inclinações. Entretanto, isso não representaria grande vantagem com relação à formulação linear, já que nesta o parâmetro k também poderia ser variado para se obter um melhor ajuste.

Wittenberg (2006) acredita que esse resultado possa ser devido a contribuições na vazão de base de descargas de um aquífero confinado, justificando o bom resultado do modelo linear, ou, de fato, devido à recarga do aquífero mesmo durante a recessão. A hipótese de que o reservatório subterrâneo continua sendo recarregado mesmo durante o período de recessão pela drenagem de zonas insaturadas do solo parece ser plausível, principalmente em regiões úmidas, que é o caso analisado (Fenicia *et al.*, 2006).

Os estudos apresentados nesse capítulo mostram que a relação armazenamento-descarga em uma bacia hidrográfica pode ser bem descrita por simples funções analíticas inseridas nos modelos hidrológicos, apesar da grande complexidade e heterogeneidade dos sistemas reais. O ajuste das recessões por essas funções parece mostrar que, para bacias de recessões rápidas, a formulação não-linear é uma melhor alternativa de ajuste do que a formulação linear. Já para as bacias com recessões de maiores durações, parece não haver diferença entre usar as funções linear ou não-linear para o reservatório subterrâneo, estando a qualidade do ajuste bastante sujeita aos valores dos parâmetros dessas formulações.

No modelo hidrológico MGB-IPH foram testadas essas duas funções, a linear e a não-linear com valor do parâmetro de potência igual a 0,5 como sugerido por Wittenberg (1999), com o objetivo de verificar quais delas melhor reproduzem as recessões na bacia do Alto Paranaíba. Essa avaliação é apresentada no Capítulo 6.

CAPÍTULO 5: METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida está dividida em duas etapas principais:

- (1) quanto ao emprego do modelo MGB-IPH;
- (2) quanto à avaliação de critérios de outorga de água superficial e subterrânea.

Essas etapas metodológicas são apresentadas no fluxograma da Figura 5.1 e explicadas nos itens que seguem.

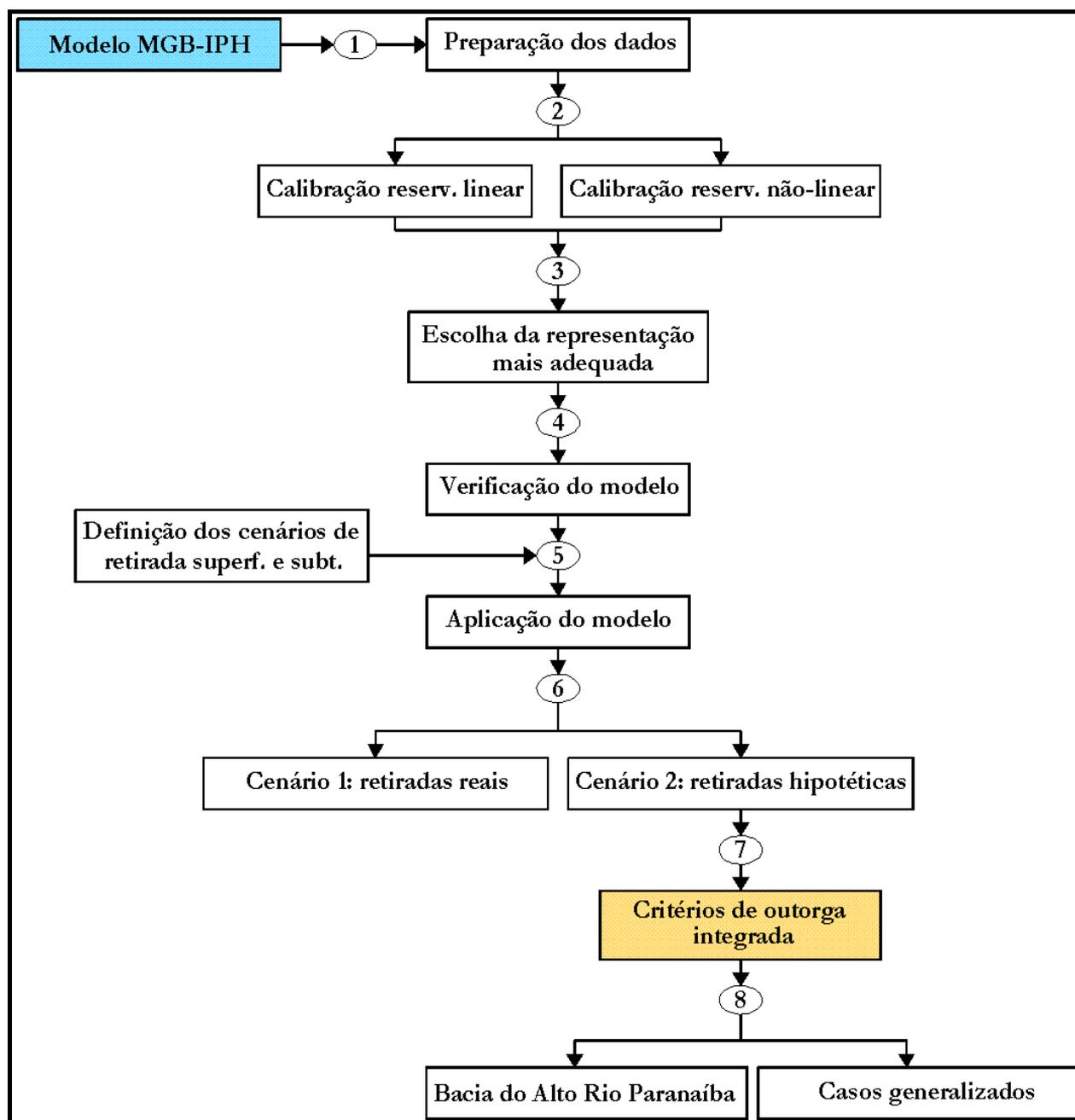


Figura 5.1: Fluxograma metodológico.

5.1 - O MODELO MGB-IPH

O modelo MGB-IPH é utilizado como ferramenta na simulação do regime hidrológico e na avaliação dos efeitos em macro-escala de diferentes percentuais de usos de água superficial e subterrânea sobre o escoamento no rio. A partir dos cenários de usos simulados no modelo, procura-se definir critérios de outorga integrada dos recursos hídricos na bacia em estudo.

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído com forte embasamento físico, desenvolvido para simulação de grandes bacias, tendo já sido utilizado com sucesso em simulações de diferentes bacias brasileiras (Collischonn, 2001; Andreolli, 2003; Larentis, 2004; Silva, 2005; Collischonn, 2006). A seguir, é feita uma descrição resumida do modelo, sendo o detalhamento de sua formulação encontrado em Collischonn (2001).

O MGB-IPH é composto dos seguintes módulos: o balanço de água no solo; a evapotranspiração; os escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e o escoamento na rede de drenagem. Como é um modelo distribuído, a bacia é subdividida em células quadradas, ligadas entre si por canais de drenagem, como esquematizado na Figura 5.2.

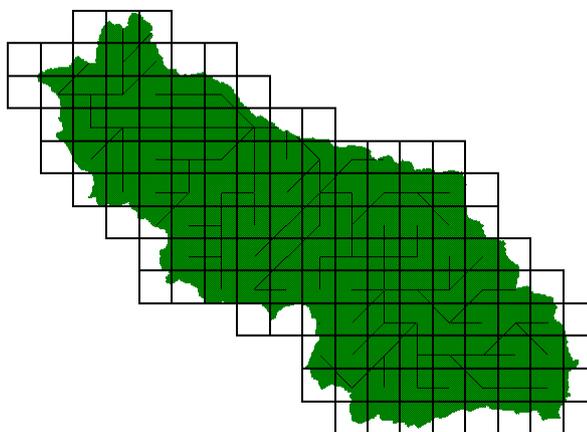


Figura 5.2: Bacia discretizada em células quadradas ligadas entre si por canais de drenagem.

Em cada uma das células, as características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo são sintetizadas em estruturas denominadas blocos (Figura 5.3). Na estrutura do modelo, o bloco é caracterizado por uma série de parâmetros, como o armazenamento máximo no solo, o índice de área foliar (IAF) da vegetação e o albedo.

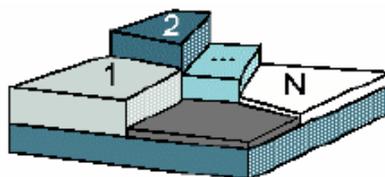


Figura 5.3: Célula do modelo dividida em blocos de uso, tipo e cobertura do solo.
(Fonte: Collischonn, 2001).

Os dois primeiros algoritmos ou módulos do modelo (balanço de água no solo e evapotranspiração) ocorrem em cada bloco de cada célula; o terceiro módulo (escoamento na célula) é o processo horizontal de fluxo no interior da célula até a rede de drenagem; e o quarto módulo é o processo horizontal de fluxo ao longo da rede de drenagem (Collischonn, 2001).

O balanço de água vertical é realizado em cada bloco de cada célula, sendo o escoamento difuso da vazão no interior das células realizado pela integração da contribuição dos blocos e da propagação da vazão resultante através de reservatórios lineares simples. Na Figura 5.4 é apresentada a estrutura de cálculo de uma célula do modelo e são indicados os locais em sua estrutura nos quais são feitas as retiradas de água superficial e subterrânea.

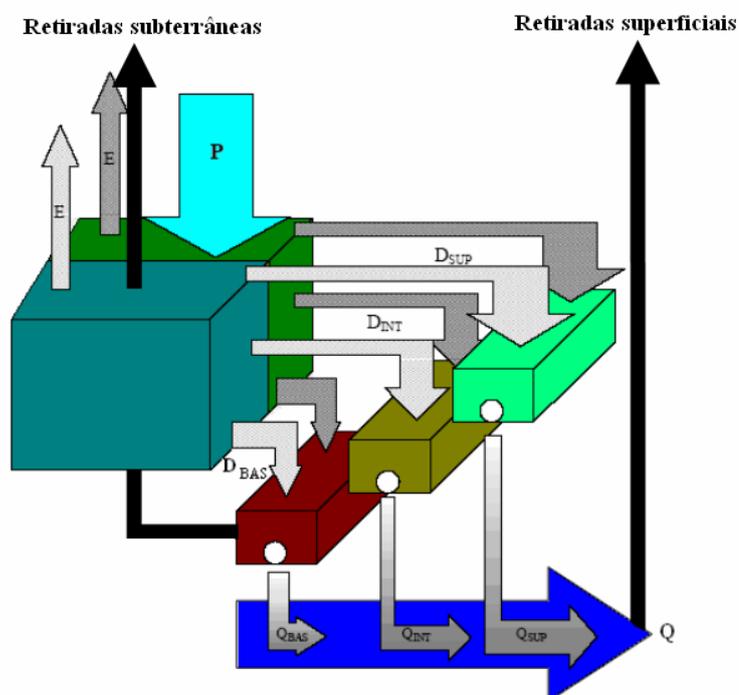


Figura 5.4: Estrutura de cálculo de uma célula com dois blocos (Fonte: Collischonn, 2001).

A precipitação e os dados climatológicos em cada célula são obtidos pela interpolação dos dados dos postos de chuva e dos postos climatológicos mais próximos, respectivamente,

sendo o balanço hídrico no solo realizado de maneira independente para cada bloco de tipo e cobertura do solo, utilizando as características e os parâmetros do bloco.

Os volumes drenados de cada bloco são somados, segundo o seu tipo –subterrâneo (D_{BAS}), sub-superficial (D_{INT}) e superficial (D_{SUP}) – em três reservatórios (Figura 5.4). Após passar por estes reservatórios, os escoamentos subterrâneo (Q_{BAS}), sub-superficial (Q_{INT}) e superficial (Q_{SUP}) são somados, resultando no escoamento gerado no interior da célula, que chega à rede de drenagem. Na rede de drenagem o escoamento é propagado e somado, conforme as características dos rios e das confluências, chegando ao exutório da bacia. Os hidrogramas de vazão podem ser avaliados no exutório, bem como em qualquer outro ponto ao longo da rede de drenagem representada.

5.1.1. - Balanço de água no solo

O balanço de água no solo é realizado independentemente para cada bloco de uso, levando em consideração as características e os parâmetros do bloco. Esse balanço é representado, para cada intervalo de tempo, pela Equação 5.1, a seguir:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - E_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}}) \cdot \Delta t, \quad (\text{eq. 5.1})$$

onde: $W_{i,j}^k$ [mm] é o armazenamento na camada de solo ao final do intervalo de tempo; $W_{i,j}^{k-1}$ [mm] é o armazenamento na camada de solo ao início do intervalo de tempo; $P_{i,j}$ [mm/dia] é a precipitação incidente (PI) subtraída a interceptação (I) no bloco j da célula i; $E_{i,j}$ [mm/dia] é a evapotranspiração da água da camada de solo no bloco j da célula i; $D_{SUP_{i,j}}$ [mm/dia], $D_{INT_{i,j}}$ [mm/dia] e $D_{BAS_{i,j}}$ [mm/dia] são, respectivamente, a drenagem superficial (drenagem rápida), a drenagem sub-superficial (drenagem lenta) e a drenagem subterrânea (drenagem muito lenta) no bloco j da célula i.

(i) Interceptação

A primeira etapa no balanço hídrico da camada superior do solo é a estimativa da retirada da lâmina d'água interceptada. No modelo, a interceptação é considerada dependente da cobertura do solo, expressa pelo índice de área foliar (IAF) da vegetação, que representa a relação entre a área das folhas de todas as plantas e da área de uma parcela de solo. Esse

índice pode ser obtido por medições, mas nesse trabalho foram utilizados valores obtidos da literatura (Collischonn, 2001). A Equação 5.2 expressa a relação utilizada no modelo entre a capacidade de interceptação e o IAF:

$$SIL_j = \alpha \cdot IAF_j, \quad (\text{eq. 5.2})$$

onde: SIL_j [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação do bloco j de qualquer célula; α [mm] é o parâmetro de lâmina de interceptação (adotada-se um valor fixo de 0,2 mm); IAF_j [-] é o índice de área foliar.

A lâmina interceptada é representada no modelo por um reservatório, cuja regra de esvaziamento e enchimento é dada pelas equações a seguir:

$$SF_{i,j}^k = SF_{i,j}^{k-1} + PC_i \quad \text{quando: } SF_{i,j}^{k-1} + PC_i \leq SIL_j, \quad (\text{eq. 5.3})$$

$$SF_{i,j}^k = SIL_j \quad \text{quando: } SF_{i,j}^{k-1} + PC_i \geq SIL_j, \quad (\text{eq. 5.4})$$

$$P_{i,j} = PC_i - (SF_{i,j}^k - SF_{i,j}^{k-1}), \quad (\text{eq. 5.5})$$

onde: $SF_{i,j}^k$ [mm] é a lâmina interceptada ao final do intervalo de tempo no bloco j da célula i; SIL_j [mm] é a capacidade do reservatório de interceptação do bloco j de qualquer célula; $SF_{i,j}^{k-1}$ [mm] é a lâmina interceptada no início do intervalo de tempo no bloco j da célula i; PC_i [mm/dia] é a precipitação sobre a cobertura vegetal em qualquer bloco da célula i; $P_{i,j}$ [mm/dia] é a precipitação sobre a camada superficial do solo no bloco j da célula i.

Caso o reservatório de interceptação esteja completamente cheio, a lâmina precipitada passa integralmente para a camada do solo; caso contrário é diminuída da lâmina disponível de interceptação. O reservatório de interceptação é esvaziado segundo a taxa de evaporação.

(ii) Evapotranspiração

A evapotranspiração é aplicada, separadamente, à lâmina d'água interceptada e à camada superficial do solo, sendo calculada segundo a equação de Penmann-Monteith (conforme Shuttleworth, 1993):

$$E = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta \cdot \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (\text{eq. 5.6})$$

onde: E [m/s] é a taxa de evaporação da água; λ [MJ/kg] é o calor latente de vaporização; Δ [kPa.°C⁻¹] é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor; R_L [MJ/m.s] é a radiação líquida na superfície; G [MJ/m.s] é o fluxo de energia para o solo; ρ_A [kg/m³] é a massa específica do ar; ρ_w [kg/m³] é a massa específica da água; c_p [MJ.kg⁻¹.°C⁻¹] é o calor específico do ar úmido ($c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ MJ.kg⁻¹.°C⁻¹); e_s [kPa] é a pressão de saturação do vapor; e_d [kPa] é a pressão do vapor; γ [kPa.°C⁻¹] é a constante psicrométrica ($\gamma = 0,66$); r_s [s/m] é a resistência superficial da vegetação; r_a [s/m] é a resistência aerodinâmica.

(iii) Escoamento superficial

O escoamento superficial (escoamento rápido, ou direto) é calculado pelo termo D_{SUP} , considerando que toda a chuva que cai sobre uma porção de solo já saturada de umidade gera escoamento superficial. O modelo considera que existe uma relação entre W , que é o estado de armazenamento atual da camada de solo, e a porcentagem de área saturada. O escoamento superficial, ou direto, é calculado por:

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) \quad \text{quando: } \delta \leq 0 \quad (\text{eq. 5.7})$$

$$D_{SUP} = P - (W_m - W) + W_m \cdot (\delta)^{b+1} \quad \text{quando: } \delta \geq 0 \quad (\text{eq. 5.8})$$

para:

$$\delta = \left[\left(1 - \frac{W}{W_m} \right)^{\frac{1}{b+1}} - \frac{P}{(b+1) \cdot W_m} \right], \quad (\text{eq. 5.9})$$

onde: W [mm] é o armazenamento na camada do solo; W_m [mm] é o armazenamento máximo na camada do solo; b [-] é um parâmetro adimensional que representa a não-uniformidade da capacidade de armazenamento do solo no bloco; P [mm] é a precipitação menos a interceptação e D_{SUP} [mm] é o escoamento superficial (drenagem rápida).

(iv) Escoamento sub-superficial

O escoamento sub-superficial é obtido por uma relação não-linear com o armazenamento na camada de solo, baseada na equação da condutividade hidráulica do solo de Brooks & Corey (Rawls *et al.*, 1993 *apud* Collischonn, 2001).

$$D_{INT} = K_{INT} \cdot \left(\frac{W - W_z}{W_m - W_z} \right)^{\left(3 + \frac{2}{XL}\right)}, \quad (\text{eq. 5.10})$$

onde: W_z [mm] é o limite de armazenamento a partir do qual passa a haver escoamento sub-superficial; K_{INT} [mm] é o parâmetro de escoamento sub-superficial; XL [-] é o índice de porosidade do solo e D_{INT} [mm] é o escoamento sub-superficial. O parâmetro K_{INT} é calibrado e o índice XL é fixado em 0,67, que é uma média para diferentes tipos de solo (Rawls *et al.*, 1993 *apud* Collischonn, 2001).

(v) Escoamento subterrâneo

O escoamento subterrâneo é calculado por uma equação simples, linear com relação ao armazenamento no solo:

$$D_{BAS} = K_{BAS} \cdot \frac{(W - W_c)}{(W_m - W_c)}, \quad (\text{eq. 5.11})$$

onde: W_c [mm] é o limite de armazenamento no solo para haver escoamento subterrâneo; K_{BAS} [mm] é o parâmetro de escoamento subterrâneo e D_{BAS} [mm] é o escoamento subterrâneo.

5.1.2. - Escoamento na célula

Os termos D_{SUP} , D_{INT} e D_{BAS} , referentes ao escoamento que deixa a camada de solo, sofrem retardo e amortecimento ainda no interior da célula. Estes efeitos são representados no modelo pela passagem do escoamento por reservatórios lineares, onde o escoamento dos diferentes blocos de uso e cobertura vegetal é integrado e somado, conforme esquema da Figura 5.4.

Cada um dos reservatórios é representado matematicamente por uma equação de reservatório linear simples, sendo a soma dos valores de Q_{SUP} , Q_{INT} e Q_{BAS} , o escoamento gerado na célula.

$$Q_{SUP} = \frac{1}{TK_S} \cdot V_{SUP}, \quad (\text{eq. 5.12})$$

$$Q_{INT} = \frac{1}{TK_I} \cdot V_{INT}, \quad (\text{eq. 5.13})$$

$$Q_{BAS} = \frac{1}{TK_B} \cdot V_{BAS}, \quad (\text{eq. 5.14})$$

onde: Q_{SUP} [m^3/s], Q_{INT} [m^3/s] e Q_{BAS} [m^3/s] são a vazão de saída, respectivamente, dos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneo; V_{SUP} [m^3], V_{INT} [m^3] e V_{BAS} [m^3] são o volume, respectivamente, nos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneo; TK_S [s], TK_I [s] e TK_B [s] são os parâmetros de retardo, respectivamente, dos reservatórios superficial, sub-superficial e subterrâneo.

Uma das propostas desse trabalho é avaliar a representação do aquífero no modelo hidrológico através de um reservatório não-linear, do modo proposto por Wittenberg (1999) e discutido no Capítulo 4. A formulação não-linear do reservatório subterrâneo é representada no modelo pela equação a seguir:

$$Q_{BAS} = \left(\frac{1}{TK_B} \cdot V_{BAS} \right)^2, \quad (\text{eq. 5.15})$$

cujos termos já foram definidos nas equações anteriores. Neste caso, o volume de armazenamento V_{BAS} varia de forma não-linear com relação à descarga de saída do reservatório Q_{BAS} , sendo o valor da potência β da formulação não-linear (Equação 4.4) considerado fixo e igual a 0,5.

O valor do tempo de retardo do reservatório subterrâneo (TK_B), tanto na formulação linear quanto não-linear, pode ser obtido pela equação a seguir:

$$TK_B = 86.400 \cdot CB \quad (\text{eq. 5.16})$$

O parâmetro CB na Equação 5.16 está diretamente relacionado à vazão de saída do reservatório subterrâneo e, portanto, às características de esvaziamento dos aquíferos. Esse parâmetro pode ser determinado pela análise dos períodos de recessão do hidrograma na bacia e pode ser calculado a partir da equação da continuidade e do reservatório subterrâneo. A dedução matemática do parâmetro CB é mostrada no Anexo A.

Para a representação do aquífero por um reservatório linear, o valor de CB é calculado por:

$$CB = -\frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_f}{Q_i}\right)}, \quad (\text{eq. 5.17})$$

neste caso, o CB é relacionado ao tempo médio de esvaziamento do armazenamento subterrâneo, tendo, portanto, unidade de tempo; ND é o número de dias entre o início e o final da recessão; Q_f e Q_i , as vazões ao final e no início da recessão.

Já para a representação não-linear, o valor de CB' é calculado por:

$$CB' = -\frac{ND \cdot (b-1)}{b \cdot (Q_f^{b-1} - Q_i^{b-1})}, \quad (\text{eq. 5.18})$$

onde: CB' tem unidade de $[L]^{3-3 \cdot b} \cdot [T]^b$; b é adimensional; tendo sido os demais termos definidos anteriormente. Para o valor do parâmetro b igual a 0,5 essa equação resulta em:

$$CB' = \frac{ND}{\sqrt{\frac{1}{Q_f}} - \sqrt{\frac{1}{Q_i}}}, \quad (\text{eq. 5.19})$$

tendo o CB' unidade de $m^{1,5} \cdot s^{0,5}$, considerando as vazões em m^3/s e o número de dias de início e fim da recessão em segundos. A dedução matemática do parâmetro CB' é mostrada no anexo A.

Os volumes armazenados nesses reservatórios (superficial, sub-superficial e subterrâneo) são atualizados pelas equações:

$$V \text{ sup}_i^k = V \text{ sup}_i^{k'} - \Delta t \cdot Q \text{ sup}_i, \quad (\text{eq. 5.20})$$

$$V \text{int}_i^k = V \text{int}_i^{k'} - \Delta t \cdot Q \text{int}_i, \quad (\text{eq. 5.21})$$

$$V \text{bas}_i^k = V \text{bas}_i^{k'} - \Delta t \cdot Q \text{bas}_i - \Delta t \cdot Q_{\text{subterrânea}}, \quad (\text{eq. 5.22})$$

onde: $V \text{sup}_i^k$ [m³], $V \text{int}_i^k$ [m³] e $V \text{bas}_i^k$ [m³] são o volume, respectivamente, no reservatório superficial, sub-superficial e subterrâneo da célula i ao final do intervalo de tempo k ; $V \text{sup}_i^{k'}$ [m³], $V \text{int}_i^{k'}$ [m³] e $V \text{bas}_i^{k'}$ [m³] são o volume, respectivamente, no reservatório superficial, sub-superficial e subterrâneo após a entrada dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula i ; Q_{SUP} [m³/s], Q_{INT} [m³/s] e Q_{BAS} [m³/s], definidos anteriormente; e $Q_{\text{subterrânea}}$ é a vazão explotada do aquífero.

A vazão de saída da célula é dada pela soma das vazões dos três reservatórios e é expressa pela equação:

$$Q \text{cel}_i = Q \text{sup}_i + Q \text{int}_i + Q \text{bas}_i, \quad (\text{eq. 5.23})$$

onde: $Q \text{cel}_i$ [m³/s] é a vazão de saída da célula e os demais termos já definidos anteriormente.

5.1.3. - Propagação na rede de drenagem

O modelo realiza a propagação nos trechos de rio utilizando o método de Muskingum-Cunge (Tucci, 2004), que relaciona a vazão de saída de um trecho de rio em um intervalo de tempo qualquer, às vazões de entrada e saída no intervalo de tempo anterior e à vazão de entrada no intervalo atual, segundo a equação:

$$QR_s^{t+1} = C_1 \cdot QR_e^t + C_2 \cdot QR_e^{t+1} + C_3 \cdot QR_s^t - Q_{\text{superficial}}, \quad (\text{eq. 5.24})$$

onde: QR_s^{t+1} [m³/s] e QR_s^t [m³/s] são, respectivamente, a vazão de saída do trecho de rio no intervalo $t+1$ e no intervalo t ; QR_e^{t+1} [m³/s] e QR_e^t [m³/s] são, respectivamente, a vazão de entrada do trecho de rio no intervalo $t+1$ e no intervalo t ; $Q_{\text{superficial}}$ é vazão retirada superficialmente; C_1 , C_2 e C_3 [-] são coeficientes adimensionais.

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 são obtidos pelas equações a seguir:

$$C_1 = \frac{2 \cdot K \cdot X + \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}, \quad (\text{eq. 5.25})$$

$$C_2 = \frac{-2 \cdot K \cdot X + \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}, \quad (\text{eq. 5.26})$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t}, \quad (\text{eq. 5.27})$$

onde: X [-] peso da integração da vazão no espaço; K [s] parâmetro de tempo; Δt [s] intervalo de tempo de cálculo.

5.1.4. - Representação das retiradas de água

A retirada superficial é simulada mediante a extração de água numa célula do modelo hidrológico no momento em que se realiza a propagação na rede de drenagem dentro da célula, representando a extração direta de água no rio. Essa retirada é expressa matematicamente pela subtração na Equação 5.24 da vazão utilizada superficialmente.

A retirada de água subterrânea é simulada mediante a extração de água do reservatório subterrâneo na célula, representando, portanto, a extração direta do aquífero. Matematicamente, essa retirada é expressa pela subtração na Equação 5.22 da vazão de uso subterrâneo.

A formulação utilizada no modelo para representar as retiradas de água na bacia, tanto superficial quanto subterrânea, permite simular os pontos de consumo de água de forma espacialmente distribuída e para diferentes magnitudes de vazão. A possibilidade de representar esquemas de locação de água, superficial e/ou subterrânea, espacialmente diferentes é particularmente importante em uma avaliação sistêmica e integrada dos usos dos recursos hídricos em macro-escala. Além disso, também é possível simular períodos de tempo específicos de retiradas de água e, dessa forma, representar diferentes configurações temporais de consumo da água: durante todo o ano ou em meses específicos.

Com a introdução do módulo de retirada de água, o modelo é capaz de avaliar os efeitos do uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas na macro-bacia e reproduzir dois dos efeitos diretos dessas retiradas: o esvaziamento do reservatório subterrâneo e a diminuição na descarga dos rios, não incluindo, entretanto, a simulação do aumento de zonas de recarga induzida.

5.2 - DADOS DE ENTRADA NO MODELO

Os dados de entrada no MGB-IPH são obtidos de fontes como imagens de satélites, mapas de tipos de solos e modelos numéricos do terreno. Além desses, são dados de entrada as séries históricas de vazões nos rios e de variáveis hidroclimáticas como a precipitação, a temperatura, a radiação solar, a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a pressão atmosférica.

As séries históricas de vazão e precipitação foram obtidas junto à rede hidrométrica da Agência Nacional de Águas (Hidroweb-ANA), disponível no endereço eletrônico: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. As séries de vazão são utilizadas para calibração e verificação do modelo, e as de precipitação como variável de entrada na modelagem do processo chuva-vazão.

As séries históricas de variáveis climáticas foram obtidas junto à plataforma de coleta de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), disponível no endereço eletrônico: <http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>. Os dados climáticos são utilizados nas equações de balanço do modelo, especialmente, no módulo de evapotranspiração (eq. 5.6).

Os mapas de solos e da geologia da bacia foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponíveis no endereço eletrônico: <http://mapas.ibge.gov.br/>. Os mapas de solos disponibilizados seguem a nomenclatura e as especificações recomendadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – SBCS da Embrapa, e foram elaborados a partir de levantamentos exploratórios produzidos pelo Projeto RadamBrasil, sendo utilizados para criação dos blocos no modelo.

Outra informação necessária para a preparação dos blocos do modelo são os usos do solo. Os usos foram definidos a partir da classificação de imagens de satélite da bacia obtidas junto ao banco de dados do Global Land Cover Facility da Universidade de Maryland, disponível no endereço eletrônico: <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>. As imagens utilizadas são de satélites Landsat com sensor TM nas bandas 3, 4 e 5 e resolução espacial de 0,001° (100 m x 100 m, aproximadamente).

As informações topográficas da bacia foram resultantes de modelo numérico do terreno (MNT) obtido a partir de altimetria via radar, realizada e disponibilizada pelo Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) por meio da missão SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) da Nasa. Os MNTs têm resolução espacial de 90 x 90 metros e estão disponíveis no endereço eletrônico: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>.

O processamento de imagens de sensoriamento remoto e de arquivos georeferenciados pode ser desenvolvido em programas comerciais de SIG. Ao longo desse trabalho, foi utilizado o programa IDRISI (Eastman, 2006) para o tratamento e classificação de imagens e para operações simples com planos de informação.

Outras etapas do pré-processamento dos dados de entrada foram executas por programas específicos desenvolvidos no IPH por Collischonn (2001), Paz *et al.* (2005) e Paz *et al.* (2007). Essas rotinas desenvolvidas foram utilizadas para:

- obter as direções de fluxo das células a partir do MNT;
- remover as depressões do MNT;
- determinar a área da bacia de drenagem;
- determinar as direções de fluxo e da rede de drenagem na bacia;
- obter os comprimentos e declividades dos trechos de rio;
- delimitar a bacia;
- ordenar hierarquicamente as células para a simulação;
- agregar informações em várias resoluções.

Grande parte dessas operações tem por objetivo gerar o arquivo de entrada principal do modelo, que é um arquivo de tipo texto que resume o conteúdo dos diversos planos de informações para cada célula. Esse arquivo contém:

- número da célula;
- coordenadas geográficas no centro da célula;
- número da bacia a qual a célula pertence;
- área da célula (quando os lados das células são definidos em coordenadas geográficas, as células têm áreas diferentes conforme a latitude em que se encontram);
- área de drenagem acumulada até a célula;
- número da célula localizada à jusante;
- cotas máximas e mínimas do MNT de alta resolução na área interna da célula;
- porcentagem da célula ocupada por cada um dos blocos;
- o comprimento e declividade do rio que passa pela célula.

Além do arquivo de entrada principal, são necessários para a execução do modelo os arquivos dos parâmetros fixos e calibráveis e o arquivo que contém os dados de precipitação interpolada.

Para o arquivo de dados de precipitação interpolada, foi utilizado o programa INTERPLU (Collischonn, 2001), que utiliza como dados de entrada as séries observadas de

precipitação, as coordenadas dos postos e o arquivo de numeração e localização das células no modelo.

Os valores iniciais dos parâmetros calibráveis, que são alterados durante o ajuste, e o arquivo de parâmetros fixos, i.e., albedo, índice de área foliar, altura da vegetação e a resistência superficial, embora possam conter dados advindos de medições em campo, nesse trabalho, estão baseados em valores característicos da literatura (Collischonn, 2001).

5.3 - CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO MODELO

Os parâmetros do modelo podem ser divididos em dois tipos: os fixos e os calibráveis. Os parâmetros fixos têm valores que podem ser medidos ou que não interferem profundamente nos resultados, e os demais, que não são fixos, podem ser calibrados por bloco e por sub-bacia.

Os parâmetros considerados fixos são: os parâmetros de armazenamento residual (W_z e W_c), o índice de área foliar (IAF), o parâmetro da lâmina de interceptação (α), o albedo, a resistência aerodinâmica (r_a) e a superficial (r_s), a vazão de referência e o coeficiente de rugosidade de Manning (η).

Os parâmetros considerados calibráveis são: a capacidade de armazenamento no solo (W_m), o parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação (b), os parâmetros de drenagem sub-superficial (K_{INT}) e subterrânea (K_{BAS}) e os parâmetros da propagação superficial (C_s) e sub-superficial (C_t) nas células.

Nesse trabalho, o MGB-IPH foi calibrado com o MOCOM-UA, um algoritmo genético de otimização multi-objetivo desenvolvido na Universidade do Arizona, descrito em Yapo *et al.* (1998), que permite considerar várias funções-objetivo sem reduzi-las a uma através de pesos. Esse algoritmo utiliza características de Estratégias de Evolução, combinando técnicas de algoritmos genéticos e de busca direta pelo método Simplex de Nelder e Mead, tendo grande aplicabilidade na otimização de parâmetros de modelos hidrológicos (Collischonn, 2001).

A fim de verificar a qualidade da calibração foram utilizadas três funções-objetivo: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2), que dá peso maior para os valores máximos; o mesmo coeficiente logaritimizado (R^2_{log}), que dá peso maior para os valores mínimos; e o erro de volume (ΔV), que determina a diferença entre os volumes calculado e observado. Essas funções, definidas pelas relações a seguir, foram escolhidas por apresentarem baixa

correlação, além de buscarem parâmetros de ajuste do hidrograma de forma mais abrangente (picos, recessões e volume).

$$R2 = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{obs}(t))^2}, \quad (\text{eq. 5.28})$$

$$R2 \log = 1 - \frac{\sum (\text{Log}Q_{obs}(t) - \text{Log}Q_{cal}(t))^2}{\sum (\text{Log}Q_{obs}(t) - \text{Log}Q_{obs}(t))^2}, \quad (\text{eq. 5.29})$$

$$\Delta V = \frac{\sum (Q_{cal}(t)) - \sum (Q_{obs}(t))}{\sum (Q_{obs}(t))}, \quad (\text{eq. 5.30})$$

onde: $Q_{obs}(t)$ é a vazão observada no intervalo de tempo t ; $Q_{cal}(t)$ é a vazão calculada no intervalo de tempo t ; e Σ indica o somatório para todos os intervalos de tempo t .

Como era de interesse avaliar a representação do aquífero por meio de um reservatório, o modelo foi calibrado duas vezes: uma com a formulação linear e outra com a formulação não-linear do reservatório subterrâneo, como discutido no item 4.2 do capítulo anterior.

No MGB-IPH com reservatório subterrâneo linear, o parâmetro CB foi calculado pela Equação 5.17. Já no modelo com reservatório subterrâneo não-linear, adotou-se o valor do parâmetro β (eq. 4.4) fixo em 0,5 conforme estimado por Wittenberg (1999) para a maioria dos casos de aquíferos não-confinados, e o parâmetro CB' foi calculado pela Equação 5.19.

Após a calibração dos parâmetros com as formulações linear e não-linear, foi escolhida para simulações das próximas etapas (verificação e aplicação), a formulação que melhor resultou na determinação do hidrograma calculado. Essa avaliação foi feita baseando-se na qualidade de ajuste gráfico do hidrograma calculado pelos dois modelos (linear e não-linear) com o hidrograma observado, e também pelos índices estatísticos relacionados à qualidade desse ajuste, determinados pelas Equações 5.28, 5.29 e 5.30.

Escolhido o modelo com a representação mais adequada do reservatório subterrâneo, a bacia foi simulada com dados de precipitação de um período diferente do utilizado na calibração - o período de verificação. Os resultados de vazão calculados foram, em seguida, comparados com o do período utilizado na verificação para averiguar se os parâmetros ajustados são representativos do processo chuva-vazão na bacia. As simulações dos cenários de retiradas de água na bacia foram feitas para este período.

5.4 - DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE RETIRADAS DE ÁGUA

As retiradas de água superficial e subterrânea foram introduzidas no modelo por meio da alteração de duas de suas rotinas, respectivamente, na rotina de propagação da vazão no rio (Equação 5.24) e na rotina de balanço de volumes do reservatório subterrâneo (Equação 5.22).

As informações quanto às retiradas são inseridas no modelo a partir da leitura de dois arquivos de texto, um referente aos usos superficiais e outro aos usos subterrâneos, ambos contendo:

- número de pontos de extração de água (captação superficial e exploração subterrânea);
- número da célula em que se localiza o ponto de extração;
- vazão retirada;
- indicação dos meses em que são feitas as retiradas.

5.4.1. - Primeiro cenário

O primeiro cenário simulado utilizou os dados atuais de usos superficiais e subterrâneos da água na bacia do Alto Rio Paranaíba. As informações referentes aos pontos de extração de água foram obtidas junto ao IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e estão disponíveis no endereço eletrônico: <http://aguas.igam.mg.gov.br/>. Os dados contêm informações quanto à localização geográfica, às vazões e ao período de tempo das retiradas, ao tipo de uso (abastecimento humano, agrícola, industrial ou uso múltiplo), ao tipo de captação (superficial ou subterrânea) e à data de publicação da concessão da outorga.

A localização dos pontos de retirada de água, tanto superficial quanto subterrânea, pode ser georeferenciada no modelo, introduzindo-se no arquivo texto criado, a célula em que se localiza o ponto de extração no caso real. Com relação aos pontos de retirada superficiais, deve-se observar que as células de localização dessas retiradas devem conter um trecho de rio, uma vez que, no modelo, a retirada superficial é feita no momento da propagação no curso fluvial.

Neste trabalho, os pontos de captação superficial foram concentrados em uma única célula à montante do exutório da bacia, já que o interesse em verificar o efeito das extrações era apenas no exutório, que é o local onde há dados de vazão observados, permitindo comparar os resultados simulados antes e após as retiradas. Com essa metodologia simplificada, entretanto, não é possível avaliar os efeitos sobre a vazão em qualquer outro

trecho do rio. No caso da exploração subterrânea, como a extração é feita diretamente do aquífero, quando da simulação do cenário atual dos usos, os pontos de localização das retiradas de água foram georeferenciados na bacia, baseando-se no banco de dados de poços existentes. Como no modelo a bacia é representada em baixa resolução, houve casos em que para uma mesma célula, ou seja, para um mesmo reservatório subterrâneo, foram retiradas vazões de mais de um poço. Na Figura 5.5, são mostradas as células no modelo em que foram feitas as retiradas de água superficial e subterrânea para os dados disponibilizados pelo IGAM em outubro de 2006.

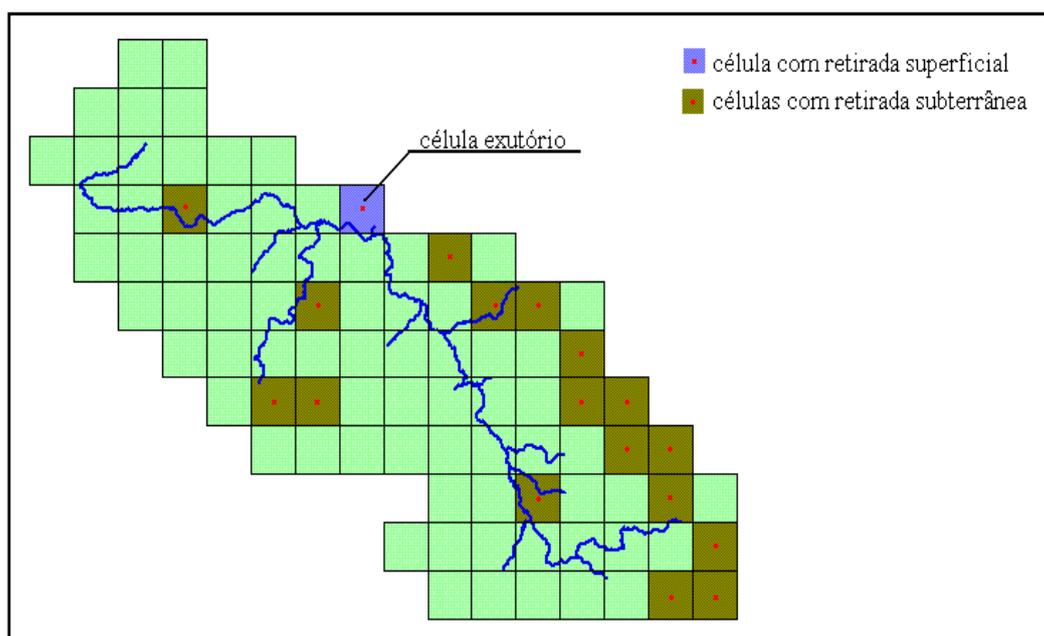


Figura 5.5: Células do modelo em que foram feitas as retiradas de água no cenário atual de usos.

5.4.2. - Segundo cenário

O segundo cenário corresponde a simulações hipotéticas de diferentes combinações percentuais de retiradas de água superficial e subterrânea na bacia. Esse cenário engloba duas etapas:

(1) *Simulações de retiradas hipotéticas na bacia do Alto Paranaíba* – com retiradas no período seco, que corresponde ao período da maioria das retiradas de água dos usos atualmente outorgados, e com retiradas durante todo o ano, representando uma situação extrema de uso dos recursos hídricos na bacia;

(2) *Simulações de retiradas hipotéticas para casos generalizados* – com retiradas apenas no período seco.

Em ambas as etapas, a definição dos valores hipotéticos de vazões retiradas superficialmente está baseada em percentuais da $Q_{7,10}$, que é a vazão de referência utilizada pelo IGAM para outorgas superficiais de água no Estado de Minas Gerais (Quadro 3.1). Os percentuais de retiradas superficiais simulados foram de 0%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100% da $Q_{7,10}$, que são equivalentes aos percentuais de vazões de referência outorgados pela maioria dos órgãos gestores de recursos hídricos no Brasil (Quadro 3.1). Essas retiradas também foram concentradas na célula exutório do modelo.

No caso das extrações subterrâneas, por não haver critérios estabelecidos na macro-escala, as retiradas hipotéticas foram baseadas em percentuais da vazão de recarga estimada do aquífero. Como uma das propostas desta pesquisa é de estabelecer critérios simplificados em que não sejam necessárias informações detalhadas dos aquíferos, a vazão de recarga é calculada considerando que a mesma se iguala à vazão de base do rio.

A proporção do escoamento do rio proveniente da descarga subterrânea pode ser determinada pelo índice Q_{90}/Q_{50} da curva de permanência (Nathan & McMahon, 1990 e Smaktin, 2001). Com esse índice, a vazão de base e, conseqüentemente, a vazão de recarga do aquífero, podem ser estimadas a partir da vazão média de longo período observada no rio, como indicado na Equação 5.31:

$$Q_{recarga} = \left(\frac{Q_{90}}{Q_{50}} \right) \cdot Q_{média} \quad (\text{eq. 5.31})$$

onde: $Q_{recarga}$ é a vazão de recarga estimada em longo período; Q_{90} e Q_{50} são, respectivamente, as vazões com 90% e 50% de permanência, determinadas pela curva de permanência; e, $Q_{média}$ é a vazão média em longo período no rio.

O parâmetro CB do modelo hidrológico tem grande influência nos cenários hipotéticos simulados por estar relacionado às características de esvaziamento do reservatório subterrâneo no MGB e, conseqüentemente, à influência das retiradas de água subterrânea sobre o escoamento no rio. Na Figura 5.6 são mostradas vazões adimensionalizadas de recessões de diferentes rios brasileiros e os valores do parâmetro CB calculados para cada um desses rios pela Equação 5.17, no caso da representação do aquífero por um reservatório linear. Na Tabela 5.1 são mostradas algumas informações dos postos fluviométricos utilizados para o cálculo do CB apresentados nessa figura.

Como se observa na Figura 5.6, o valor do parâmetro CB varia inversamente com a diferença entre as vazões no início da recessão e ao seu final, ou seja, nos rios em que essa variação é maior, o valor do parâmetro CB é menor. Isso mostra que esse parâmetro está fisicamente relacionado à influência da regularização subterrânea no escoamento de base dos rios: naqueles em que essa influência é maior, o parâmetro tem maior valor, já que a variação entre as vazões ao final e ao início da recessão é pequena.

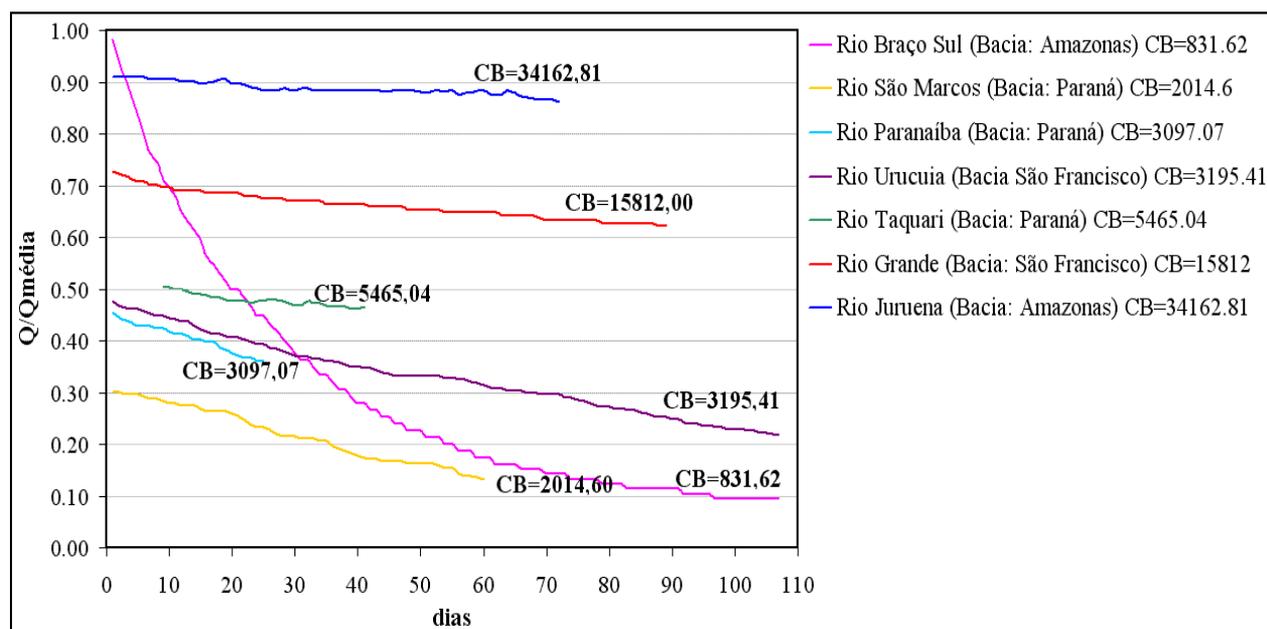


Figura 5.6: Valores do parâmetro CB (em horas) para recessões de diferentes rios brasileiros.

Tabela 5.1: Postos avaliados no cálculo do CB e valores de CB obtidos.

Código	Posto	Rio	Período de recessão	CB (horas)
17350000	Cachimbo	Braço Sul	20/05/95 à 16/08/95	831,62
60020000	Ponte São Marcos	São Marcos	06/06/87 à 25/08/87	2014,60
60010000	Santana dos Patos	Paranaíba	25/04/91 à 13/09/91	3097,07
01645002	Santo Inácio	Urucuia	31/07/88 à 21/09/88	3195,41
66840000	Perto de Pedro Gomes	Taquari	21/07/70 à 20/08/70	5465,04
46675000	Fazenda Macambira	Grande	07/06/98 à 04/10/98	15.812,00
17091000	Fazenda Tucunaré	Juruena	06/06/02 à 08/08/02	34.162,81

Fonte: Hidroweb-ANA.

Dois casos podem ser destacados na Figura 5.6: o da bacia do Rio Braço Sul e do Rio Juruena. A bacia do Rio Braço Sul (estação do Cachimbo) está localizada numa região de substrato rochoso, tendo, por isso, baixa regularização pelo aquífero, o que acarreta uma depleção rápida com alta razão entre a vazão de pico e de base e um baixo valor do parâmetro

CB , aproximadamente de 800 horas. Já a bacia do Rio Juruena (estação Fazenda Tucunaré), possui uma matriz geológica composta, basicamente, de rochas sedimentares, dando origem a um solo muito mais arenoso e permeável, decorrendo numa alta capacidade de regularização, depleção muito lenta e uma baixa razão entre vazão de pico e de base, resultando num alto valor do parâmetro CB , aproximadamente de 34.000 horas (Collischonn, 2006).

Na tentativa de representar os casos de bacias com alta e baixa regularização pelo reservatório subterrâneo, foram selecionados três cenários (sendo o primeiro e o último relacionados à segunda etapa referida no início desse tópico, i.e., casos de generalização):

- (1) com $CB = 15.000$ horas, equivalente ao de bacias de alta regularização subterrânea, caso do Rio Grande, afluente do São Francisco na Bahia (Schuster, 2002);
- (2) com um $CB = 3000$ horas, equivalente ao de bacias com média regularização subterrânea, caso do Rio Paranaíba;
- (3) com um $CB = 800$ horas, equivalente ao de bacias com baixa regularização, caso do Rio Braço Sul e de rios na região Sul do Brasil, em geral.

A Figura 5.7, a seguir, apresenta parte do hidrograma dos rios Grande, Paranaíba e Braço Sul, nos quais os valores do parâmetro CB são representativos dos três cenários de simulação adotados. Na referida figura é possível verificar a variação na vazão entre os picos e as recessões e também a forma do hidrograma, os quais se relacionam com a regularização subterrânea de seus escoamentos e, conseqüentemente, com o valor do CB .

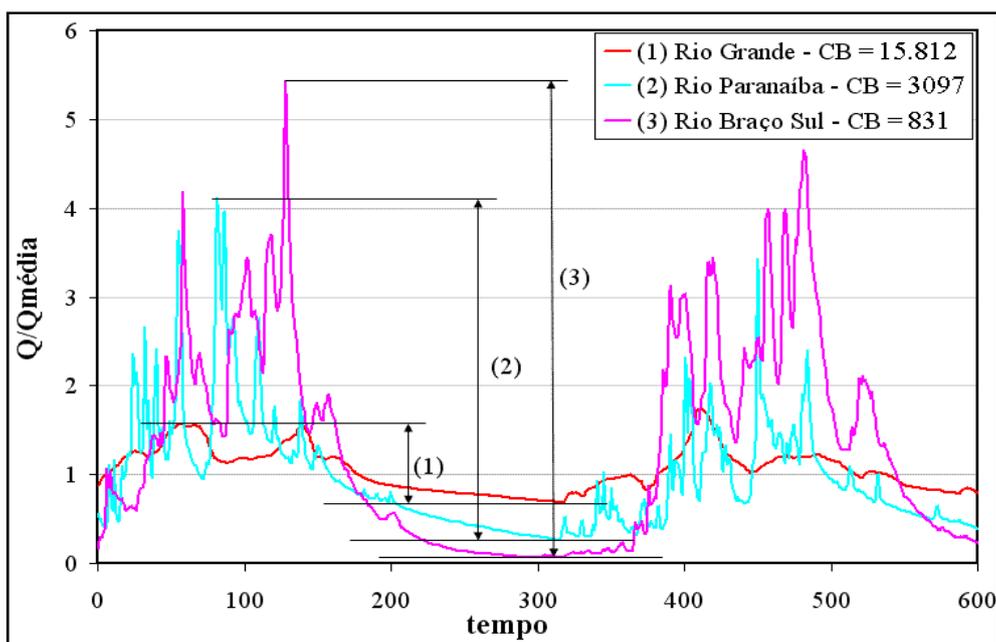


Figura 5.7: Hidrogramas dos rios Grande, Paranaíba e Braço Sul.

Nesse cenário de retiradas hipotéticas, os pontos de exploração subterrânea foram distribuídos uniformemente pelas células do modelo, sendo, portanto, um ponto de extração em cada reservatório subterrâneo. Para cada um dos três valores do parâmetro CB foram simulados cenários combinando os percentuais de retiradas superficiais (0%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100%) e percentuais de retiradas subterrâneas. Na Figura 5.8, são mostradas as células no modelo em que foram feitas as retiradas de água superficial e subterrânea nas simulações.

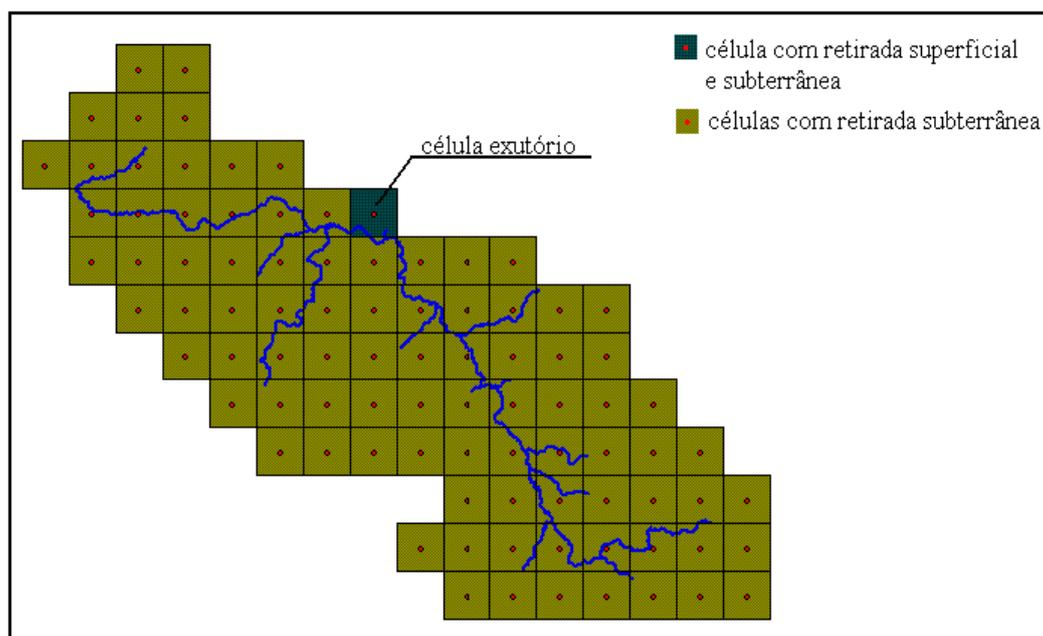


Figura 5.8: Células do modelo em que foram feitas as retiradas de água nos cenários hipotéticos.

As retiradas de água subterrânea nas células podem provocar o esvaziamento do reservatório subterrâneo nas mesmas, já que a capacidade do reservatório é limitada e controlada pelo balanço de entradas e saída de água na célula. O procedimento adotado para o caso em que ocorre esse esvaziamento, foi o de fixar na célula a sua capacidade máxima de exploração e ir aumentando o percentual de retirada nas que não esvaziaram, até que o limite máximo da recarga extraída fosse atingido para todos os reservatórios no modelo.

Os cenários hipotéticos foram simulados no modelo no período de verificação, considerado como marco zero da disponibilidade hídrica, o qual representa a disponibilidade remanescente que traz embutida os usos já exercidos (Silveira *et al.*, 1998). Assim, nessas simulações, são verificados os efeitos que os cenários hipotéticos têm sobre a série de vazões atuais no rio. Todas as simulações de retiradas de água na bacia foram feitas considerando que os usos são sempre consuntivos, ou seja, que não há retorno de água ao rio ou aquífero.

5.5 - CURVAS DE OUTORGA DE USO INTEGRADO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Os efeitos dos diferentes cenários de retiradas hipotéticas foram avaliados por comparação dos hidrogramas, das curvas de permanência e das curvas de frequência de vazões mínimas calculadas com e sem as retiradas, sendo verificados os efeitos das retiradas sobre a redução na vazão de referência $Q_{7,10}$. De maneira análoga, poderiam ser avaliados os efeitos sobre a Q_{90} e a Q_{95} . Em ambos os casos, as simulações representam os efeitos sobre condições de escoamento mínimo crítico no rio.

Com os resultados das simulações foram criadas as curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos, que são curvas que relacionam percentuais para outorga superficial (neste caso, a partir da vazão de referência $Q_{7,10}$) e percentuais para outorga subterrânea (calculadas por percentuais da vazão de recarga) com os efeitos sobre a vazão mínima de referência no rio (neste caso, os efeitos na redução da própria $Q_{7,10}$ original). A Figura 5.9 sintetiza as informações utilizadas para elaboração dessas curvas.

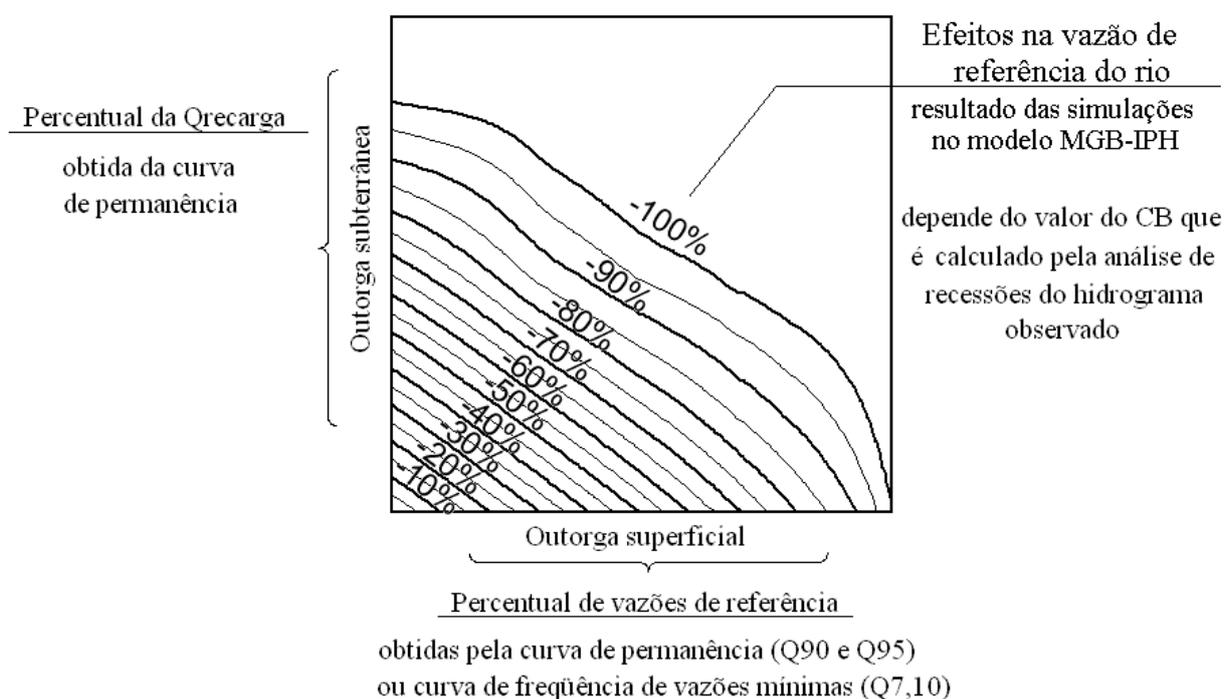


Figura 5.9: Curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos.

As curvas para a bacia do Alto Rio Paranaíba, tanto para as retiradas de água durante o período seco quanto durante todo o ano, foram elaboradas a partir de simulações no modelo com o valor do parâmetro CB igual a 3.000 horas, obtido de recessões do hidrograma nessa bacia. O critério de aceitabilidade adotado para as retiradas conjuntas de água foi o de

considerar como percentual máximo permitido de redução na vazão mínima de referência ($Q_{7,10}$), o impacto nessa vazão que é aceito atualmente, considerando apenas a extração de água superficial. Ou seja, nessa região, em que o percentual máximo de retirada superficial é de até 30% da $Q_{7,10}$, uma combinação de retirada de água superficial e subterrânea aceitável seria aquela que continuasse a gerar o mesmo impacto que apenas a retirada superficial máxima, atualmente aceita, provoca nas vazões do rio.

Para o cenário de generalização das curvas de outorga, percentuais conjuntos de retiradas de água superficial e subterrânea foram simulados, adotando valores diferentes do parâmetro CB : igual a 800 horas na representação de bacias com baixa regularização subterrânea, e igual a 15.000 horas na representação daquelas com alta regularização subterrânea.

Para aplicação das curvas de outorga de uso integrado generalizadas para outras bacias, a metodologia consiste em:

- 1° a partir da série de vazões observadas na bacia de interesse, calcular o valor do CB característico dessa bacia;
- 2° escolher quais das curvas de outorga de uso integrado simuladas, melhor se ajusta ao CB calculado para a bacia de interesse: curvas de $CB = 800$ horas, $CB = 3.000$ horas ou $CB = 15.000$ horas;
- 3° calcular as curvas de permanência e de freqüências de vazões mínimas, e determinar as vazões de referência a serem utilizadas na bacia;
- 4° estimar a vazão de recarga do aquífero pelo índice Q_{90}/Q_{50} multiplicado pela vazão média de longo período no rio – Equação 5.31;
- 5° utilizar a curva de outorga de uso integrado escolhida para avaliar quais os percentuais de usos combinados de água superficial e subterrânea são aceitáveis do ponto de vista dos efeitos de redução na vazão mínima de referência no rio.

Deve-se salientar que mesmo para bacias com valores do parâmetro CB semelhantes, os impactos gerados pelas retiradas conjuntas de água superficial e subterrânea não necessariamente têm que ser idênticos aos demonstrados nas curvas de outorga de uso integrado de água. Entretanto, essa abordagem pode representar uma boa aproximação para estimativa dos efeitos dos usos integrados dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos em diferentes bacias.

CAPÍTULO 6: APLICAÇÃO NA BACIA DO ALTO RIO PARANAÍBA

6.1 - CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA E HIDROLÓGICA DA BACIA

A parte simulada da bacia do Alto Rio Paranaíba está localizada no Estado de Minas Gerais, na meso região do Triângulo Mineiro, uma das mais desenvolvidas do Estado. As atividades econômicas que se destacam nessa região são aquelas ligadas à indústria e ao agronegócio, principalmente da carne, café, milho, soja e cana-de-açúcar. A bacia está situada nas microrregiões de Patos de Minas e de Patrocínio, cujas cidades integrantes estão indicadas na Figura 6.1, que também apresenta a localização da bacia em Minas Gerais.

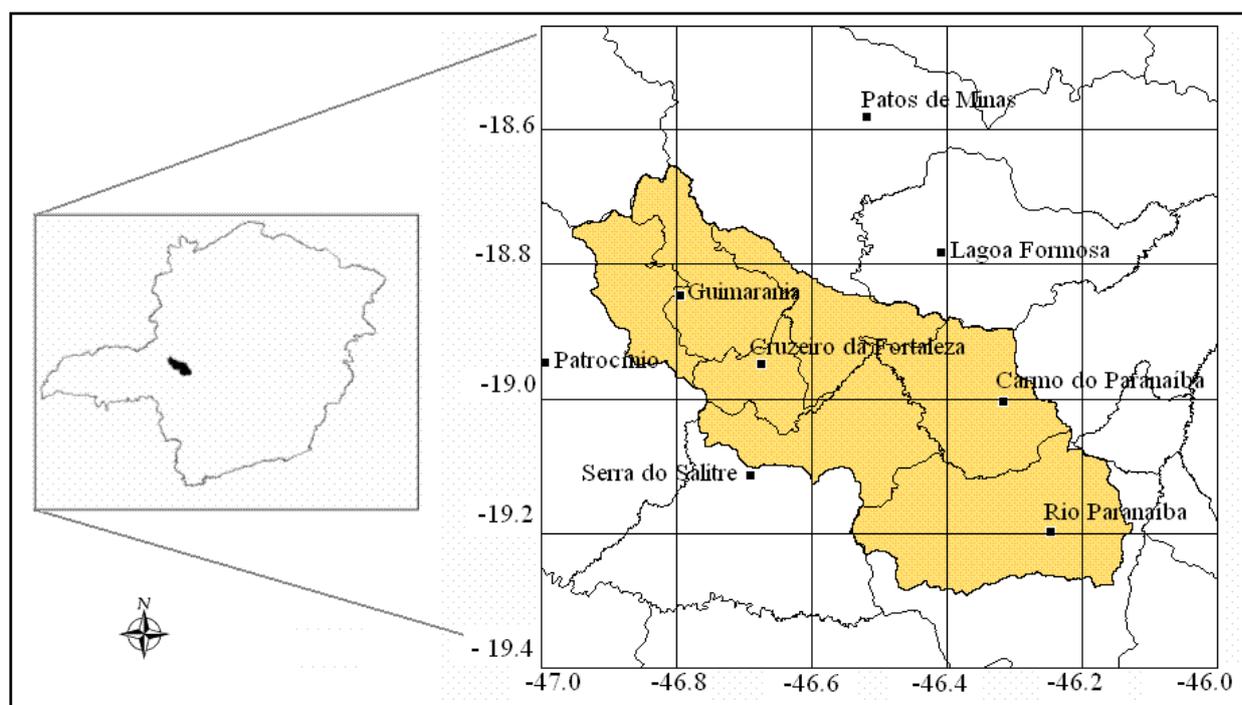


Figura 6.1: Localização da bacia em estudo.

De acordo com estudo da ANA sobre a disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil (Brasil, 2005b), o Alto Rio Paranaíba, no trecho em estudo nesta pesquisa, apresenta um *índice de retirada de água* (índice que representa a razão entre a vazão retirada para usos consuntivos e a vazão média no rio) de 10% a 20%, o que caracteriza uma situação preocupante entre a demanda e a disponibilidade de água, de acordo com a escala estabelecida por esse índice. Por esse motivo, essa bacia foi escolhida para simulação.

A bacia drena uma área de 2.700 Km², localizando-se, aproximadamente, entre os paralelos 18°39'03'' e 19°11'07'' sul e entre os meridianos 46°07'37'' e 46°57'14'' oeste. O rio Paranaíba, nessa parte da bacia, nasce na porção sudeste, na cidade de Rio Paranaíba a uma altitude de cerca de 1000 metros, e corre no sentido norte-noroeste. Em seguida, passa a correr no sentido norte-sul por cerca de 1.170 km até a confluência com o Rio Grande, na divisa entre Minas Gerais e São Paulo, formando o Rio Paraná. A Figura 6.2 apresenta o relevo da região, baseado no modelo numérico do terreno obtido do CGIAR-CSI.

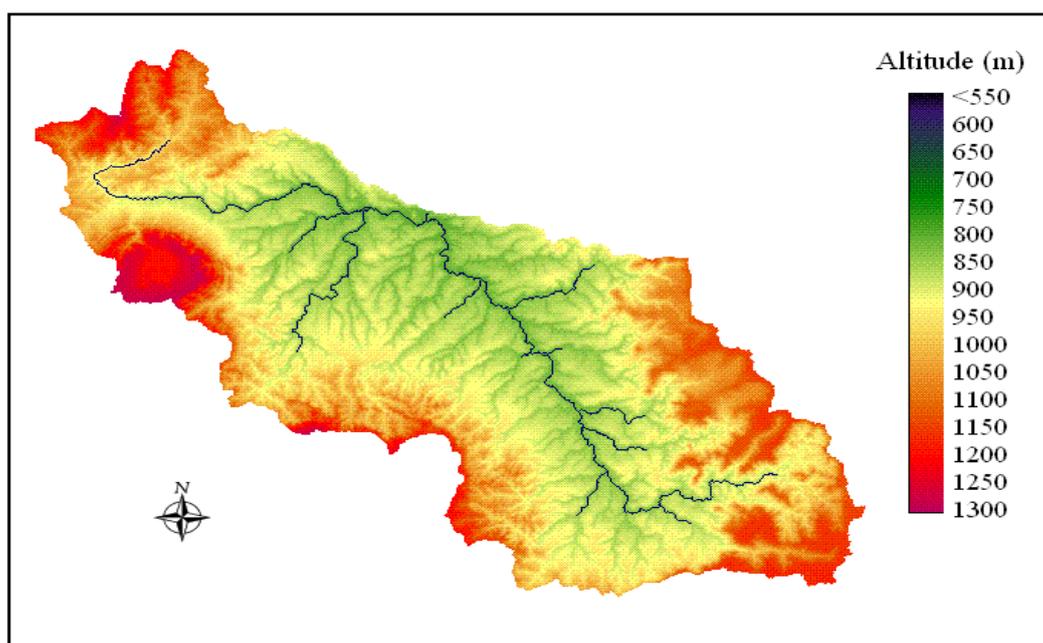


Figura 6.2: Relevo da bacia do Alto Rio Paranaíba.

O clima da região é o tropical de altitude com temperaturas médias entre 15°C e 22°C e amplitude térmica anual entre 7° C e 9° C. O comportamento pluviométrico é caracterizado por intensas chuvas de verão, devido à ação da massa tropical atlântica, com a precipitação anual média variando, aproximadamente, entre 1.300 mm a 1.600 mm. No período de inverno, as frentes frias originárias da massa polar atlântica podem provocar geadas.

Na bacia foram definidas três classes de uso do solo, apresentadas na Tabela 6.1 com sua frequência relativa. A cobertura original do solo era de florestas e cerrado, sendo hoje a sua maior parte ocupada por atividades agrícolas. Em função dos objetivos da aplicação do modelo, os diversos tipos de cerrados e de culturas agrícolas não foram diferenciados.

A Figura 6.3 apresenta a distribuição espacial dos usos do solo na bacia. Como se observa, as matas são mais comuns nas margens dos rios e, como os cerrados, nas partes mais elevadas do terreno, embora esses se encontrem relativamente bem distribuídos pela bacia. Já

o uso agrícola, que ocupa maior parte da bacia, é mais freqüente no fundo dos vales, sendo possível ainda observar perímetros irrigados em áreas específicas isoladas, como no extremo nordeste da bacia.

Tabela 6.1: Freqüência de classe de uso do solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Classe	Freqüência (%)
mata	20,33
agricultura	39,05
cerrado	38,80
água	1,82

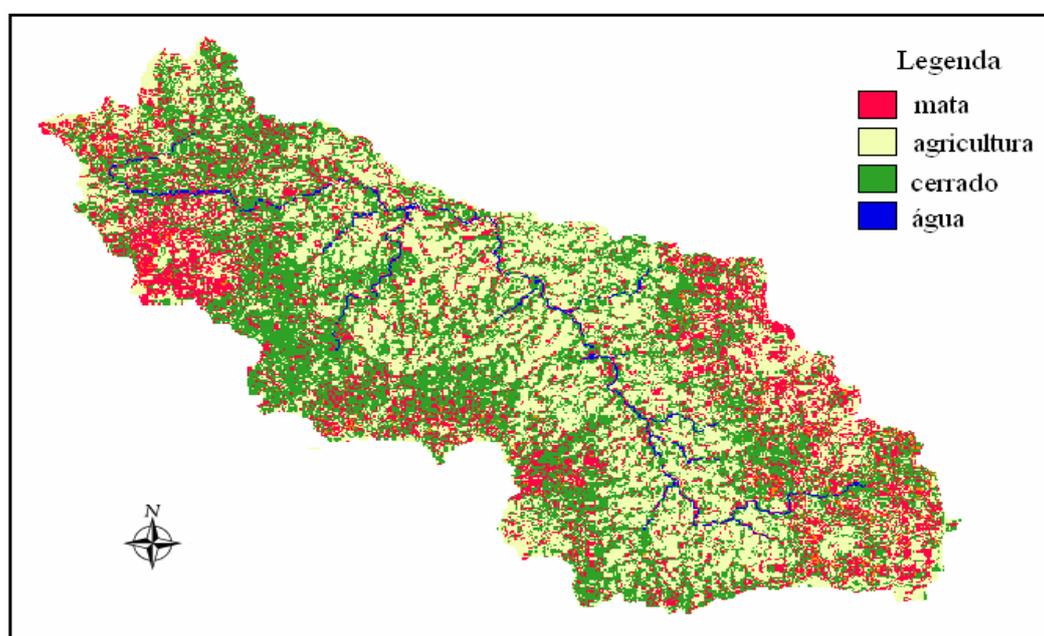


Figura 6.3: Uso do solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Os tipos de solos são apresentados na Tabela 6.2 a seguir, e sua distribuição espacial na bacia é mostrada na Figura 6.4. Os três tipos de solos presentes na bacia são o cambissolo háplico e os latossolos vermelho e vermelho-amarelo.

Tabela 6.2: Freqüência de tipos de solo na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Tipo de solo	Freqüência (%)
cambissolo háplico	22,34
latossolo vermelho	68,34
latossolo vermelho-amarelo	9,33

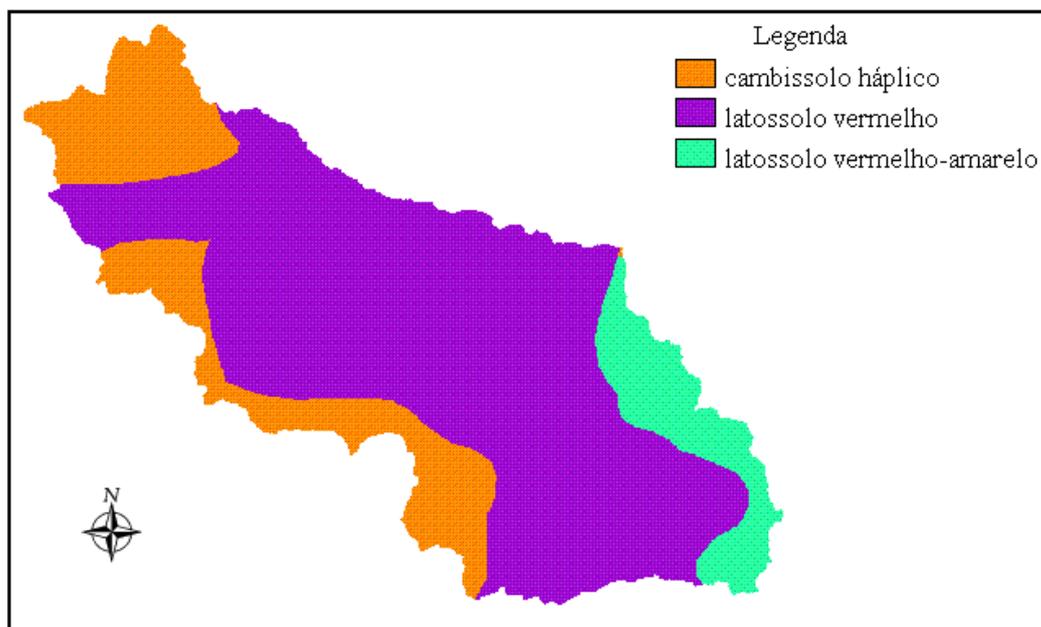


Figura 6.4: Distribuição dos tipos de solos na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Os latossolos vermelhos e vermelho-amarelos ocupam a maior parte da bacia em mais de 77% de sua área. Os latossolos são solos com excepcional porosidade total, sendo comuns valores de 50% a 60%, o que lhes garantem uma boa drenagem interna. No conjunto, esses solos apresentam baixa erodibilidade, associada a baixo potencial de escoamento superficial, possuindo, portanto, alta capacidade de armazenamento, o que constitui um atrativo para o desenvolvimento de atividades agrícolas nesses solos.

Os cambissolos háplicos, por outro lado, são solos geralmente pouco profundos, o que faz com que tenham permeabilidade muito baixa, apresentando alta erodibilidade associada ao grande potencial de escoamento superficial. Embora possam existir porções muito férteis desses solos, a sua maioria são distróficos (fertilidade média ou baixa) e, devido à sua pequena profundidade, à grande quantidade de cascalhos e à sua ocorrência freqüente em relevos inclinados, oferecem impedimento significativo à mecanização agrícola.

A estrutura geológica na bacia é caracterizada pela predominância de rochas sedimentares, o que explica a presença mais freqüente de solos profundos na mesma. As principais formações geológicas presentes na bacia do Alto Rio Paranaíba são apresentadas na Tabela 6.3 e sua distribuição espacial mostrada na Figura 6.5.

As formações geológicas do tipo PM4 são caracterizadas por seqüências sedimentares, principalmente psamíticas¹, podendo incluir piroclásticas², formadas na era Mesoproterozóica (1.600 a 1.000 milhões de anos). Já o tipo PN2 apresenta sedimentos arenosos argilo-carbonáticos desde muito pouco até fraco grau metafórmico, tendo sido formados na era Neoproterozóica (1.000 a 540 milhões de anos). Por fim, as formações do tipo M1 são caracterizadas por sedimentos argilosos, arenosos e cascalhos, com origem na era Mesozóica (245 a 65 milhões de anos).

Tabela 6.3: Freqüência de estruturas geológicas na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Estrutura geológica	Freqüência (%)
PM4	18,63
PN2	45,52
M1	32,85

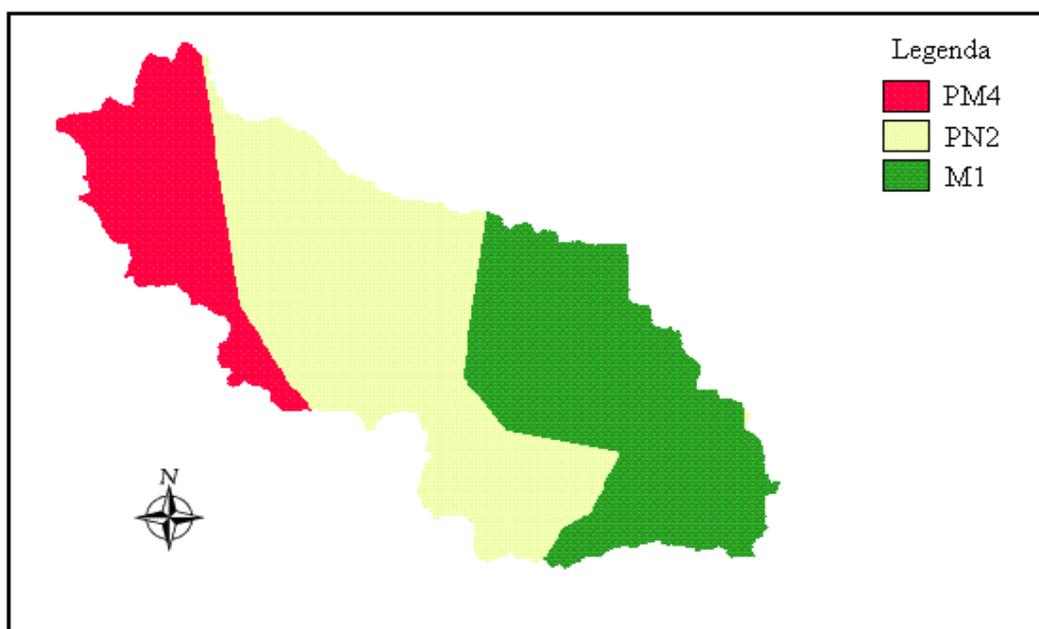


Figura 6.5: Distribuição das estruturas geológicas na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Quanto às características hidrogeológicas, de modo geral, as informações disponíveis encontram-se dispersas por vários órgãos federais, estaduais e municipais, o que dificulta a elaboração de estudos em nível regional. Além disso, os bancos de dados de poços de monitoramento existentes são, em sua maioria, incompletos, desatualizados e geralmente de

¹ [do grego: *psamos*=areia e *ito*=rocha] rocha sedimentar clástica (fragmentada) cujas partículas são predominantemente do tamanho de areia (0,62 a 2,00 mm de diâmetro) (Winge *et al*, 2001).

² [do grego: *piro*=fogo e *klasis*=quebrado] fragmento de origem vulcânica ejetado por explosão vulcânica. (Winge *et al*, 2001).

uso exclusivamente privados (Brasil, 2005b). A descrição feita a seguir detalha meramente o comportamento hidrogeológico geral observado na região.

A bacia do Alto Rio Paranaíba está localizada na província hidrogeológica do Paraná, cujos principais sistemas aquíferos são o Bauru-Caiuá, o Serra Geral e o Guarani. As principais características desses aquíferos são apresentadas na Tabela 6.4, e na Figura 6.6 é mostrado o perfil esquemático da ocorrência desses sistemas na bacia do Paraná.

Tabela 6.4: Características hidrogeológicas dos sistemas aquíferos presentes na bacia do Alto Rio Paranaíba.

Sistema aquífero	Tipo ¹	Região hidrográfica dominante	Área de recarga (Km ²)	Espessura média (m)
Bauru-Caiuá	P, L	Paraná	353.420	200
Serra Geral	F	Paraná, Atlântico Sul, Uruguai e Paraguai	411.855	150
Guarani	P, L, C		89.936	250

¹: P: poroso; F: fraturado; L: livre; C: confinado.

Fonte: Brasil, 2005b.

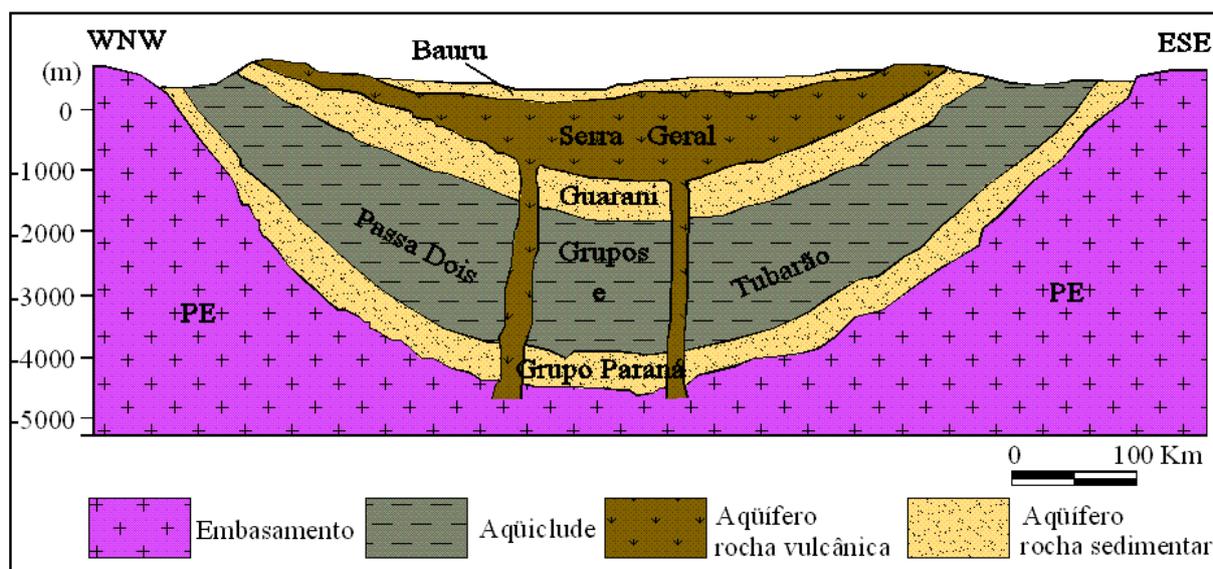


Figura 6.6: Perfil hidrogeológico esquemático na bacia do Paraná (fonte: adaptado de Rebouças, 1988 *apud* Brasil, 2005b).

O sistema aquífero Bauru-Caiuá é poroso e livre a semi-confinado, sobreposto às intrusivas do sistema aquífero Serra Geral. Esse sistema é constituído por arenitos finos a médios, com intercalações de argilitos e siltitos de origem predominantemente fluvial das diversas formações componentes do Grupo Bauru e do Grupo Caiuá. Sua potencialidade hidrogeológica está relacionada à variação da composição litológica que distinguem as unidades geológicas, associadas ao controle topográfico e estrutural do substrato basáltico,

comportando-se, no geral, como um sistema aquífero livre de grande área de afloramento, condições essas que facilitam sua exploração e que lhe confere uma maior vulnerabilidade devida, principalmente, ao desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais (Brasil, 2005b).

O sistema aquífero Serra Geral é do tipo fraturado e corresponde à formação homônima, sendo constituído por rochas que compõem uma seqüência de derrames de lavas basálticas e ácidas, com intercalações de camadas arenosas.

O sistema aquífero Guarani constitui o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo, estendendo-se pelo Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Esse aquífero é constituído pelos sedimentos arenosos da formação Pirambóia na base e arenitos Botucatu no topo, os quais foram depositados por processos fluviais e eólicos entre 200 e 130 milhões de anos atrás, compondo espessuras que variam entre 200 e 800 m. O aquífero Guarani é explorado sob condições confinadas e livres, sendo seu confinamento dado pelas rochas da formação Serra Geral, que recobrem mais de 90% de sua área (Borghetti *et al.*, 2006).

Esses diferentes sistemas aquíferos fornecem uma idéia da complexidade existente no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e ainda mais quando se considera sua inter-relação com os corpos superficiais, em meio a tantas incertezas e escassez de informações. A proposta de outorga integrada nessa pesquisa é para a escala da bacia, mas se deve ter em mente que é necessário avaliar para cada caso de uso, as características e os efeitos locais das explorações de água subterrânea. Assim, por exemplo, a forma de gerenciar poços que retiram água do sistema aquífero Bauru-Caiuá, de características livres, deve ser diferenciada daqueles que retiram água do sistema aquífero Guarani, de características confinadas, e cuja extensão vai além dos limites da bacia.

6.2 - USOS DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA

Os principais usos dos recursos hídricos na bacia do Alto Rio Paranaíba estão ligados ao agro-negócio, sendo as retiradas de água destinadas principalmente à irrigação de culturas agrícolas. A Figura 6.7 mostra a localização espacial dos pontos de usos superficiais e subterrâneos outorgados na bacia até novembro de 2006, segundo o banco de dados do IGAM (Minas Gerais, 2006). No Anexo B, são apresentadas as principais características desses usos, como: localização geográfica, vazão outorgada, data de publicação da outorga, município onde se localiza o ponto de retirada e o regime e tipo de uso do recurso hídrico.

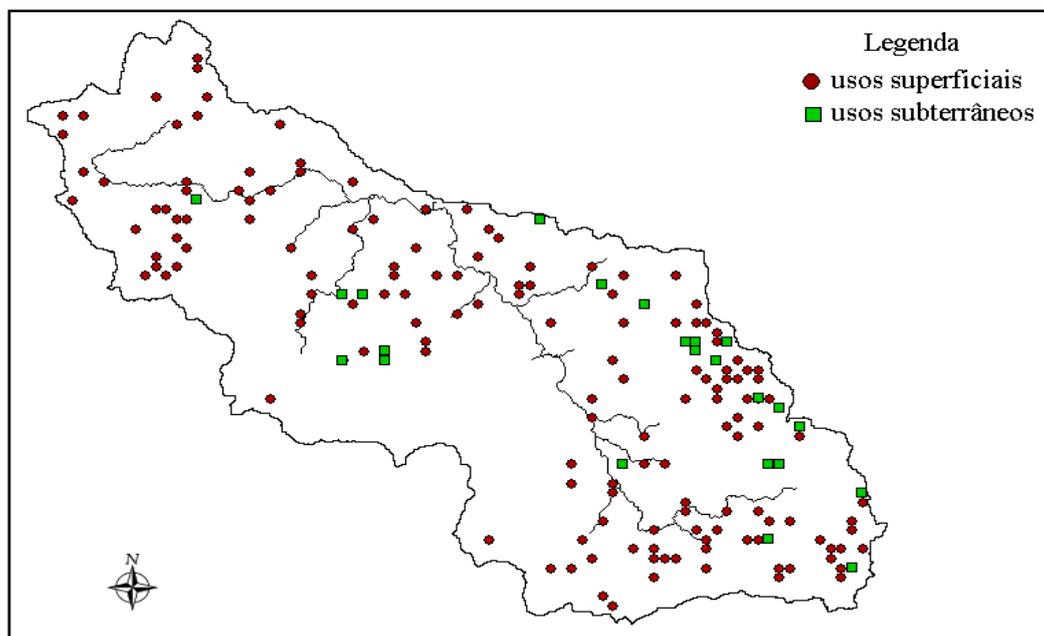


Figura 6.7: Localização dos pontos de extração de água superficial e subterrânea na bacia do Alto Paranaíba.

Os usos dos recursos hídricos superficiais representam a maior parcela outorgada na bacia, totalizando 3,98 m³/s, o que corresponde a 98,8% das vazões totais outorgadas. Já os usos subterrâneos, representam apenas 1,2% das vazões outorgadas, correspondendo a uma vazão explorada de 0,05 m³/s. Embora esses usos respondam por apenas uma pequena parcela de água utilizada na bacia, deve-se levar em consideração que a ausência de normas e instrumentos de gerenciamento dos aquíferos na região, oculta a possível existência de explorações não contabilizadas.

No estado de Minas Gerais, os critérios para outorgas de água superficial, regulamentados na Lei N° 13.999/99 e nas Portarias IGAM N° 010/98 e 007/99, estabelecem como limite máximo para uso superficial da água até 30% da Q_{7,10} (Minas Gerais, 1998 1999a, 1999b), o que corresponde na bacia do Alto Paranaíba a uma vazão de 8,47 m³/s. Assim, no máximo 2,54 m³/s podem ser outorgados para uso superficial. Considerando as vazões superficiais de água atualmente outorgadas na bacia (3,98 m³/s), se percebe que as mesmas já ultrapassam em 57% o limite estabelecido pela legislação.

Na Figura 6.8 é mostrada a distribuição percentual por tipo de uso das outorgas de água superficial na bacia e, como se observa, o uso agrícola é responsável por 83% das vazões captadas no rio, seguidos dos usos industriais com 14% do total.

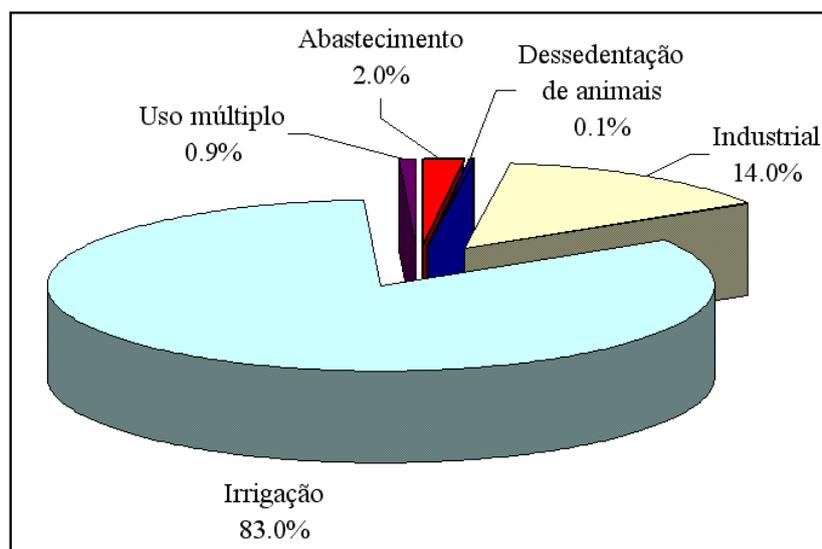


Figura 6.8: Percentual por tipo de uso das águas superficiais na bacia do Alto Paranaíba.

Quanto às retiradas subterrâneas, na Figura 6.9 é mostrado o percentual correspondente a cada tipo de uso, donde se observa que a destinação de água para irrigação responde em 73% das explorações, o que equivale a aproximadamente 0,04 m³/s.

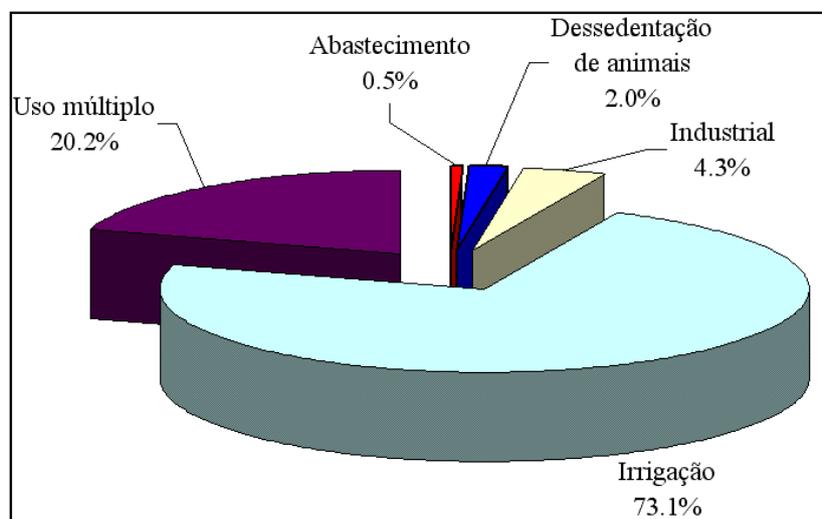


Figura 6.9: Percentual por tipo de uso das águas subterrâneas na bacia do Alto Paranaíba.

Considerando os usos superficiais da água já acima do limite legal outorgável e o pequeno percentual de uso subterrâneo atual na bacia, verifica-se que os mananciais subterrâneos podem representar uma reserva estratégica para atendimento da demanda futura por água, corroborando a importância do estudo de alternativas de outorga integrada de direito de uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na bacia.

6.3 - SIMULAÇÃO DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS NA BACIA

6.3.1. - Discretização

A bacia do Alto Paranaíba foi discretizada em células quadradas de 5 Km de lado, totalizando 91 células. Cada uma dessas células foi dividida em até 6 blocos (dependendo das características de cada célula), os quais representam a combinação entre classes de uso do solo, definidas na Tabela 6.1, e grupos de tipos de solo, indicados na Tabela 6.2. Os tipos de solo foram separados em dois grupos, conforme alta ou baixa capacidade de infiltração. Essa separação foi feita com base na classificação hidrológica de solos brasileiros, enunciada em Sartori *et al.* (2005), na qual os latossolos vermelho e vermelho-amarelo se classificam como solos do grupo hidrológico A e B, de alta taxa de infiltração, e os cambissolos háplicos como solos do grupo hidrológico C, com baixa capacidade de infiltração. Esses grupos foram combinados com os usos do solo para criação dos blocos, com exceção da cobertura de solo mata, que foi isolada em um único bloco, independentemente do tipo de solo, já que, nessas áreas, a capacidade de infiltração tende a ser alta em virtude da densa cobertura vegetal e maior profundidade do solo. A Tabela 6.5 apresenta a frequência relativa dos blocos, e a Figura 6.10 a sua distribuição espacial na bacia.

Tabela 6.5: Frequência dos blocos do modelo MGB-IPH.

Número	Blocos	Frequência (%)
1	mata	20,33
2	alta infiltração e agricultura	32,47
3	baixa infiltração e agricultura	6,58
4	alta infiltração e cerrado	29,27
5	baixa infiltração e cerrado	9,53
6	água	1,82

O modelo numérico do terreno para se tornar compatível com a discretização utilizada, teve sua resolução original, de 90 x 90 m, reduzida para uma resolução de 5 x 5 Km (Paz *et al.*, 2006). Com base nesse MNT de baixa resolução, foram obtidas as direções de fluxo e a área de drenagem de cada célula utilizando técnicas de geoprocessamento, como discutido em 5.2. A partir das direções de fluxo, foi gerada a rede de drenagem topológica, representada na Figura 5.2, que é apenas uma representação da ordem hierárquica de drenagem das células.

As informações sobre comprimentos e trechos de rio foram geradas automaticamente utilizando as informações do MNT, das direções de fluxo e das áreas de drenagem em cada célula, tendo sido utilizado para isso, um algoritmo próprio desenvolvido no IPH por Paz *et al.* (2007).

Todas essas informações relacionadas às células foram, então, inseridas no arquivo de entrada do modelo, apresentado no Anexo C.

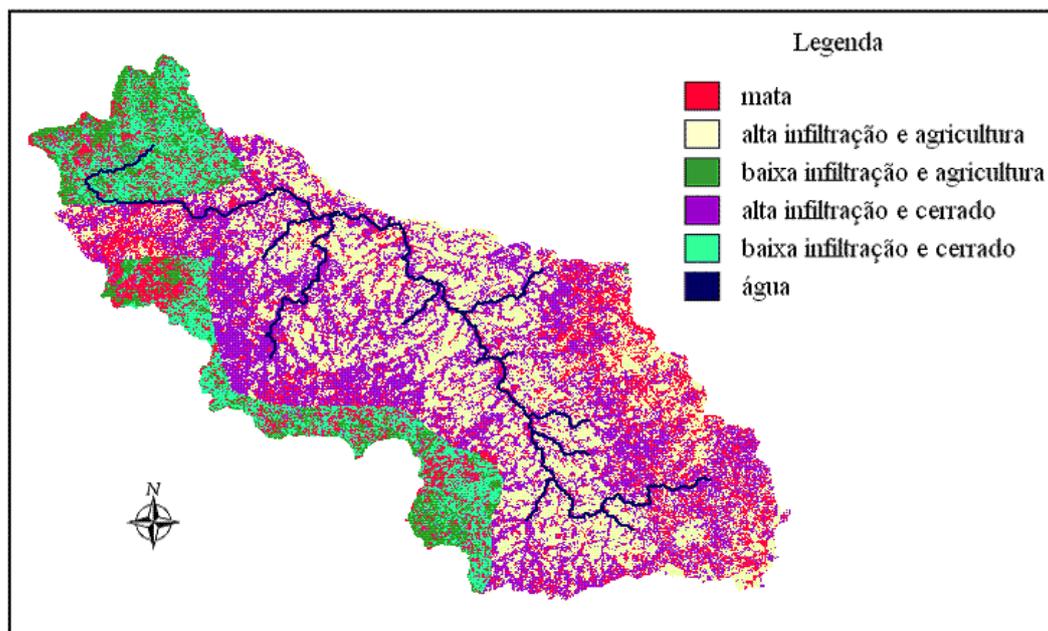


Figura 6.10: Distribuição espacial dos blocos do modelo na bacia do Alto Paranaíba.

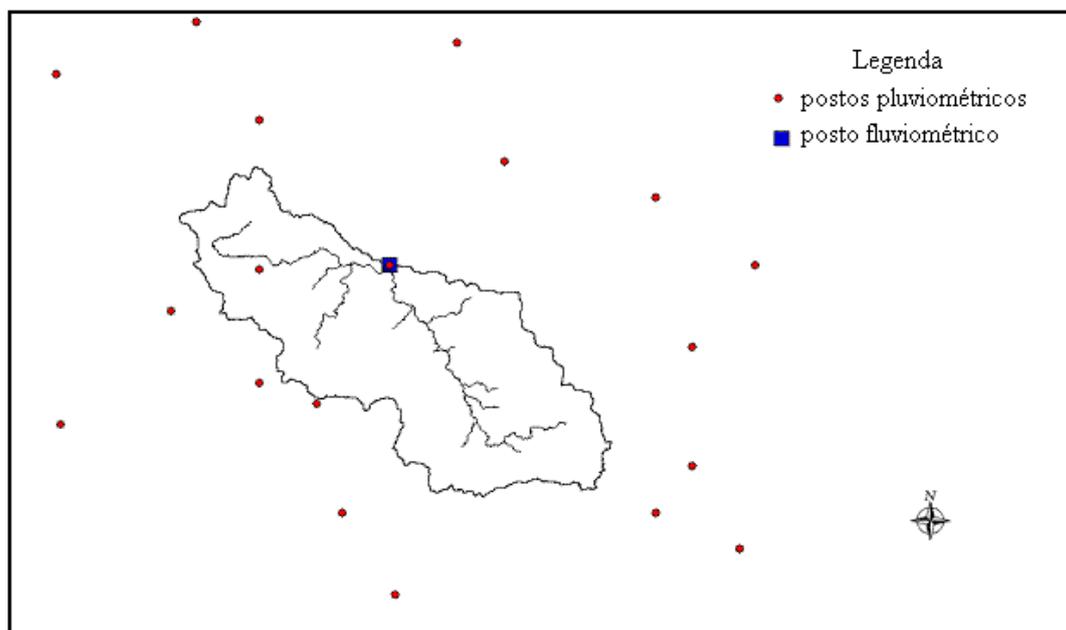
6.3.2. - Dados de entrada

O MGB utiliza dados de precipitação, temperatura do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa em intervalo de tempo diário, para simular o balanço hídrico e calcular vazões em uma bacia hidrográfica, as quais são comparadas às descargas observadas em locais com dados de postos fluviométricos.

Os dados de precipitação diária utilizados nessa pesquisa são do período de 01/01/1970 a 31/12/2005 e foram extraídos de 19 postos pluviométricos, disponibilizados no Hidroweb da ANA. No Quadro 6.1, são apresentados os postos pluviométricos empregados e no Anexo D é mostrado um resumo das características dos dados em cada posto quanto ao número de falhas. Na Figura 6.11 é mostrada a sua distribuição espacial na bacia, tendo sido feita a interpolação dos dados por meio do programa INTERPLU (Collischonn, 2001), conforme descrito na metodologia no item 5.2 do capítulo anterior.

Quadro 6.1: Postos pluviométricos utilizados na simulação.

Código	Nome	Latitude	Longitude
01845004	Lagoa do Gouveia	-18°50'29''	-45°51'05''
01845014	Tiros	-18°59'59''	-45°57'58''
01846002	Charqueada do Patrocínio	-18°50'59''	-46°48'03''
01846003	Major Porto	-18°42'25''	-46°02'13''
01846004	Guimaranã	-18°50'59''	-46°48'03''
01846005	Presidente Olegário	-18°24'45''	-46°25'20''
01846006	Pântano	-18°33'34''	-46°48'01''
01846017	Leal de Patos	-18°38'28''	-46°20'04''
01846019	Rocinha	-18°22'25''	-46°54'54''
01847008	Coromandel	-18°28'16''	-47°11'18''
01945002	Barra do Funchal	-19°23'41''	-45°53'04''
01945013	Matutina	-19°14'00''	-45°58'00''
01946004	Ibiá	-19°28'30''	-46°32'31''
01946005	Salitre	-19°04'14''	-46°47'45''
01946007	Fazenda São Mateus	-19°31'00''	-46°34'16''
01946008	Serra do Salitre	-19°06'46''	-46°41'18''
01946009	São Gotardo	-19°18'55''	-46°02'40''
01946018	Ponte do Rio São João	-19°19'24''	-46°38'14''
01947006	Ponte João Cândido	-19°08'48''	-47°11'05''

**Figura 6.11: Localização dos postos pluviométricos e fluviométrico utilizados na simulação.**

A série de vazões observadas, obtida também do Hidroweb da ANA para o período de 01/01/1970 a 31/12/2005, refere-se à estação Santana dos Patos, que demarca o exutório da bacia do Alto Paranaíba na região considerada no estudo. O Quadro 6.2 mostra as informações referentes a essa estação e na Figura 6.11, é mostrada a sua localização na bacia.

Quadro 6.2: Postos fluviométricos utilizados na simulação.

Nome da estação	Santana dos Patos
Código Hidroweb	60010000
Bacia (código)	Paraná (6)
Sub-bacia (código)	Paranaíba (60)
Rio	Paranaíba
Estado	Minas Gerais
Município	Patos de Minas
Latitude	-18°50'28''
Longitude	-46°33'03''
Área de drenagem (ANA) – Km ²	2714

Quanto aos dados climatológicos, obtidos da plataforma de coleta de dados do INPE, não há postos com informações disponíveis na bacia, por isso, foram utilizadas informações dos 3 postos mais próximos a ela, indicados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3: Postos climatológicos utilizados na simulação.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Série de dados
32334	Araxá	-19°38'24''	-46°58'12''	2001-2006
32357	Caldas Novas	-17°43'12''	-48°36'36''	1999-2006
32505	Paracatu	-17°15'00''	-46°52'48''	1997-2006

Além da pouca quantidade de postos climatológicos disponíveis, as séries de dados de temperatura, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e pressão, disponibilizadas em discretizações de 3 horas, são de curto período de tempo, considerando o período da simulação (01/01/1970 a 31/12/2005). Por isso, para entrada no modelo com os valores diários dessas variáveis, foram utilizadas suas médias mensais, em seguida, interpoladas para cada uma das células do modelo. No Anexo E são apresentados esses valores e as características das variáveis climatológicas em cada um dos postos considerados.

6.3.3. - Calibração dos parâmetros

O período de 36 anos com dados disponíveis, de 1970 a 2005, foi dividido em dois grupos: a primeira metade, de 01/01/1970 a 31/12/1987, para a calibração do modelo, e os últimos 18 anos para as etapas de verificação e aplicação do modelo, ambas as simulações com período de tempo de cálculo diário. A série de vazões observadas e a separação dos períodos de dados correspondentes ao período de calibração e verificação/aplicação são mostradas na Figura 6.12.

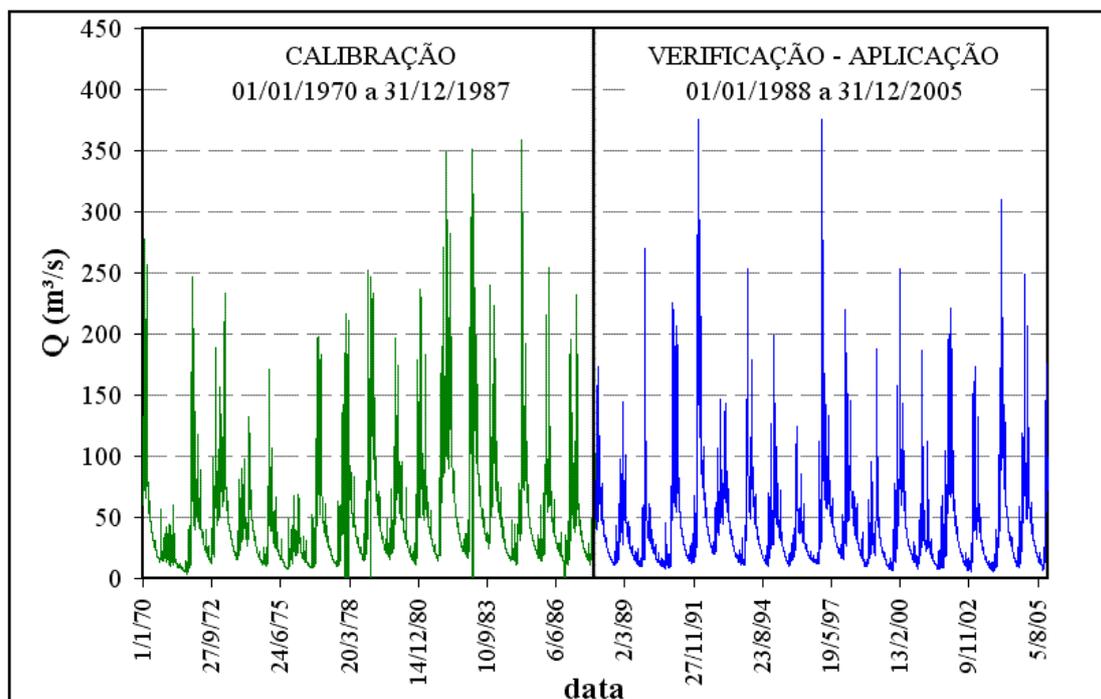


Figura 6.12: Séries de vazões observadas em Santana dos Patos referentes aos períodos de calibração, verificação e aplicação.

Como uma das propostas desse trabalho é de investigar a representação do aquífero em modelos hidrológicos, na etapa de calibração os parâmetros do modelo foram ajustados para a representação linear e não-linear do reservatório subterrâneo. A calibração foi feita utilizando o algoritmo de otimização automática multi-objetivo MOCOM-UA, comentado no item 5.3 da metodologia.

Os parâmetros calibrados foram o W_m , b , K_{INT} , K_{BAS} , C_S e C_I . Os parâmetros que controlam a evapotranspiração (albedo, IAF, altura das árvores e resistência superficial) foram considerados fixos, com base em valores encontrados na literatura e apresentados no Anexo F. Os parâmetros C_S , C_I , CB e CB' controlam o retardo do escoamento dentro das células, sendo os dois primeiros coeficientes calibráveis e adimensionais, e os dois últimos mantidos fixos, sendo estimados a partir dos dados de recessão dos hidrogramas, segundo a Equação 5.17, no caso da representação linear; e a Equação 5.19, no caso da representação não-linear do reservatório subterrâneo no modelo. Na representação não-linear do reservatório subterrâneo, o parâmetro β (Equação 4.4) foi fixado em 0,5 (Wittenberg, 1999).

Uma das dificuldades constatadas na fase de calibração foi quanto ao cálculo da evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração foi sempre subestimada pelo modelo, impedindo um bom ajuste das vazões no período de recessão, quando essa taxa é maior. Essa falha é devida à pequena quantidade de dados climatológicos disponíveis e à utilização das

médias mensais desses dados, para simulação com discretização temporal diária. A alternativa encontrada foi corrigir a evapotranspiração em 30% para compensar a utilização na equação de Penmann-Monteith (Equação 5.6) dos dados médios mensais.

Nas Tabelas 6.6 e 6.7, são mostrados, respectivamente, os valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos e à propagação nas células, utilizando o reservatório linear; e nas Tabelas 6.8 e 6.9, esses mesmos parâmetros para a calibração com reservatório não-linear.

Tabela 6.6: Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos (modelo linear)

Bloco	Parâmetro			
	W_m (mm)	b (-)	K_{BAS} (mm/dia)	K_{INT} (mm/dia)
1	185,70	0,11	4,97	54,03
2	658,35	0,11	4,97	54,03
3	522,55	0,11	4,97	54,03
4	774,45	0,11	4,97	54,03
5	395,50	0,11	4,97	54,03
6	0,00	0,11	4,97	54,03

Tabela 6.7: Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células (modelo linear)

Parâmetro	Valor
C_s (-)	16,27
C_l (-)	91,10
CB (horas)	3000,00

Tabela 6.8: Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos (modelo não-linear)

Bloco	Parâmetro			
	W_m (mm)	b (-)	K_{BAS} (mm/dia)	K_{INT} (mm/dia)
1	212,24	0,06	2,82	15,00
2	1294,46	0,06	2,82	15,00
3	932,70	0,06	2,82	15,00
4	1446,79	0,06	2,82	15,00
5	799,94	0,06	2,82	15,00
6	0,00	0,06	2,82	15,00

Tabela 6.9: Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células (modelo não-linear)

Parâmetro	Valor
C_s (-)	17,30
C_l (-)	55,92
CB' ($m^{1,5} \cdot d \cdot s^{-0,5}$)	803,14

Os ajustes foram avaliados considerando a análise visual dos hidrogramas e verificando os valores do coeficiente de Nash (R^2), desse coeficiente logaritmizado (R^2_{\log}) e da relação entre os volumes medidos e calculados (ΔV). Na Tabela 6.10 são apresentadas as estatísticas das calibrações com o reservatório linear e o não-linear, e na Figura 6.13, são mostrados os hidrogramas observado e calculado para essas duas formulações no período de 01/01/1980 a 01/01/1981.

Tabela 6.10: Valores das estatísticas do ajuste do modelo para representação linear e não-linear do reservatório subterrâneo no período de calibração (1970-1987).

Estatísticas	Reservatório linear	Reservatório não-linear
R^2	0,82	0,84
R^2_{\log}	0,84	0,83
Erro volume	-5,60	6,32

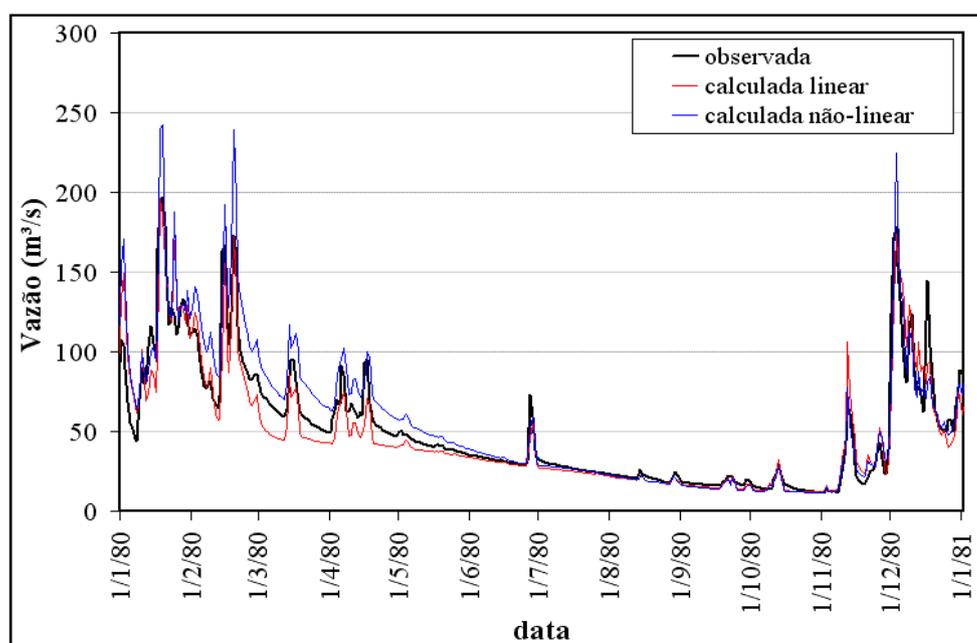


Figura 6.13: Hidrogramas observado e calculados com reservatório linear e não-linear de janeiro de 1980 a janeiro de 1981.

A calibração dos parâmetros apresentou resultados semelhantes quanto à qualidade do hidrograma calculado (ver Figura 6.13), tanto para a representação linear, quanto não-linear do reservatório subterrâneo. Em ambos os casos, o modelo não se ajustou bem às vazões no início da recessão, subestimando-as com o reservatório linear e as superestimando com o não-linear. Tendo em vista a similaridade nos resultados, optou-se por utilizar, nas etapas seguintes de verificação e aplicação do modelo, a representação linear, em função dos valores

das funções-objetivo terem sido ligeiramente melhores (maior $R_{2\log}$ e menor erro de volume) para essa representação do que para a não-linear.

A extração de água em uma bacia hidrográfica tem um impacto significativo principalmente no período de menores vazões no rio, que coincide geralmente com o de poucos eventos chuvosos e com a maior demanda por água, especialmente para as atividades de irrigação. Por isso, uma das prioridades na qualidade do ajuste dos parâmetros foi a boa representação das recessões do hidrograma. Os resultados dos parâmetros calibrados com a representação linear mostram que o valor do coeficiente de Nash para o logaritmo das vazões ($R_{2\log}$), que dá maior peso para os valores mínimos, foi relativamente bom (igual a 0,84), indicando uma representação adequada da maioria das recessões. Na Figura 6.14 é mostrada parte do hidrograma observado e calculado no rio Paranaíba para o período de calibração, em que é possível verificar o bom ajuste das recessões.

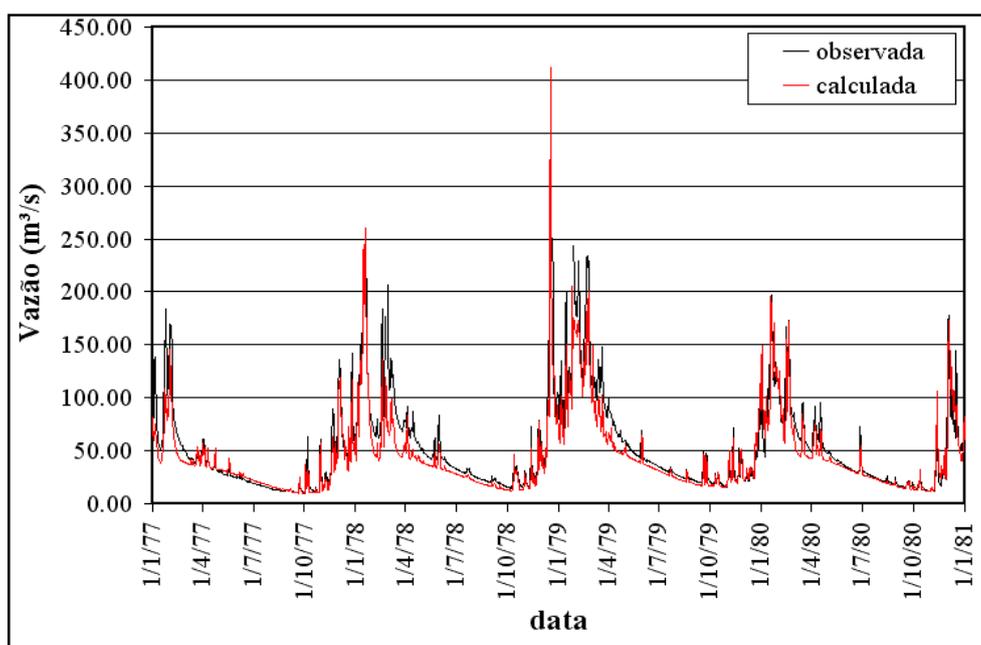


Figura 6.14: Hidrograma de vazões diárias calculado e observado no rio Paranaíba no período de calibração (01/01/1977 – 01/01/1981).

6.3.4. - Verificação dos parâmetros

Na etapa de verificação, tendo sido o reservatório linear escolhido, o valor do parâmetro CB , relacionado à regularização do curso fluvial pelo reservatório subterrâneo, é igual a 3000 horas, valor calculado para o Alto Rio Paranaíba. Os resultados da verificação do modelo são apresentados, nesse texto, em termos de valores atingidos das funções-objetivo e

dos gráficos de hidrogramas de vazões diárias, da curva de permanência e da curva de frequência de vazões mínimas.

A Tabela 6.11 apresenta os valores das funções objetivo calculadas no período de calibração e verificação no posto Santana dos Patos. Como se observa, no período de verificação as estatísticas da série indicam também um bom ajuste do modelo, principalmente o valor do coeficiente $R2_{\log}$, que é superior a 0,80, implicando numa boa representação das recessões nesse período. Já os erros de volume foram, em geral, relativamente altos, tendo sido, no período de verificação, cerca de 9% inferior ao observado. Essa diferença, entretanto, está na subestimativa das vazões de pico pelo modelo, não representando erro significativo para o propósito deste trabalho.

Tabela 6.11: Valores das estatísticas do ajuste nos períodos de calibração e verificação.

Estadísticas	Período de calibração (1977-1988)	Período de verificação (1988-2006)
R2	0,82	0,78
$R2_{\log}$	0,84	0,84
Erro de volume	-5,60	-9,20

A Figura 6.15 mostra os hidrogramas de vazões diárias calculado e observado no rio Paranaíba no período de verificação para o ano de 1989.

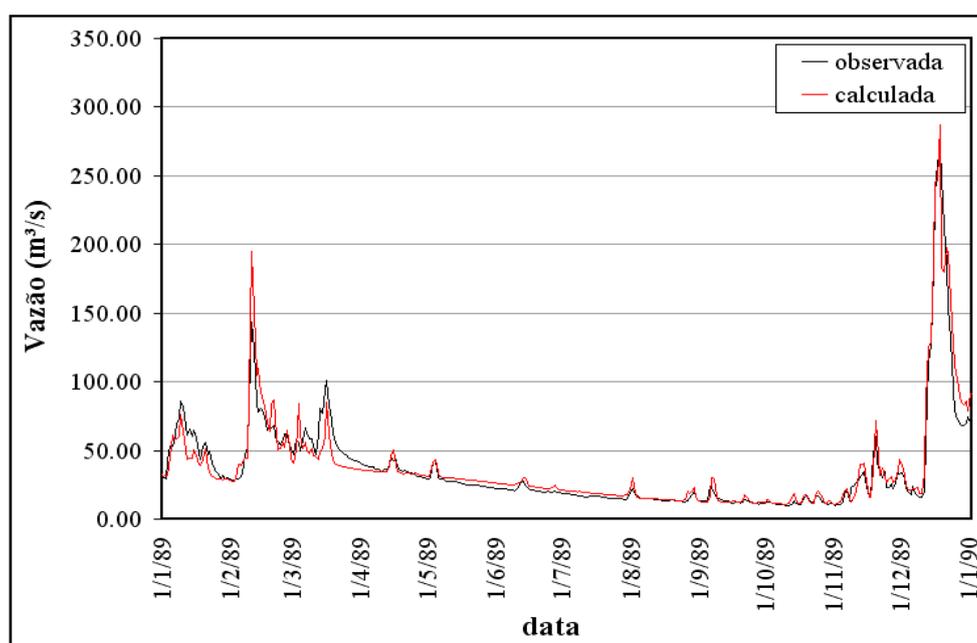


Figura 6.15: Hidrogramas de vazões diárias calculado e observado no rio Paranaíba de janeiro de 1989 a janeiro de 1990.

Na Tabela 6.12, estão sintetizadas as vazões de referência observada e calculada no período de verificação, e os erros relativos. No geral, como se observa, as vazões calculadas ficaram bem próximas das observadas, apresentando erros relativos inferiores a 5%.

Tabela 6.12: Vazões de referência observada e calculada no período de verificação.

Vazão	Observada (m ³ /s)	Calculada (m ³ /s)	Erro relativo (%)
Q _{média}	42,10	40,05	-4,88
Q ₉₀	12,04	12,12	0,69
Q ₅₀	28,77	27,45	-4,60
Q _{recarga}	17,62	17,68	0,40
Q ₉₅	10,21	10,50	2,87
Q _{7,10}	8,47	8,40	-0,80

A curva de permanência das vazões calculadas pelo modelo, mostrada na Figura 6.16, apresenta um ajuste aceitável, com exceção das vazões com baixa permanência, justamente pela deficiência no ajuste das vazões altas. O modelo subestimou os valores de vazões médias e se aproximou bem das vazões com 90% e 95% de permanência, a partir da qual é possível perceber uma tendência de superestimativa do ajuste. A vazão com permanência de 50%, necessária ao cálculo da vazão de recarga estimada do aquífero, foi igual a 27,45 m³/s, que representa um valor 4,60% inferior ao observado.

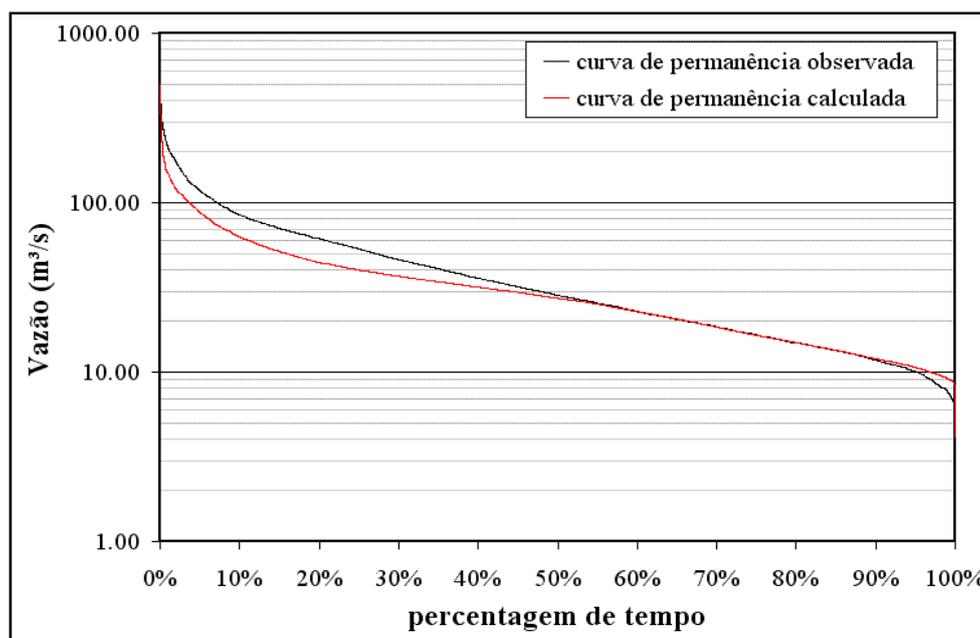


Figura 6.16: Curvas de permanência de vazões diárias calculada e observada no rio Paranaíba no período de verificação (01/01/1988 – 31/12/2005).

Na Figura 6.17 são mostradas as curvas de frequência de vazões mínimas anuais com 7 dias de duração, ajustadas para a série de dados observados e para o período de verificação calculado. As probabilidades de não-excedência dos valores amostrais foram estimadas pela fórmula de Gringorten (Lanna, 2004). Já a função cumulativa de frequência de não-excedência foi ajustada pela distribuição de Gumbel (Clarke, 2004), em que se observa que o ajuste para os dados calculados pelo modelo subestimou as vazões mínimas com 7 dias de duração para as maiores probabilidades de não-excedência (menores períodos de retorno), mas se mostrou adequado para o período de retorno de interesse, tendo sido a $Q_{7,10}$ calculada subestimada em menos de 1%.

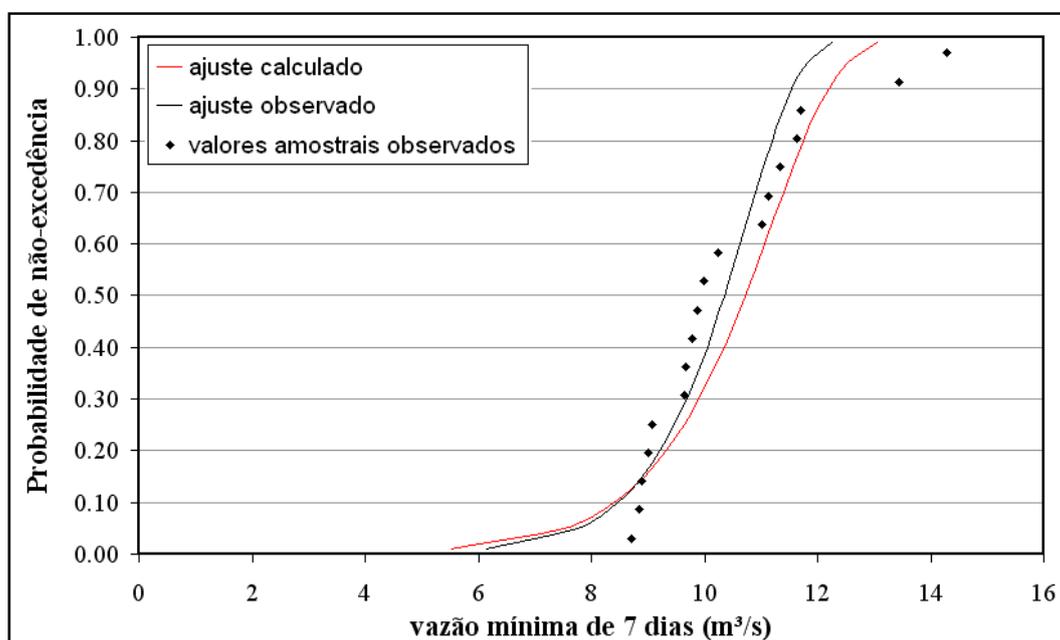


Figura 6.17: Curvas de frequências de vazões mínimas anuais de 7 dias de duração calculada e observada no rio Paranaíba no período de verificação (01/01/1988 – 31/12/2005).

Ajustado o modelo, nas etapas seguintes de sua aplicação, os efeitos das retiradas de água superficial e subterrânea na bacia são comparados por meio de hidrogramas, curvas de permanência e de frequência de mínimas calculadas.

6.4 - CURVAS DE OUTORGA DE USO INTEGRADO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Os cenários simulados de retiradas de água superficial e subterrânea foram dois: o primeiro para as retiradas atualmente outorgadas e retiradas hipotéticas na bacia do Alto Rio Paranaíba, essas últimas durante o período seco e durante todo o ano; e o segundo com combinações hipotéticas de usos dos recursos hídricos para três valores do parâmetro CB

(representando bacias com baixa, média e alta regularização subterrânea) com retiradas apenas durante o período seco, visando generalizar as curvas de outorga de uso integrado para aplicação em outras bacias.

6.4.1. - Simulações na bacia do Alto Rio Paranaíba

Cenário com as retiradas de água atualmente outorgadas

O primeiro cenário simulado refere-se aos usos da água na bacia do Alto Rio Paranaíba, discutidos no item 6.2 e apresentados no Anexo B. As retiradas superficiais são simuladas no momento em que o modelo realiza a propagação na rede de drenagem, mediante a extração de água em uma única célula do modelo, localizada à montante do exutório, e corresponde a uma vazão total de 3,98 m³/s. Já as explorações subterrâneas são simuladas mediante a extração de água do reservatório subterrâneo nas células, conforme a localização geográfica dos pontos de retirada, e corresponde a uma vazão total de 0,05 m³/s. A Figura 5.5 mostra as células do modelo em que são feitas essas retiradas.

É importante relatar que, na realidade, esse cenário não representa os impactos dos atuais usos da água sobre a disponibilidade hídrica no curso superficial, porque a série de vazões utilizada no período de aplicação já agrega o impacto de retiradas existentes. Como a maioria das informações dos usos outorgados é recente, a maioria após a publicação da Lei N° 9.433/97, a simulação desse cenário tem por objetivo verificar os impactos que possivelmente seriam causados no rio pelas retiradas de água referentes aos totais de outorgas na bacia.

A Tabela 6.13 apresenta um resumo dos efeitos dos usos conjuntos da água nesse cenário sobre as vazões de referência calculadas na estação Santana dos Patos. Com relação às vazões de referência normalmente utilizadas na definição de critérios de outorga superficial (Q₉₀, Q₉₅ e Q_{7,10}), como o impacto das retiradas é maior sobre as vazões menores, a intensidade de redução da Q_{7,10} é mais expressiva (redução de 51% do seu valor).

Tabela 6.13: Vazões de referência calculadas no período de aplicação sem e com as retiradas outorgadas na bacia.

Vazão	Calculada sem retirada (m ³ /s)	Calculada com retirada (m ³ /s)	Diferença (%)
Q _{média}	40,05	36,05	-10
Q ₅₀	27,45	23,12	-16
Q ₉₀	12,12	7,80	-36
Q ₉₅	10,50	6,18	-41
Q _{7,10}	8,40	4,07	-51

A Figura 6.18 mostra os hidrogramas calculados, sem e com as retiradas totais outorgadas na bacia, para o período de 01/01/2005 a 01/01/2006. Como se observa, os efeitos das retiradas produzem um decaimento nas vazões em todas as fases do regime hidrológico, sendo mais significativo no período de estiagem. A vazão média sofre uma redução de aproximadamente 10%, passando de 40,05 m³/s para 36,05 m³/s, que significa uma diferença em volume equivalente à quantidade de água retirada.

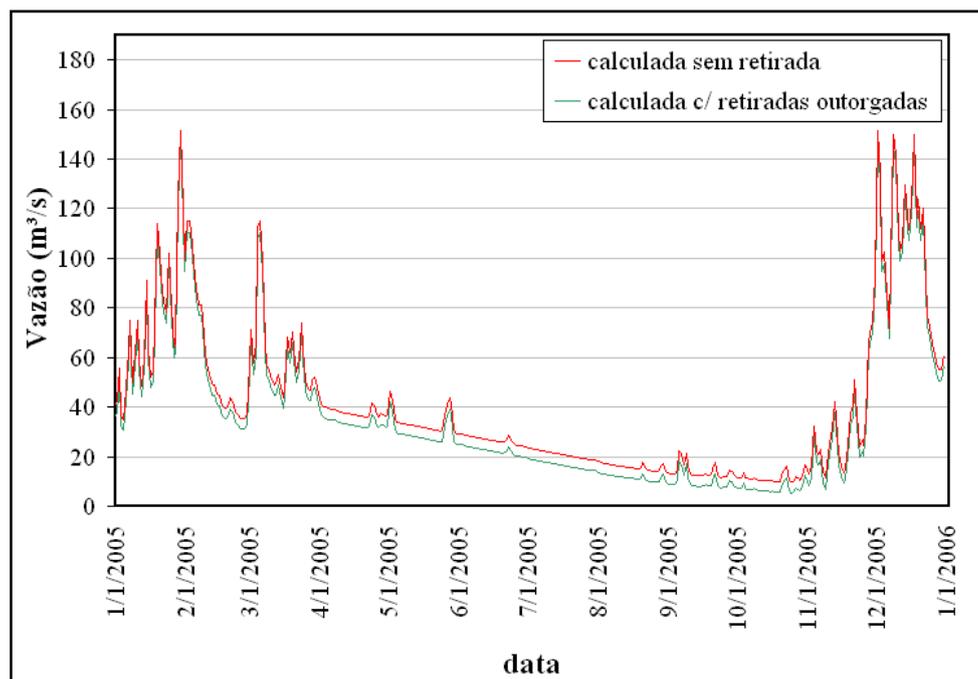


Figura 6.18: Hidrogramas de vazões diárias calculadas no rio Paranaíba de janeiro de 2005 a dezembro de 2006 sem e com as retiradas atualmente outorgadas na bacia.

Na Figura 6.19 é mostrado o impacto das extrações sobre a curva de permanência calculada no período de aplicação. O efeito das retiradas de água é expressivamente maior no último terço da curva, o que mostra que os impactos são maiores sobre as vazões de maior permanência, isto é, as menores vazões, como se esperaria. A vazão com 90% de permanência tem uma redução de 36%, e a porcentagem do tempo em que a vazão no rio é inferior à Q_{90} original para a ser igual a 23% (isto é, a Q_{90} original passa a equivaler a Q_{77}). Já a vazão com 95% de permanência é reduzida em 41%, e a porcentagem do tempo em que a vazão no rio é inferior à Q_{95} original passa a ser igual a 18% do tempo (isto é, a Q_{95} original passa a ser a Q_{82}).

Quanto às curvas de frequência de vazões mínimas com 7 dias de duração, apresentadas na Figura 6.20, o efeito das retiradas resulta em uma diminuição das vazões mínimas para todos os tempos de retorno. A $Q_{7,10}$ sem as retiradas, que significa a vazão

mínima de 7 dias de duração e tempo de retorno de 10 anos; passa a ter um tempo de retorno de aproximadamente 1 ano após as retiradas, o que significa que a vazão $Q_{7,10}$ original, igual a $8,40 \text{ m}^3/\text{s}$, passa a ser a $Q_{7,1}$. A $Q_{7,10}$ após as retiradas apresenta uma redução de 51%, passando para $4,07 \text{ m}^3/\text{s}$.

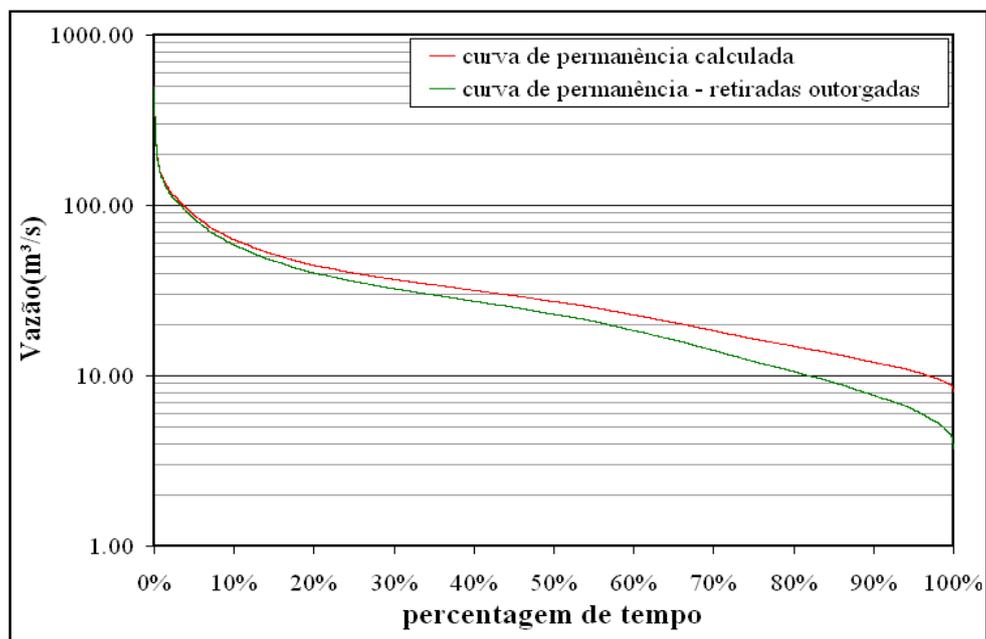


Figura 6.19: Curvas de permanência calculadas no rio Paranaíba no período de aplicação (01/01/1988 – 31/12/2005) sem e com as retiradas outorgadas na bacia.

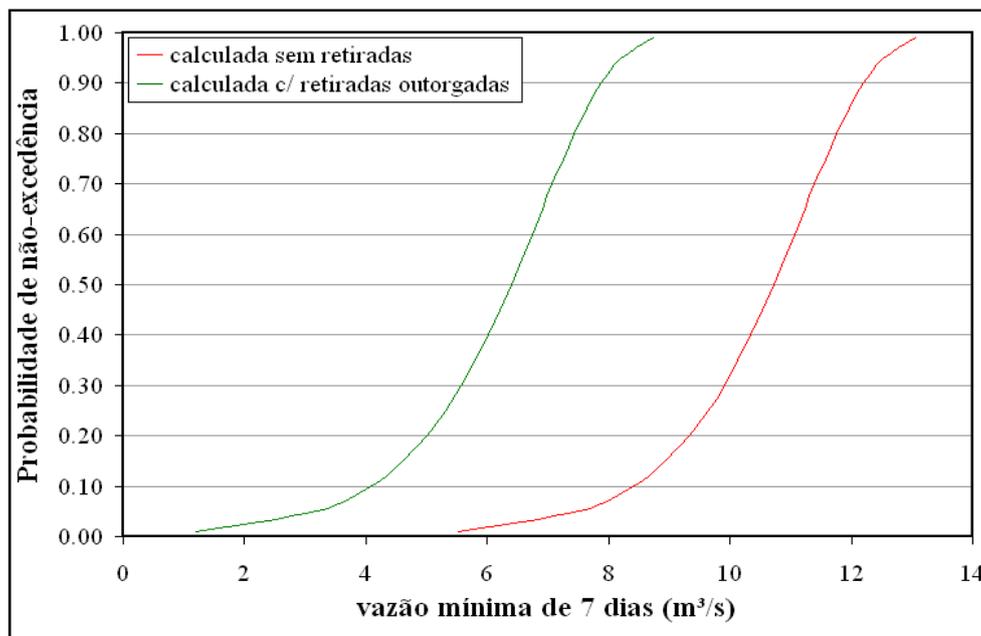


Figura 6.20: Curvas de frequência de vazões mínimas de 7 dias calculadas no rio Paranaíba no período de aplicação (01/01/1988 – 31/12/2005) sem e com as retiradas outorgadas na bacia.

Cenário com retiradas hipotéticas na bacia do Alto Rio Paranaíba

Os cenários hipotéticos simulados na bacia do Alto Paranaíba reproduzem diferentes combinações de percentuais de retirada de água superficial e subterrânea, com o objetivo de elaborar curvas de outorga de uso integrado dos recursos hídricos nessa bacia, para retiradas durante o período de estiagem (abril a outubro) e retiradas durante todo o ano.

As retiradas superficiais, concentradas na célula exutório da bacia, estão baseadas em percentuais (0%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100%) da vazão de referência $Q_{7,10}$, utilizada pelo IGAM para definição de critérios de outorga em Minas Gerais. Já as retiradas subterrâneas, homoganeamente distribuídas por todas as células do modelo, estão baseadas em percentuais da vazão de recarga por célula e variam de 0% de retirada até o limite máximo da capacidade de exploração de água dos reservatórios subterrâneos em cada célula, isto é, até o percentual máximo possível de exploração sem que os reservatórios subterrâneos no modelo (91 no total) sequem. Na Figura 5.8 são mostradas as células do modelo em que são feitas essas retiradas.

Os impactos das extrações de água foram avaliados quanto à redução provocada na vazão de referência $Q_{7,10}$ com relação a essa vazão calculada sem as retiradas. Na Tabela 6.14 são mostrados os valores das vazões de referência na bacia considerando a situação sem retiradas, isto é, 0% de uso superficial e 0% de uso subterrâneo.

Tabela 6.14: Vazões de referência calculadas sem retiradas de água para a bacia do Alto Rio Paranaíba.

Vazão	CB=3.000 horas
$Q_{\text{média}}$ (m ³ /s)	40,05
Q_{90} (m ³ /s)	12,12
Q_{50} (m ³ /s)	27,45
Q_{recarga} (m ³ /s)	17,69
Q_{95} (m ³ /s)	10,50
$Q_{7,10}$ (m ³ /s)	8,40
Q_{50}/Q_{90} (%)	44,17

Na Figura 6.21 é apresentado um quadro ilustrativo dos cenários hipotéticos simulados em que foram combinadas retiradas superficiais e subterrâneas de água entre os percentuais indicados na figura, tanto para as retiradas durante o período de estiagem quanto para aquelas durante todo o ano. Os resultados dos impactos das retiradas de água na bacia sobre a $Q_{7,10}$ para cada um dos percentuais simulados são apresentados nas tabelas apresentadas no Anexo G.

A linha em destaque na Figura 6.21 indica o percentual de retirada subterrânea a partir do qual todos os reservatórios subterrâneos no modelo secam, o que ocorre antes que 100% da

recarga sejam retirados. Isso porque, como discutido no item 2.2.1, no balanço hídrico subterrâneo, uma parcela da água de recarga do aquífero é drenada para o rio e para a zona não-saturada por ascensão capilar (esta última não considerada nessa modelagem). Assim, pela simulação no modelo hidrológico, a máxima capacidade de retirada de água subterrânea na bacia seria de até 58,36% da recarga estimada do aquífero (58,36% de 17,69 m³/s, que equivale a 10,32 m³/s) para retiradas durante o período de estiagem; e de até 48,39% da recarga estimada do aquífero (48,39% de 17,69 m³/s, que equivale a 8,56 m³/s) para retiradas durante todo o ano. Esse resultado mostra que o critério de se utilizar 100% da recarga não representa na verdade uma condição sustentável de exploração dos recursos hídricos subterrâneos, embora persista em ser aplicado mesmo tendo sido repetidamente criticado na literatura (Alley *et al.*, 1999; Alley & Leake 2004; Sophocleous 1997, 2000, 2002).

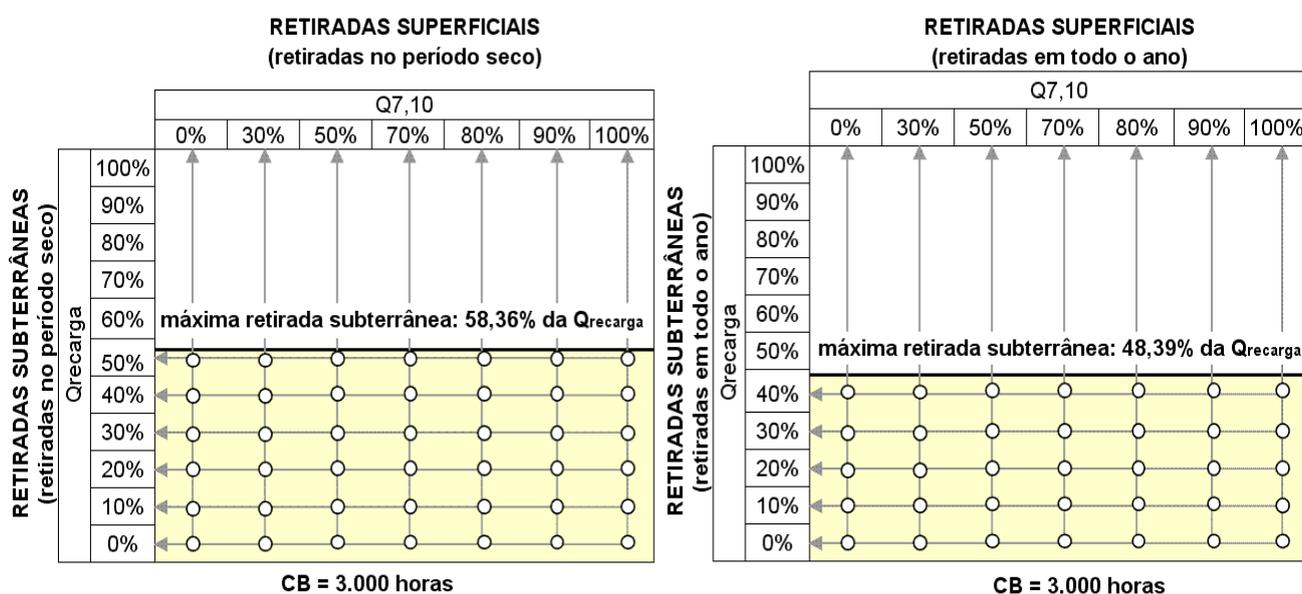


Figura 6.21: Cenários hipotéticos simulados na bacia do Alto Paranaíba.

As curvas de outorga de uso integrado foram elaboradas pela interpolação dos percentuais de retiradas simulados (círculos indicados na Figura 6.21) no programa computacional *Surfer 8.0*, para possibilitar a estimativa dos efeitos das retiradas entre os intervalos percentuais de extração superficial e subterrânea considerados. Os procedimentos aplicados para construção das curvas de outorga de uso integrado e da etapa de interpolação dos percentuais de usos de água na bacia são discutidos no Anexo G.

A seguir, são apresentadas as curvas de outorga de uso integrado para os cenários com retiradas apenas no período seco (de abril a outubro) e para retiradas durante todo o ano na bacia.

i) Retiradas durante o período seco

A Figura 6.22 mostra as curvas dos efeitos sobre a $Q_{7,10}$ das combinações de retiradas de água superficial e subterrânea, durante o período de estiagem, na bacia do Alto Rio Paranaíba, representativa de bacias com média regularização subterrânea ($CB=3.000$ horas). Na Figura 6.22a são mostrados os impactos em valores percentuais, enquanto a Figura 6.22b mostra os impactos para valores absolutos das vazões extraídas na bacia.

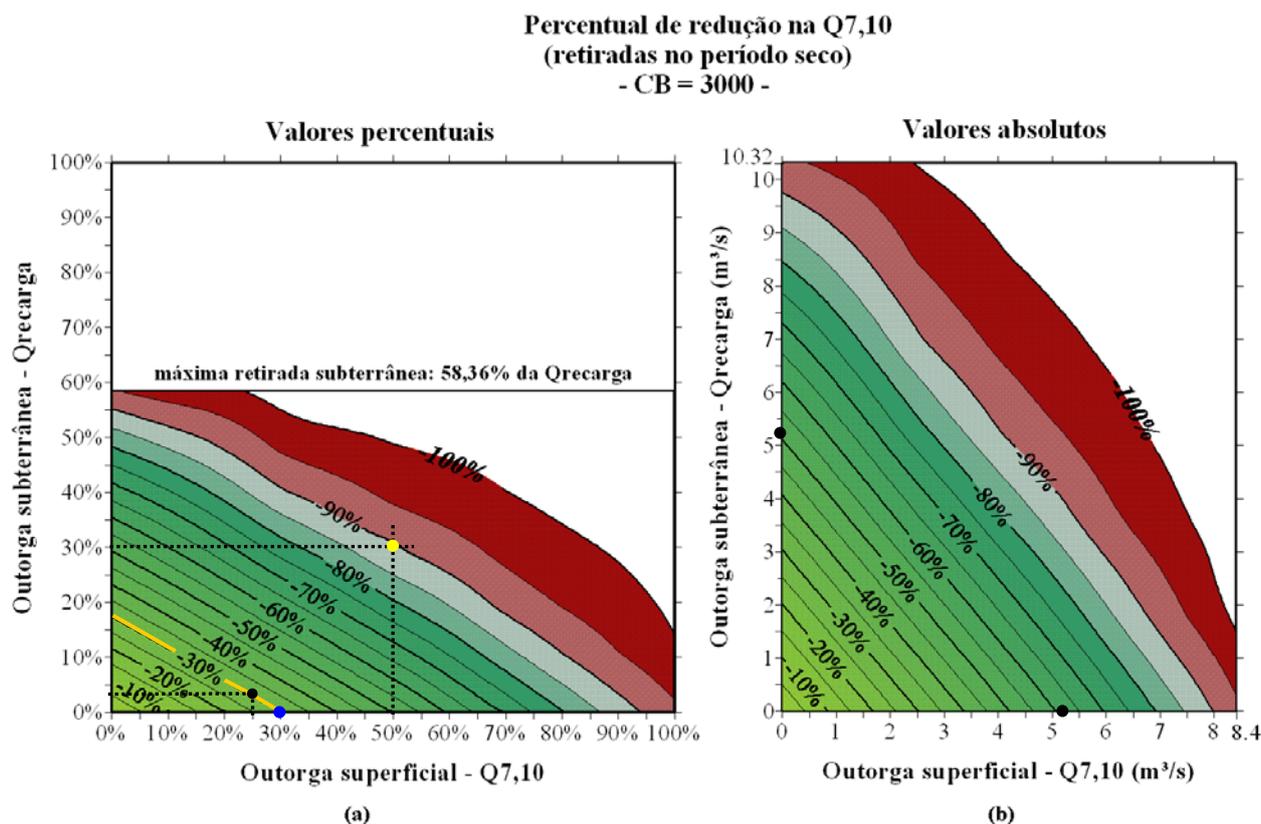


Figura 6.22: Curvas de outorga de uso integrado de água para a bacia do Alto Rio Paranaíba para retiradas no período seco (de abril à outubro).

As curvas na Figura 6.22 representam isolinhas de mesmo impacto para diferentes combinações percentuais de uso de água superficial e subterrânea na bacia. Ao longo dessas isolinhas, a redução na $Q_{7,10}$ é igual para as diferentes retiradas e a vazão total outorgável superficial e subterraneamente permanece mais ou menos constante. Nessa figura, pontos sobre os eixos horizontal ou vertical representam retiradas apenas de vazão superficial ou subterrânea, respectivamente.

A escala de cor em vermelho representa os percentuais a partir dos quais há vazões nulas no rio. Como se observa na Figura 6.22, o rio começa a secar a partir de impactos superiores a 90% de redução na $Q_{7,10}$. Assim, para quaisquer combinações de retirada de água

superficial e subterrânea acima da isolinha de 90%, o rio começa a apresentar vazões nulas para alguns dias do período simulado.

Na Figura 6.22a é indicado o limite a partir do qual todos os reservatórios subterrâneos no modelo secam, indicando o percentual máximo de retirada subterrânea possível de ser explorada na bacia (58,36% da Q_{recarga} , ou seja, até 10,32 m³/s) para retiradas apenas durante o período de estiagem. Nessa figura, o ponto em azul sobre o eixo horizontal indica o percentual máximo de retirada superficial legalmente outorgado na bacia do Alto Rio Paranaíba, que corresponde a 30% da $Q_{7,10}$. Nesse caso, a redução na vazão $Q_{7,10}$, ao final do período de aplicação, seria de aproximadamente 30% (ou seja, passaria de 8,40 m³/s para 5,88 m³/s), considerando apenas as retiradas superficiais. Entretanto, ao se levar em conta as retiradas subterrâneas, embora os usos subterrâneos outorgados atualmente ainda sejam insignificantes, os impactos gerados na $Q_{7,10}$ seriam maiores, o que evidencia a importância da consideração dos usos integrados dos recursos hídricos nas bacias para a definição de critérios de outorga.

Na mesma figura, a título de explicação, o ponto indicado em amarelo representa uma retirada superficial de 50% da $Q_{7,10}$ (50% de 8,40 m³/s, isto é, 4,20 m³/s) e uma retirada subterrânea de 30% da Q_{recarga} (30% de 17,69 m³/s, isto é, 5,31 m³/s). O efeito na $Q_{7,10}$ para esse caso, seria de uma redução em aproximadamente 90% do seu valor sem retiradas (ponto amarelo), ou seja, a $Q_{7,10}$ passaria a ser igual a 0,84 m³/s. Pela simulação no modelo desses percentuais de retirada, vazões no rio abaixo da $Q_{7,10}$ original passariam a ocorrer em 23% dos dias e o rio secaria por até 1 dia durante o período considerado.

Na Figura 6.22b, que mostra as curvas de impacto na $Q_{7,10}$ para os valores absolutos de vazões retiradas do rio e do aquífero, os pontos sobre os eixos horizontal e vertical representam retiradas superficiais e subterrâneas semelhantes de 5,31 m³/s, que corresponde a 30% da Q_{recarga} (igual a 17,69 m³/s) e a 63% da $Q_{7,10}$ (igual a 8,40 m³/s). Ao final do período de simulação, a extração dos 5,31 m³/s apenas do rio, reduz a $Q_{7,10}$ original em aproximadamente 63% (ou seja, passa de 8,40 m³/s para 3,11 m³/s), enquanto que a extração apenas de água subterrânea a reduz em cerca de 52% (ou seja, passa de 8,40 m³/s para 4,03 m³/s). Assim, mesmo para retiradas iguais, ao final do período de tempo simulado, o efeito das captações superficiais é maior sobre a vazão no rio do que das explorações subterrâneas, isso porque o efeito das retiradas subterrâneas é distribuído ao longo do tempo, mesmo sendo os usos concentrados no período de estiagem.

Um critério de aceitabilidade que poderia ser adotado para outorga de usos integrados de água na bacia seria aquele em que os percentuais combinados de retirada superficial e subterrânea continuassem a gerar o mesmo impacto que apenas a retirada superficial limite na

bacia provocaria nas vazões do rio, isto é, considerar como impacto máximo possível de ser aceito aquele gerado pelo uso de até 30% da $Q_{7,10}$ sem retiradas subterrâneas. Isso implica em procurar combinações de retiradas de água nas isolinhas de impacto representadas nas curvas da Figura 6.22a. Nessa figura, pode-se observar que para a retirada superficial de 30% da $Q_{7,10}$ a redução nessa vazão de referência seria de 30%. Por esse critério, quaisquer valores de combinações de uso de água superficial e subterrânea que gerassem no máximo 30% de redução na $Q_{7,10}$, ou seja, qualquer percentual combinado de uso sobre a isolinha de 30% (indicada na cor amarela na figura), seria aceitável do ponto de vista do impacto na vazão do rio.

Por esse critério, uma possibilidade aceitável de vazões a outorgar, indicada na Figura 6.22a pelo ponto de intercessão das linhas tracejadas, seria em permitir o uso de 25% da $Q_{7,10}$ para os usos superficiais, equivalente a $2,10 \text{ m}^3/\text{s}$, e 3,5% da Q_{recarga} para os usos subterrâneos, equivalente a $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$. Observa-se que por essa metodologia pode-se definir as prioridades das fontes de uso da água na bacia, ou seja, caminhando por essa isolinha quanto maior o percentual outorgado para uso superficial, menor o percentual para uso subterrâneo e vice-versa.

A Figura 6.23 mostra os efeitos dessas retiradas sobre o hidrograma no período de 01/01/2004 a 31/12/2005. Como se observa, os impactos das retiradas são maiores no período de recessão, praticamente não afetando as vazões no período chuvoso.

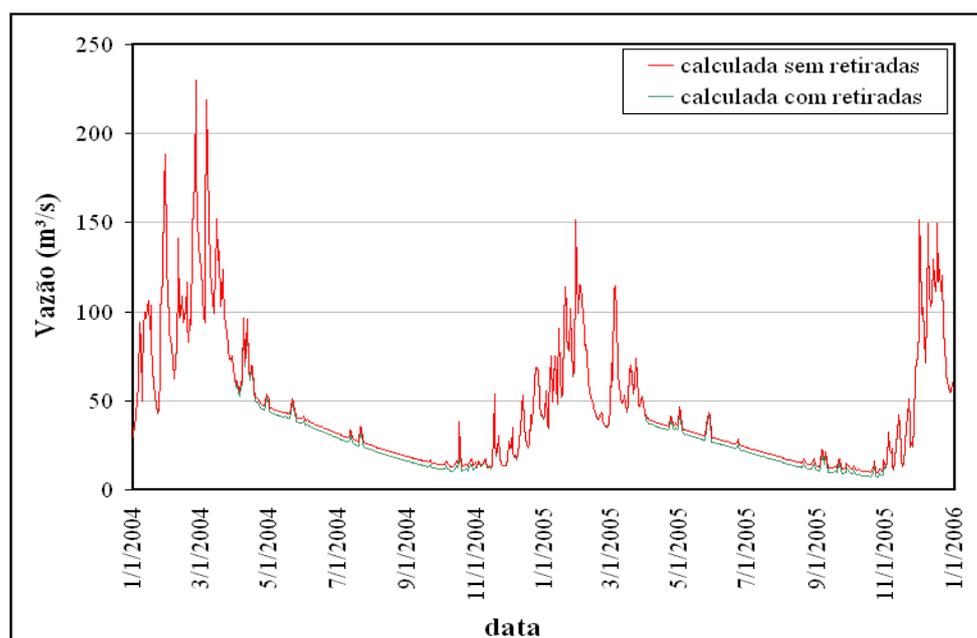


Figura 6.23: Hidrogramas calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da Q_{recarga} na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).

A Figura 6.24 mostra as vazões médias mensais calculadas sem e com as retiradas outorgadas para todo o período de aplicação (01/01/1988 a 31/12/2005). Como se verifica, o impacto das retiradas de água na média mensal é maior para os meses em que são feitas as extrações (abril a outubro), não havendo redução significativa na média mensal dos outros meses. Ao final do período de simulação, a vazão média do rio sofre uma redução de 18%, passando de 40,25 m³/s para 32,79 m³/s.

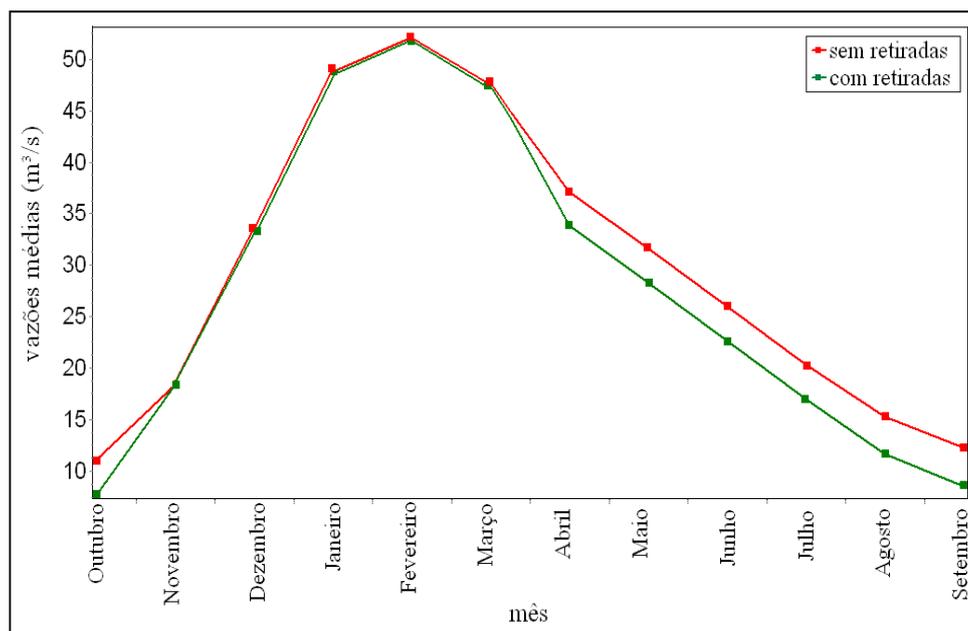


Figura 6.24: Vazões médias mensais calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).

Na Figura 6.25 são mostradas as médias anuais das vazões mínimas de 3 dias de duração no Alto Rio Paranaíba antes e após as retiradas de água. Como se observa, para todos os anos, a média das vazões mínimas de 3 dias diminuiu, representando uma redução média no período simulado de aproximadamente 9 m³/s sem as retiradas para aproximadamente 6 m³/s após as retiradas. Essa análise é importante no estudo do impacto na biota aquática da diminuição da água disponível no rio durante esse período.

A Figura 6.26 mostra as curvas de permanência calculadas sem e com as retiradas dos percentuais outorgáveis sugeridos. Quanto à vazão com 90% de permanência, observa-se uma redução de 20% em seu valor original, passando de 12,12 m³/s para 9,73 m³/s. Já para a vazão com 95% de permanência, essa redução é de 21% em relação a seu valor sem as retiradas, o que equivale a uma redução de 10,50 m³/s para 8,25 m³/s. Após as retiradas, vazões inferiores

a Q_{90} e Q_{95} antes das retiradas, que originalmente ocorreriam por 10% e 5% do tempo, passam a ocorrer por 18% e 12% do tempo, respectivamente.

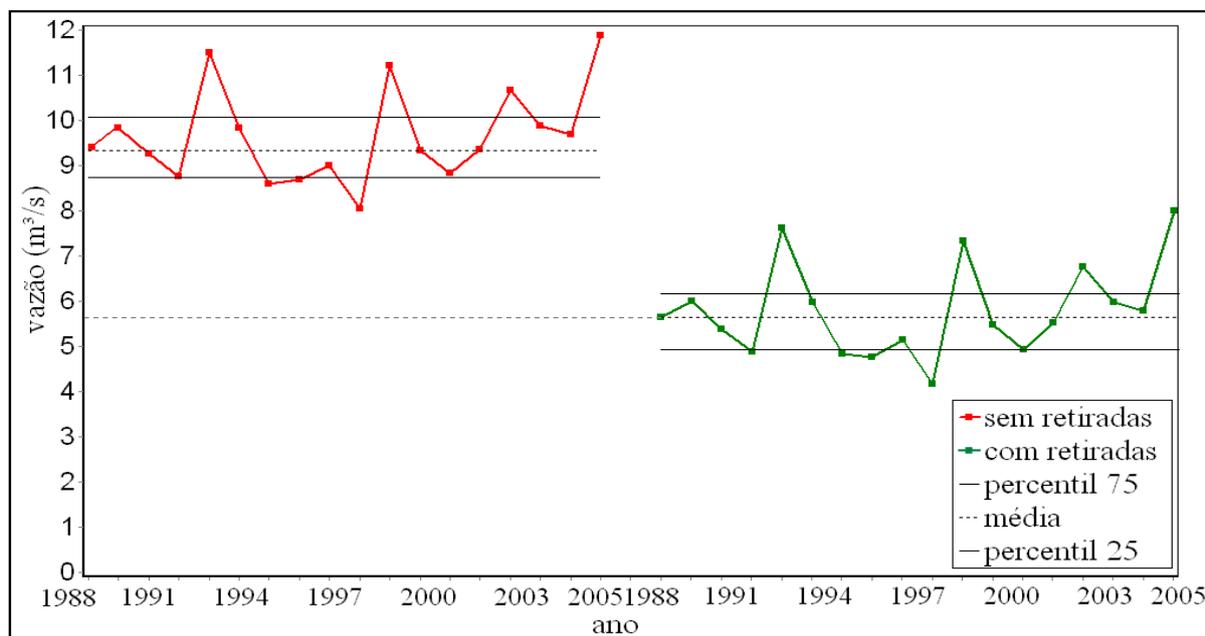


Figura 6.25: Médias anuais das vazões mínimas de 3 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).

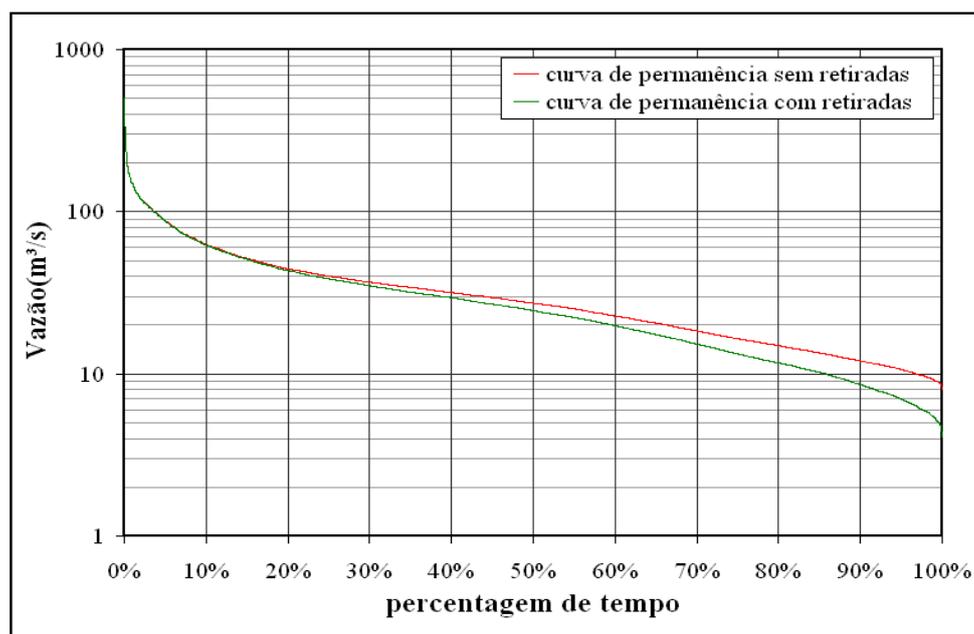


Figura 6.26: Curvas de permanência calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (abril à outubro).

Na Figura 6.27 são mostradas as curvas de frequência de vazões mínimas de 7 dias de duração calculadas sem e com as retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$. O valor da $Q_{7,10}$ da curva com retiradas é igual a 5,79 m³/s, que representa, como indicado na Figura 6.22a, uma redução em 30% com relação ao valor da $Q_{7,10}$ sem as retiradas, cujo valor é de 8,40 m³/s. O tempo de retorno da $Q_{7,10}$ sem as retiradas para o período simulado diminuiu de 10 para, aproximadamente, 1,71 ano e em 5% do tempo a vazão no rio é inferior a $Q_{7,10}$ original.

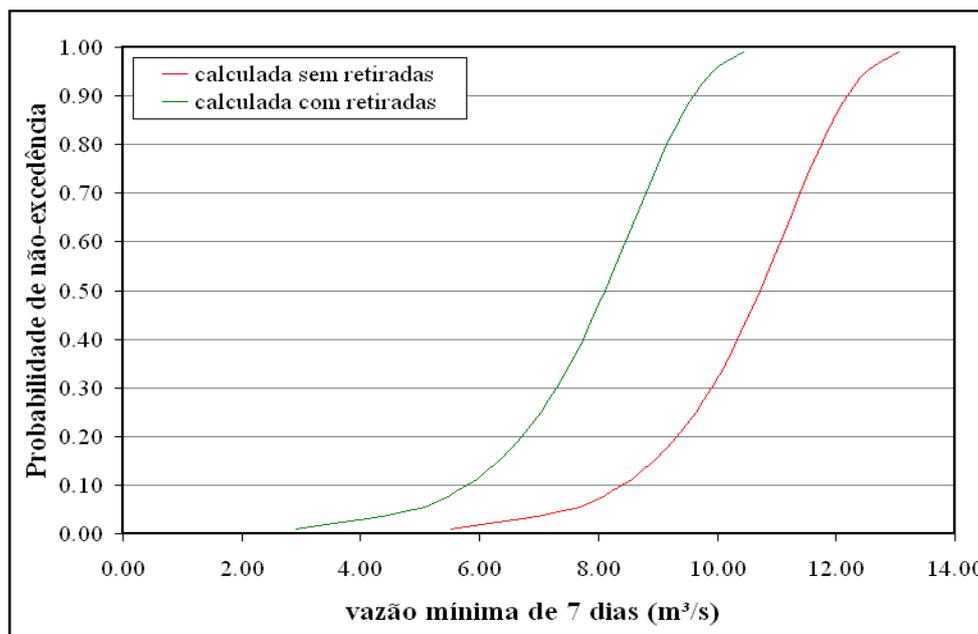


Figura 6.27: Curvas de frequência de vazões mínimas com duração de 7 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3,5% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Paranaíba (abril à outubro).

O critério de outorga integrada sugerido, retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ para uso superficial e 3,5% da $Q_{recarga}$ para uso subterrâneo, implica em uma redução da disponibilidade hídrica para uso superficial em 5%, em relação ao limite para outorga estabelecido no Estado de Minas Gerais, que é de até 30% da $Q_{7,10}$ para uso superficial dos recursos hídricos. Além disso, como discutido no item 6.2, os usos superficiais atualmente outorgados na bacia já ultrapassam em 57% esse limite. Como alternativa para solucionar tal problema, poderia ser avaliado se o efeito sobre a vazão no rio do uso de até 30% da $Q_{7,10}$, nível de impacto aceitável segundo o critério sugerido, seria realmente lesivo à preservação e integridade do ecossistema fluvial. Caso não o fosse, esse limite de uso poderia estar sendo restritivo, o que levaria a se aceitar um percentual de impacto maior e, conseqüentemente, uma maior disponibilidade de uso para captação de água superficial na bacia.

ii) Retiradas durante todo o ano

As curvas de outorga integrada para usos contínuos durante todo o ano, resultantes da simulação de combinações de retiradas de água superficial e subterrânea na bacia do Alto Rio Paranaíba, conforme Figura 6.21, são mostradas na Figura 6.28. Em 6.28a são mostrados os impactos em valores percentuais, enquanto que em 6.28b são mostrados os impactos para valores absolutos das vazões extraídas na bacia.

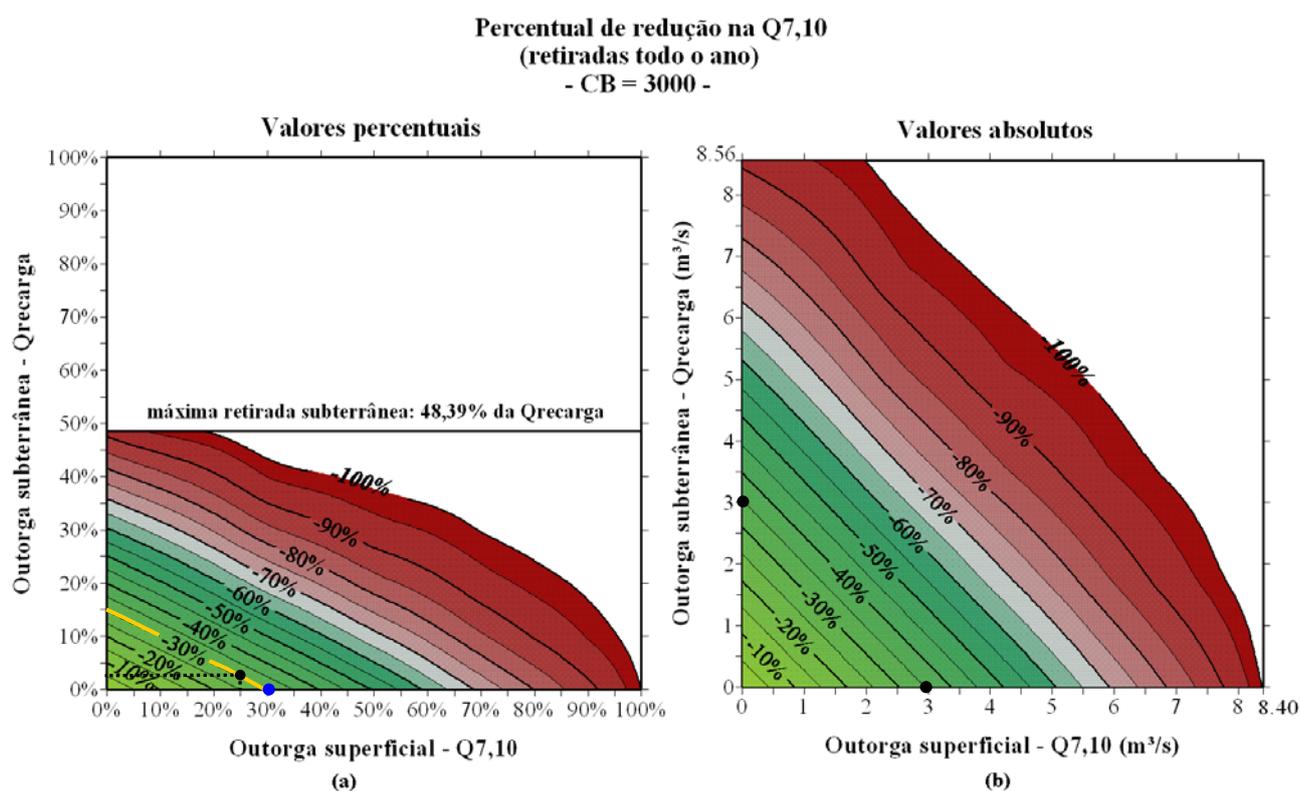


Figura 6.28: Curvas de outorga integrada para a bacia do Alto Rio Paranaíba para retiradas de água durante todo o ano.

Na Figura 6.28a, é representado o limite a partir do qual os reservatórios subterrâneos no modelo secam, indicando o percentual máximo de retirada subterrânea possível de ser explorada na bacia, que é de 48,39% da $Q_{recarga}$, ou seja, até 8,56 m^3/s , valor aproximadamente 10% menor que a capacidade máxima de exploração para retiradas concentradas apenas na estiagem.

Na Figura 6.28b, é possível perceber que, para o tempo de simulação de 18 anos, retiradas iguais de água superficial e subterrânea contínuas durante todo o ano provocam praticamente o mesmo impacto sobre a $Q_{7,10}$. Por exemplo, considerando retiradas superficiais e subterrâneas semelhantes de 3,00 m^3/s , pontos sobre os eixos horizontal e vertical nessa figura, a $Q_{7,10}$ original é reduzida em aproximadamente 35% (ou seja, passa de 8,40 m^3/s para 5,46 m^3/s) tanto para a retirada superficial quanto a subterrânea.

Para o mesmo critério de aceitabilidade de outorga de usos integrados de água na bacia sugerido no item anterior, isto é, considerando como impacto máximo possível de ser aceito aquele gerado pelo uso de até 30% da $Q_{7,10}$ sem retiradas subterrâneas, pode-se observar na Figura 6.28a que o efeito de redução na $Q_{7,10}$ original seria de 30%. Quaisquer valores de combinações de uso que gerassem no máximo essa redução seriam aceitáveis do ponto de vista do impacto na vazão do rio.

Uma possibilidade de combinação de uso, indicado pela interseção das linhas tracejadas sobre a isolinha de 30% de impacto na Figura 6.28a, seria utilizar 25% da $Q_{7,10}$ para outorga dos usos superficiais, equivalente a $2,10 \text{ m}^3/\text{s}$, e 3% da Q_{recarga} para outorga dos usos subterrâneos, equivalente a $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ – assim, a disponibilidade total (superficial e subterrânea) possível de outorgar seria menor que para retiradas apenas no período seco.

A Figura 6.29 mostra os efeitos dessas retiradas sobre o hidrograma no período de 01/01/2004 a 31/12/2005. Como se observa, os impactos das retiradas continuam sendo maiores no período de recessão, mas nesse caso já aparecem efeitos sobre as vazões no período chuvoso. Isso é possível de ser verificado na Figura 6.30, que mostra as vazões médias mensais calculadas sem e com essas retiradas para todo o período de aplicação (01/01/1988 a 31/12/2005). Nessa figura há redução nas vazões médias inclusive dos meses mais chuvosos. Ao final do período de simulação, a vazão média do rio sofre uma redução de 21%, passando de $40,25 \text{ m}^3/\text{s}$ para $31,76 \text{ m}^3/\text{s}$.

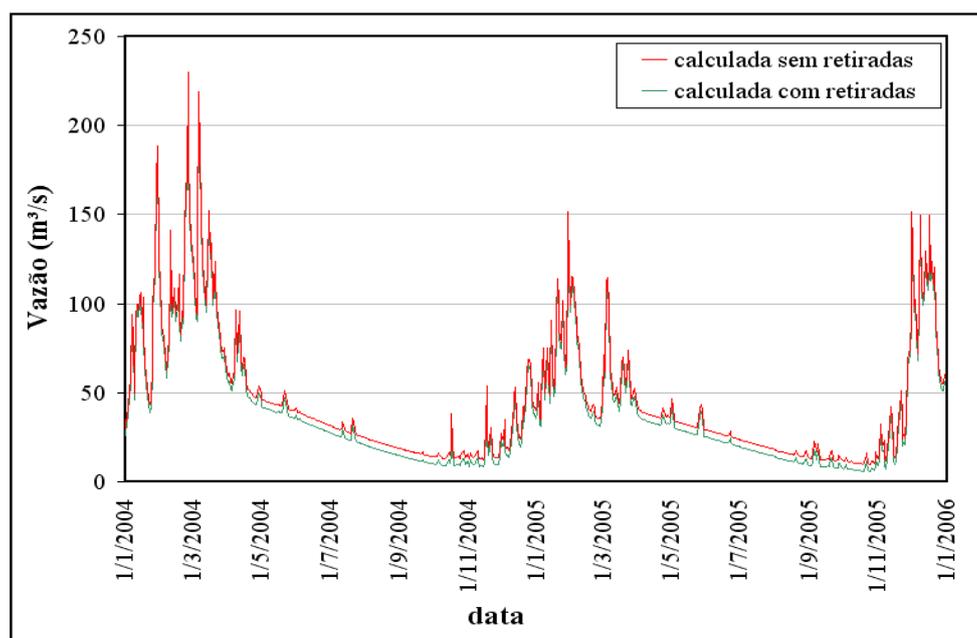


Figura 6.29: Hidrogramas calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da Q_{recarga} na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).

Na Figura 6.31 são mostradas as médias anuais das vazões mínimas de 3 dias de duração antes e após as retiradas de água contínuas durante o ano. Como se observa, para todos os anos, a média das vazões mínimas de 3 dias diminui, representando uma redução média no período simulado de aproximadamente $9 \text{ m}^3/\text{s}$ sem as retiradas para aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$ após as retiradas.

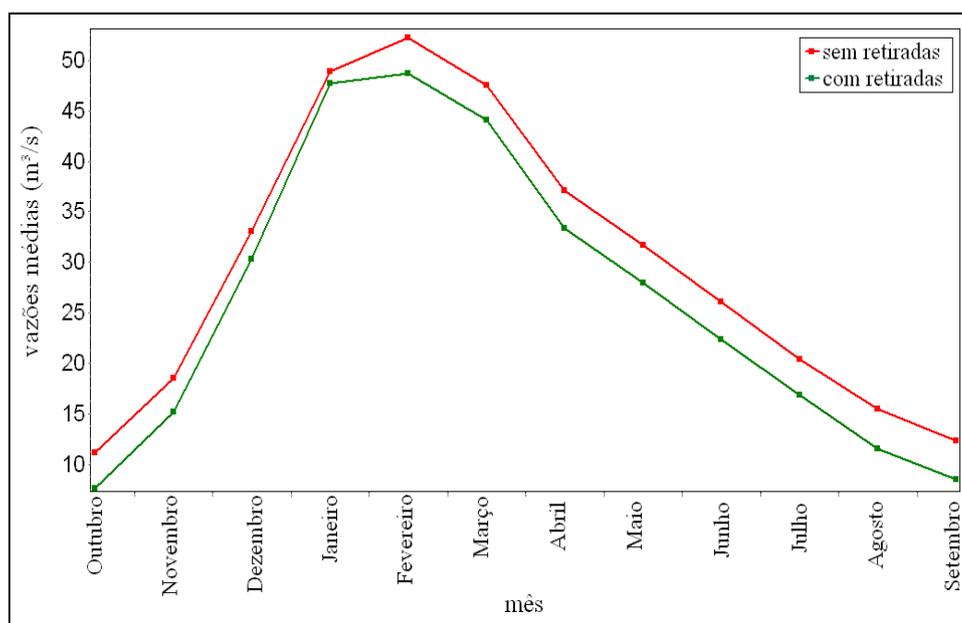


Figura 6.30: Vazões médias mensais calculados sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).

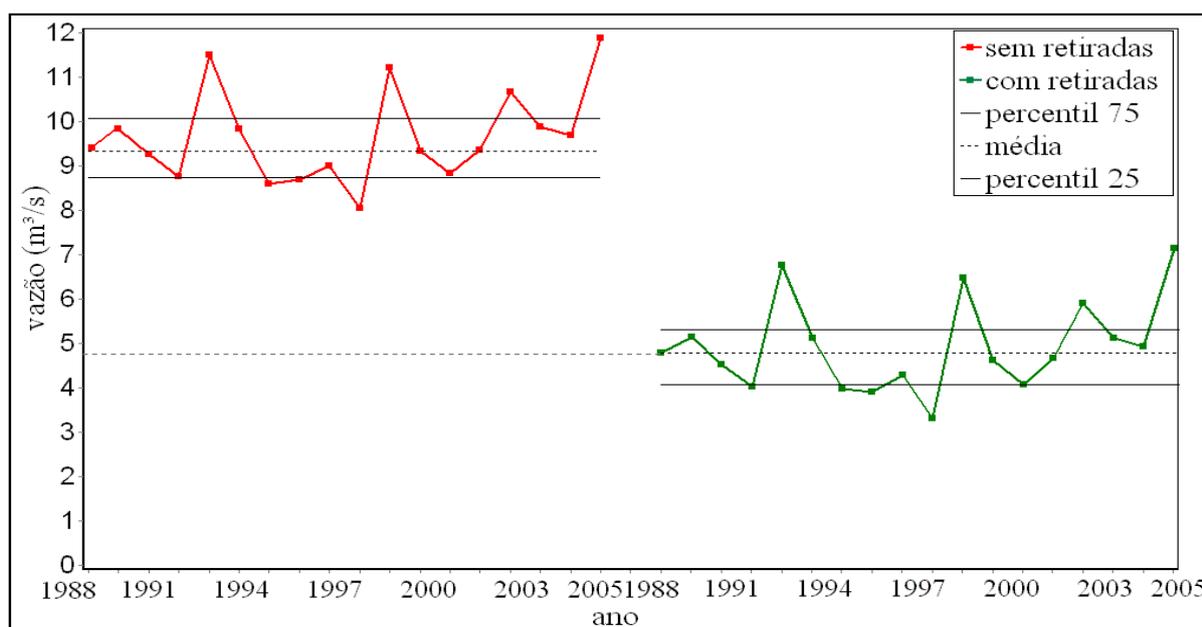


Figura 6.31: Médias anuais das vazões mínimas de 3 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).

A Figura 6.32 mostra as curvas de permanência calculadas sem e com as retiradas dos percentuais outorgáveis sugeridos: 25% da $Q_{7,10}$ para outorga superficial e 3% da $Q_{recarga}$ para outorga subterrânea. Nesse caso, a Q_{90} é reduzida em 23% em relação a seu valor original, passando de 12,12 m^3/s para 9,38 m^3/s . Já na Q_{95} , essa redução é de 24% em relação a seu valor sem as retiradas, o que equivale a uma redução de 10,50 m^3/s para 8,02 m^3/s . Com essas retiradas, vazões inferiores a Q_{90} e Q_{95} antes das retiradas, que originalmente ocorreriam por 10% e 5% do tempo, passam a ocorrer por 22% e 16% do tempo, respectivamente.

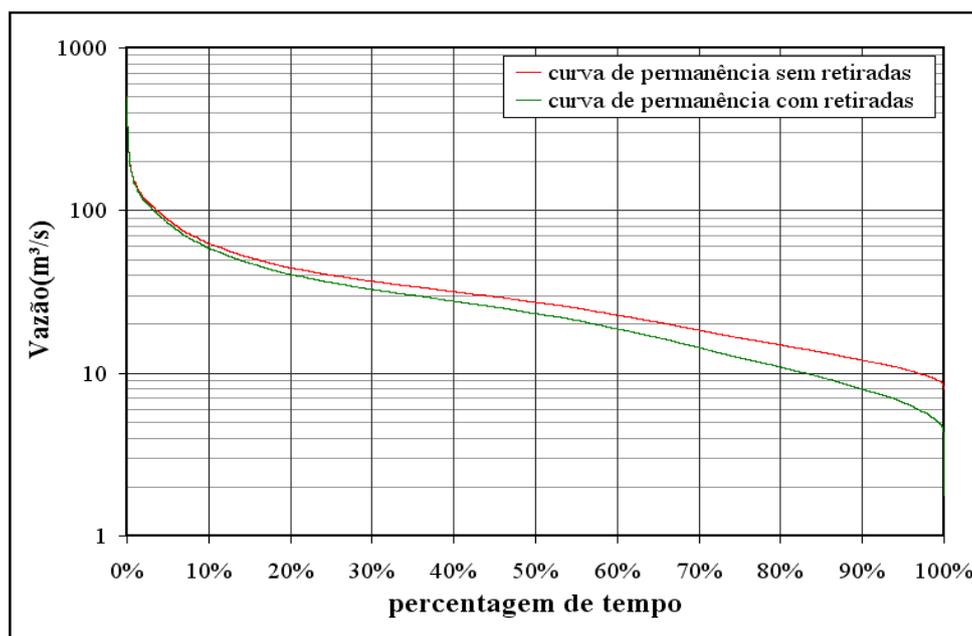


Figura 6.32: Curvas de permanência calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).

A Figura 6.33 mostra as curvas de frequência de vazões mínimas de 7 dias de duração com e sem as retiradas de água para o percentual de outorga integrada de 25% da $Q_{7,10}$ para outorga superficial e 3% da $Q_{recarga}$ para outorga subterrânea. Após as retiradas desses percentuais, a vazão de referência $Q_{7,10}$ é reduzida para 5,79 m^3/s , representando, portanto, uma redução em 30% com relação ao seu valor sem as retiradas (igual a 8,40 m^3/s), como indicado nas curvas de outorga integrada, mostradas na Figura 6.28. O tempo de retorno da vazão $Q_{7,10}$ anterior às retiradas é reduzido para cerca de 1,71 ano, sendo que por 6% do período de 18 anos de simulação, a vazão no rio fica abaixo da $Q_{7,10}$ original.

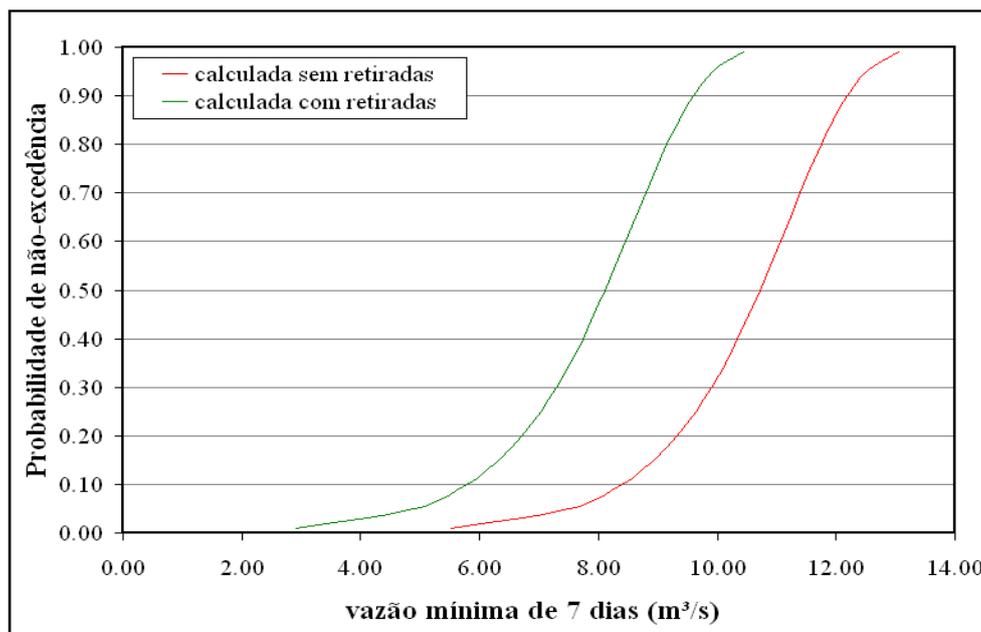


Figura 6.33: Curvas de frequência de vazões mínimas com duração de 7 dias calculadas sem e com retiradas de 25% da $Q_{7,10}$ e 3% da $Q_{recarga}$ na bacia do Alto Rio Paranaíba (todo o ano).

6.4.2. - Generalização das curvas de outorga integrada

A generalização das curvas de outorga integrada, a partir do modelo ajustado à bacia do Alto Rio Paranaíba, é proposta pela simulação de cenários hipotéticos que reproduzem diferentes combinações de percentuais de retirada de água superficial e subterrânea para três diferentes valores do parâmetro CB : iguais a 800 horas, a 3.000 horas e a 15.000 horas, que representam valores característicos de esvaziamento do reservatório subterrâneo no modelo para bacias com baixa, média e alta regularização subterrânea, respectivamente. As simulações foram feitas combinando percentuais de retiradas contínuas de água superficial e subterrânea durante o período de estiagem na bacia (de abril a outubro).

Os percentuais de retiradas superficiais e subterrâneas simulados correspondem aos mesmos utilizados na elaboração das curvas de outorga integrada para a bacia do Alto Rio Paranaíba: 0%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% e 100%, para as retiradas superficiais; e de 0% ao percentual máximo possível de retiradas do reservatório subterrâneo, para as explorações do aquífero.

Na Figura 6.34 é apresentado um quadro ilustrativo dos cenários hipotéticos simulados. Para cada um dos valores do parâmetro CB , foram simuladas combinações de retiradas superficiais e subterrâneas de água entre os percentuais indicados na figura. As

curvas de outorga integrada, analogamente às curvas para o Alto Rio Paranaíba, foram elaboradas pela interpolação desses percentuais simulados, como explicado no Anexo G.

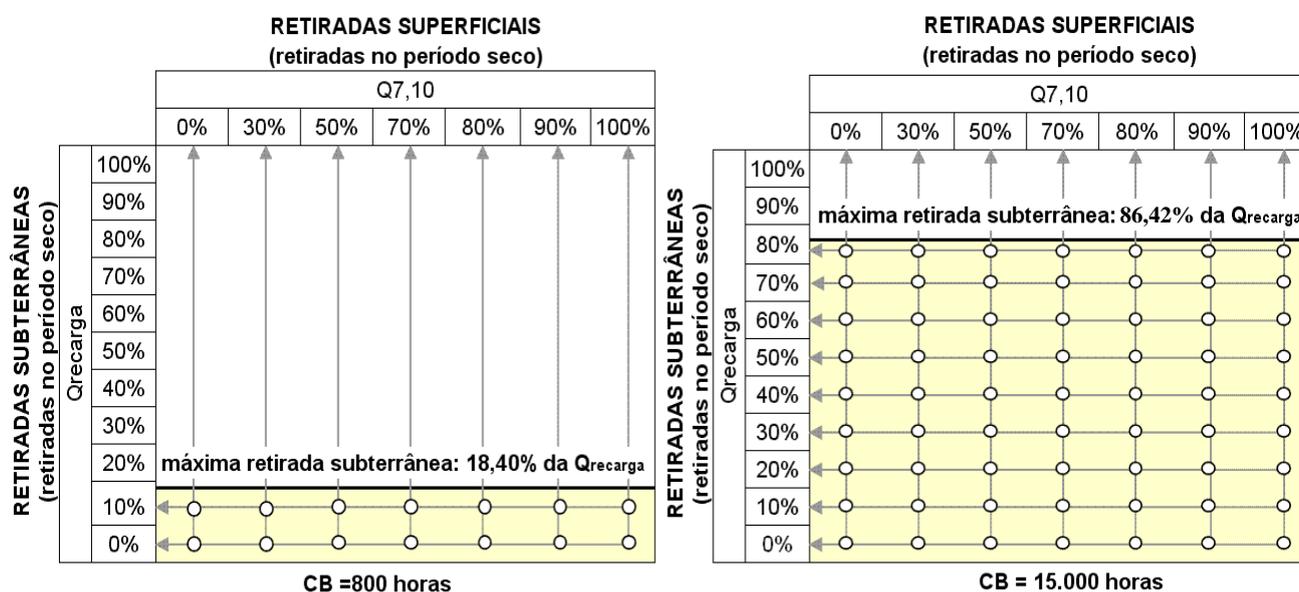


Figura 6.34: Cenários hipotéticos simulados para dois dos valores do parâmetro CB .

Da mesma forma que na Figura 6.21 (para o $CB = 3.000$ horas), as linhas em destaque na Figura 6.34 indicam o percentual de retirada subterrânea a partir do qual os reservatórios subterrâneos no modelo secam. Como se observa, quanto maior a capacidade de armazenamento do aquífero (maior valor do parâmetro CB), maior o percentual da recarga subterrânea possível de ser retirada da bacia. Pela simulação no modelo hidrológico, a máxima capacidade de retirada de água subterrânea para bacias com baixa regularização ($CB = 800$ horas) seria de cerca de 18% da recarga estimada; e para bacias com alta regularização subterrânea ($CB = 15.000$ horas) seria de cerca de 86% da recarga estimada. Em todos os casos (bacias com baixa, média e alta regularização subterrânea), no entanto, os reservatórios subterrâneos secam antes que 100% da recarga sejam explorados.

Os três valores do parâmetro CB (iguais a 800, 3.000 e 15.000 horas) estão relacionados à velocidade de esvaziamento do reservatório subterrâneo no modelo e, conseqüentemente, à forma do hidrograma de saída por ele gerado, o qual se assemelha, conforme o valor desse parâmetro, aos hidrogramas mostrados na Figura 5.7 para os rios Grande, Paranaíba e Braço Sul. Por esse motivo, as vazões de referência para cada valor do parâmetro CB são diferentes: quanto maior o valor do CB , maior o valor da vazão de recarga estimada e, por conseguinte, da regularização subterrânea no rio, alterando os valores das demais vazões de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}). Na Tabela 6.15 são mostrados os valores das

vazões de referência determinadas por simulação no modelo para os diferentes valores do parâmetro CB .

Tabela 6.15: Vazões de referência para os diferentes CB .

Vazão	$CB=800$ horas	$CB=3.000$ horas	$CB=15.000$ horas
$Q_{\text{média}}$ (m^3/s)	41,52	40,05	39,56
Q_{90} (m^3/s)	2,09	12,12	19,54
Q_{50} (m^3/s)	23,22	27,45	24,68
Q_{recarga} (m^3/s)	3,74	17,69	31,33
Q_{95} (m^3/s)	0,97	10,50	18,59
$Q_{7,10}$ (m^3/s)	0,47	8,40	17,19
Q_{50}/Q_{90} (%)	9,00	44,17	79,19

Os procedimentos para aplicação das curvas de outorga integrada generalizadas para outras bacias consistem em:

- 1° calcular o valor do parâmetro CB , dado pela Equação 5.17, a partir de recessões verificadas na série de vazões observadas na bacia de interesse;
- 2° escolher dentre as curvas de outorga integrada simuladas, apresentadas a seguir, qual delas melhor se ajusta ao CB calculado: as curvas de $CB = 800$ horas, $CB = 3.000$ horas ou $CB = 15.000$ horas;
- 3° calcular as curvas de permanência ou de frequências de vazões mínimas, e determinar a vazão de referência a ser utilizada na bacia;
- 4° estimar a vazão de recarga do aquífero pelo índice Q_{90}/Q_{50} multiplicado pela vazão média de longo período no rio, dado pela Equação 5.31;
- 5° utilizar a curva de outorga integrada escolhida para avaliar quais os percentuais de usos combinados de água superficial e subterrânea são aceitáveis do ponto de vista dos efeitos de redução na vazão mínima de referência no rio.

A seguir, são apresentadas as curvas de outorga integrada para os valores do parâmetro CB iguais a 800 horas (que seria representativo de bacias com baixa regularização subterrânea) e a 15.000 horas (que seria representativo de bacias com alta regularização subterrânea). Os resultados dos efeitos das vazões retiradas, superficial e subterraneamente, para cada uma dessas curvas são apresentados nas tabelas mostradas no Anexo G. Para bacias com média regularização subterrânea ($CB = 3.000$ horas), a curva a ser utilizada seria aquela mostrada na Figura 6.22.

Curvas para bacias com baixa regularização subterrânea ($CB = 800$ horas)

A Figura 6.35 mostra as curvas dos efeitos sobre a $Q_{7,10}$ das combinações de retiradas de água superficial e subterrânea, durante o período de estiagem (abril a outubro), para bacias com baixa regularização subterrânea. A Figura 6.35a mostra os impactos em percentagem de retirada, enquanto a Figura 6.35b mostra os impactos simulados no modelo em valor absoluto da vazão retirada superficial e subterraneamente. A maneira como essas curvas devem ser interpretadas são idênticas às análises com as curvas mostradas na Figura 6.22.

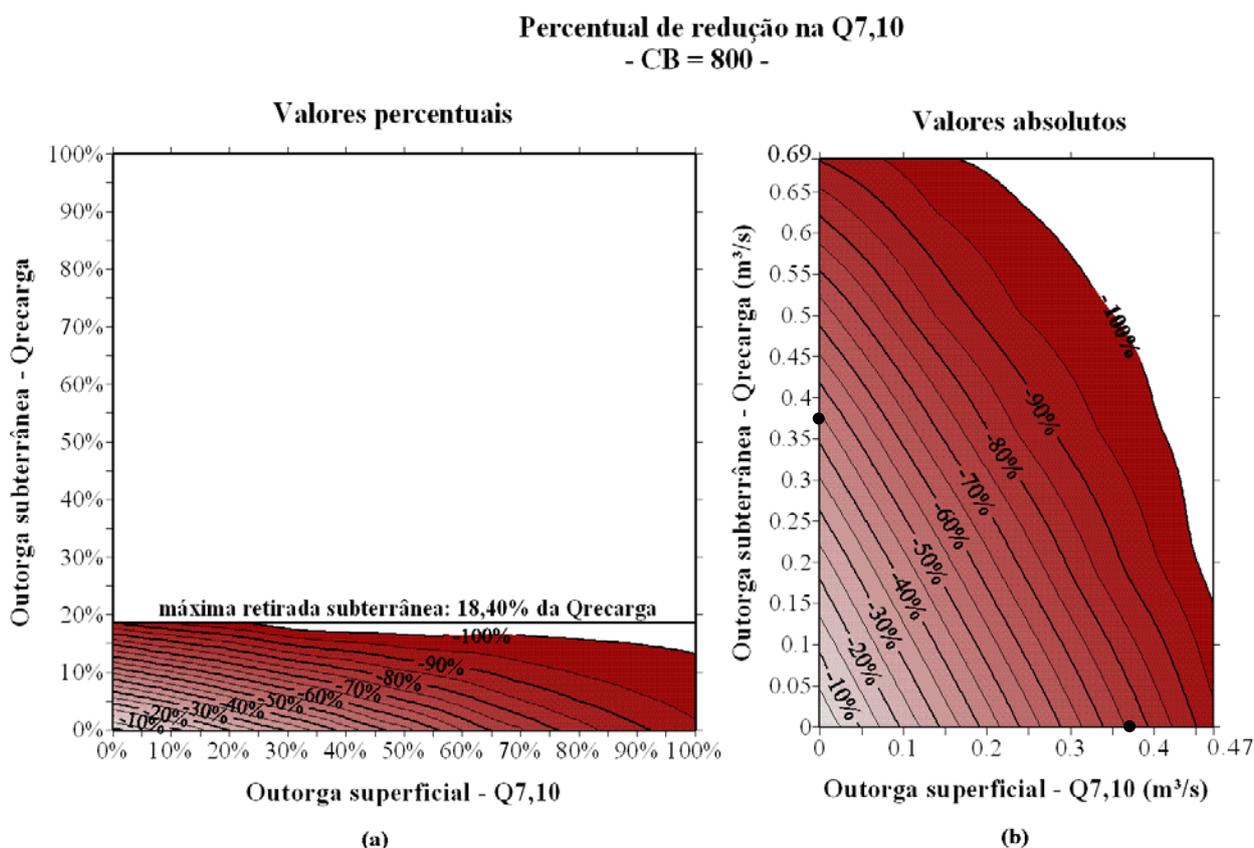


Figura 6.35: Curvas de impacto na $Q_{7,10}$ das retiradas de água em bacias com $CB = 800$ horas.

Ao simular a bacia do Alto Rio Paranaíba com um $CB=800$ horas, que não é representativo dessa bacia, supõe-se que a regularização subterrânea no rio é menor que a real, e por isso, o rio seca mesmo para pequenas retiradas de água, o que talvez não acontecesse na simulação de uma bacia com valor característico desse parâmetro aproximadamente igual a 800 horas. No entanto, as curvas mostradas na Figura 6.35 continuam sendo representativas dessas bacias, já que a forma das curvas está relacionada à

capacidade de regularização do reservatório subterrâneo e, conseqüentemente, ao valor do parâmetro CB .

Para esse cenário, as simulações mostraram que a capacidade máxima de retirada de água subterrânea na macro-escala da bacia seria de 18,40% da vazão de recarga (ou seja, 18,40% de 3,74 m³/s, que equivale a 0,69 m³/s). Essa vazão representa uma disponibilidade de água subterrânea em bacias com baixa regularização subterrânea cerca de 15 vezes menor do que a disponibilidade em uma bacia com média regularização do aquífero, cuja máxima capacidade de retirada subterrânea é de 58,36% para explorações contínuas durante o período de estiagem, conforme mostrado na Figura 6.22.

Na Figura 6.35b, são mostrados valores de vazões retiradas superficial e subterraneamente em m³/s. Os dois pontos nessa figura representam retiradas iguais de 0,37 m³/s do rio e do aquífero, o que corresponde a 10% da $Q_{recarga}$ (igual a 3,74 m³/s) e a 79% da $Q_{7,10}$ (igual a 0,47 m³/s). Para as mesmas retiradas de 0,37 m³/s, ao final do período de simulação de 18 anos, a extração de água direto do rio reduz a $Q_{7,10}$ original em aproximadamente 76% (ou seja, passa de 0,47 m³/s para 0,11 m³/s), e para a extração de água direto do aquífero, a $Q_{7,10}$ original sofre redução de aproximadamente 50% (ou seja, passa de 0,47 m³/s para 0,23 m³/s).

Curvas para bacias com alta regularização subterrânea ($CB = 15.000$ horas)

A Figura 6.36 mostra as curvas dos efeitos sobre a $Q_{7,10}$ das combinações de retiradas de água superficial e subterrânea, durante o período de estiagem (abril a outubro), para bacias com alta regularização subterrânea, cujos valores das vazões de referência simulados são mostrados na Tabela 6.18. Na Figura 6.36a, são apresentados os impactos em percentagem de retirada de água superficial e subterrânea na bacia, enquanto a Figura 6.36b mostra os impactos simulados no modelo para os valores absolutos das vazões extraídas da bacia.

A maneira como essas curvas devem ser interpretadas são idênticas às análises com as curvas anteriores. É importante destacar que, nesse caso, como a capacidade de armazenamento de água no reservatório subterrâneo é maior, a disponibilidade de água para retirada subterrânea também é maior. Isso se verifica nas curvas na Figura 6.36a, nas quais vazões nulas no rio começam a aparecer para impactos acima da isolinha de 90% de redução da $Q_{7,10}$ original. Nesse caso, o máximo percentual de água possível de ser explorada do aquífero é bastante elevado, igual a 86,42% da $Q_{recarga}$, que corresponde a uma vazão de 27,07 m³/s.

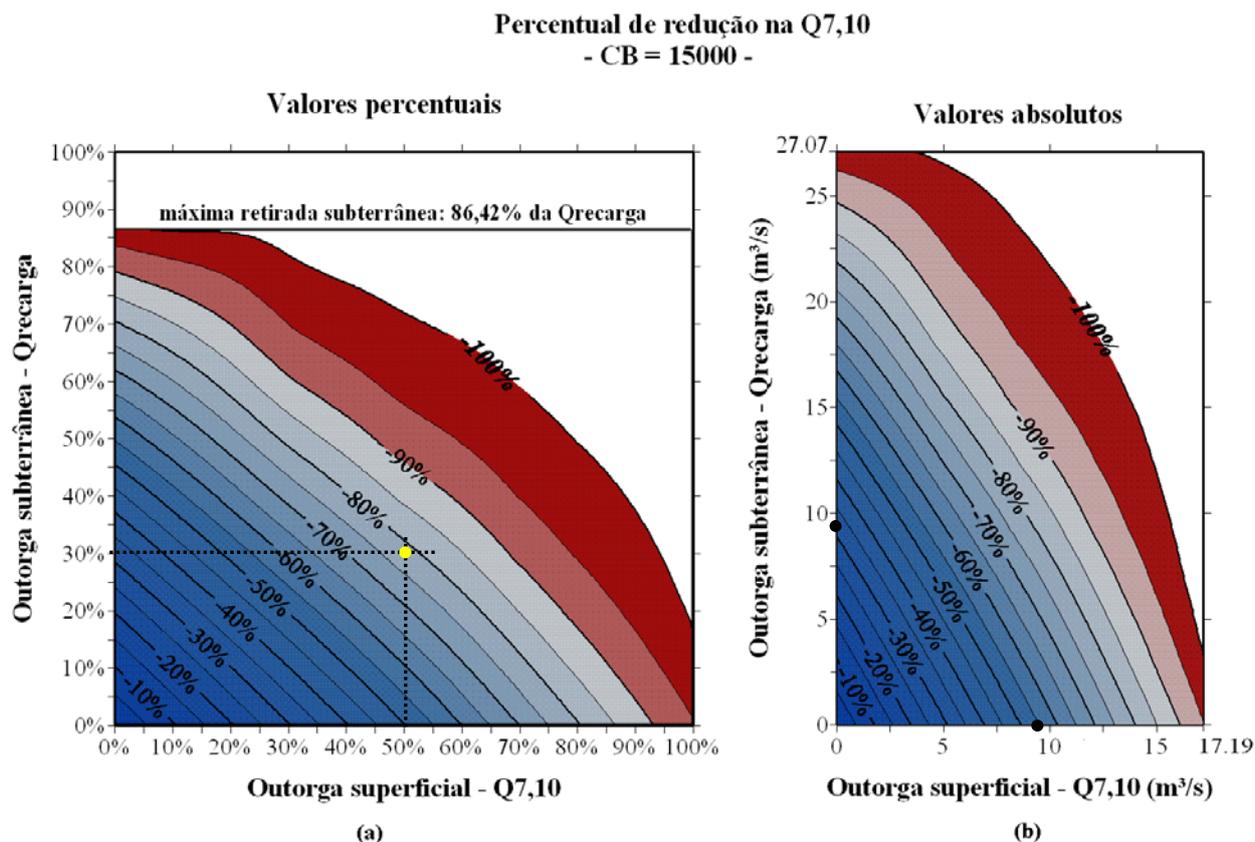


Figura 6.36: Curvas de impacto na $Q_{7,10}$ das retiradas de água em bacias com CB = 15.000.

Na Figura 6.36a, o ponto indicado em amarelo representa uma retirada superficial de 50% da $Q_{7,10}$ (50% de 17,19 m^3/s , isto é, 8,59 m^3/s) e uma retirada subterrânea de 30% da $Q_{recarga}$ (30% de 31,33 m^3/s , isto é, 9,40 m^3/s). O efeito na $Q_{7,10}$ original para esse caso, seria uma redução em, aproximadamente, 78% do seu valor original (ponto amarelo), ou seja, a $Q_{7,10}$ passaria a ser igual a 3,78 m^3/s . Esse impacto é menor que o efeito do mesmo percentual de retirada aplicado para bacias com média regularização subterrânea, nas quais o uso de 50% da $Q_{7,10}$ (nesse caso, 50% de 8,40 m^3/s , isto é, 4,20 m^3/s) e 30% da $Q_{recarga}$ (nesse caso, 30% de 17,69 m^3/s , isto é, 5,31 m^3/s) geram uma redução de 90% na $Q_{7,10}$, como mostrado na Figura 6.22. Nesse caso, o percentual de retirada não gera vazões nulas no rio, ao contrário das retiradas para bacias com $CB = 3.000$ horas, considerando retiradas contínuas apenas no período de estiagem; e, além disso, a disponibilidade total de água (superficial mais subterrânea, igual a 17,99 m^3/s) outorgável na bacia é cerca de 89% maior que a disponibilidade total de água em bacias com média regularização subterrânea (igual a 9,51 m^3/s).

A Figura 6.36b mostra as curvas de impacto na $Q_{7,10}$ para os valores absolutos de vazões retiradas do rio e do aquífero. Nessas curvas, os pontos sobre os eixos horizontal e

vertical representam retiradas superficiais e subterrâneas iguais de 9,40 m³/s, a qual corresponde a 30% da Q_{recarga} (igual a 31,33 m³/s) e a 55% da $Q_{7,10}$ (igual a 17,19 m³/s). Ao final do período de simulação de 18 anos, a extração de água superficial reduz a $Q_{7,10}$ original em aproximadamente 55% (ou seja, passa de 17,19 m³/s para 7,82 m³/s), enquanto que a extração direta do aquífero a reduz em cerca de 31% (ou seja, passa de 17,19 m³/s para 11,80 m³/s).

As curvas de outorga integrada para os três tipos de regularização subterrânea: alta, média e baixa, sintetizam resultados coerentes do prognóstico dos efeitos que retiradas conjuntas de água superficial e subterrânea podem gerar sobre o escoamento fluvial na escala da bacia hidrográfica, podendo ser empregadas para uma a estimativa dos critérios de outorga integrada dos recursos hídricos em diferentes bacias brasileiras.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 - CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo dessa pesquisa foi o desenvolvimento de uma metodologia que permitisse definir alternativas de critérios de outorga considerando o uso integrado dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na escala da bacia hidrográfica.

A avaliação do efeito do uso da água sobre o escoamento do rio foi feita a partir de simulações de retiradas de água superficiais e subterrâneas na bacia por meio do modelo hidrológico chuva-vazão MGB-IPH. Os resultados mostraram que a retirada de água subterrânea tem impacto na disponibilidade de água superficial.

Devido à velocidade do escoamento subterrâneo ser bem menor que a do escoamento superficial, o tempo de resposta das retiradas de água subterrânea sobre a vazão no rio é mais lento que o das retiradas superficiais, que é imediato. As simulações mostraram que não é possível explorar toda a recarga de um aquífero, demonstrado no modelo pelo secamento dos reservatórios subterrâneos antes que 100% da recarga estimada fosse retirada, isso porque, no balanço hídrico subterrâneo, uma parcela de água é drenada para o rio. Esse resultado mostra que a prática comum em se permitir para uso subterrâneo da água em uma bacia hidrográfica até 100% da recarga como critério de exploração segura, poderá modificar o balanço de água no aquífero, vindo a provocar sua depleção e a redução da descarga subterrânea nas vazões de base dos rios.

Visando a generalização do método proposto, foram criadas curvas de outorga para definição de usos conjuntos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos para bacias com baixa, média e alta regularização subterrânea, baseando-se em diferentes valores do parâmetro *CB* do modelo hidrológico. Esse parâmetro está relacionado à velocidade de esvaziamento do reservatório subterrâneo e representa o termo de interação entre o aquífero e o rio no modelo hidrológico.

Os resultados da metodologia aplicada mostraram que:

- 1 – Considerando retiradas constantes durante todo o ano, em longo período, o impacto das retiradas subterrâneas é praticamente o mesmo que o de retiradas superficiais;
- 2 – Considerando retiradas constantes concentradas apenas no período seco, o impacto das retiradas subterrâneas é praticamente o mesmo que o impacto das

retiradas superficiais em rios com pequena contribuição subterrânea e é menos severo que o impacto das retiradas superficiais em rios com grande contribuição subterrânea.

A metodologia proposta se mostrou adequada como uma alternativa de se realizar o gerenciamento integrado dos usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na macro-escala, considerando a influência desses usos sobre o escoamento dos rios com base em critérios simplificados por meio de séries de vazões, usualmente disponíveis nas bacias hidrográficas. A pesquisa não exclui, entretanto, a necessidade de estudos que forneçam maiores informações sobre a hidrogeologia dos aquíferos e suas interações locais com os corpos hídricos superficiais. Além disso, o método permite definir apenas o quanto de água pode ser retirado da bacia como um todo, sendo indispensável a avaliação local da capacidade de extração de água, principalmente das explorações subterrâneas, devido à grande variabilidade e heterogeneidade das características dos aquíferos.

Sobre o uso do MGB-IPH para representação das retiradas de água.

As alterações feitas no MGB para permitir a representação das retiradas de água possibilitam que os pontos de uso dos recursos hídricos sejam representados nas células do modelo em correspondência com suas localizações geográficas. A principal vantagem dessa representação é de possibilitar a avaliação dos efeitos das retiradas em diferentes pontos do rio.

A retirada de água superficial no momento da propagação na rede de drenagem no modelo foi representativa do processo de retirada de água na situação real, isto é, da captação direta de água no rio. O mesmo foi válido para as retiradas de água subterrânea que, ao serem concentradas nos reservatórios subterrâneos das células do modelo, correspondem a uma aproximação mais adequada da representação das explorações reais no aquífero. Além disso, pela capacidade do modelo em representar o retardo de tempo natural de resposta do aquífero às retiradas, inclusive para diferentes características de armazenamento subterrâneo (dados os diferentes valores do parâmetro CB), e de considerar a maioria dos processos hidrológicos na simulação chuva-vazão, constitui uma ferramenta mais robusta da avaliação da disponibilidade hídrica na bacia do que um simples balanço hidrológico.

Sobre a aplicabilidade do modelo hidrológico na representação da interação rio-aquífero.

Na modelagem dos fluxos subterrâneos da água por modelos hidrológicos, a principal simplificação adotada está na consideração do aquífero como um reservatório. Na macro-escala, entretanto, essa representação pode funcionar bem em muitas situações, apesar da grande complexidade e heterogeneidade do sistema real.

O modelo MGB-IPH conseguiu representar a interação entre o aquífero, representado por reservatórios subterrâneos, e o rio, representado pela rede drenagem, ao reproduzir dois dos efeitos da exploração de água subterrânea: o esvaziamento do reservatório subterrâneo e a diminuição da descarga do aquífero no rio. Todavia, o modelo não reproduziu a possibilidade de aumento de zonas de recarga na bacia nem o fluxo de água do rio para o aquífero, ou seja, na representação do modelo, o fluxo de água ocorre do reservatório subterrâneo para a rede de drenagem, mas não na direção contrária.

Uma outra limitação do modelo está na representação dos efeitos locais da exploração de água. Na concepção do modelo, em cada célula há um reservatório subterrâneo que não tem comunicação com os reservatórios adjacentes. Assim, o efeito do rebaixamento de um reservatório não se reflete nos reservatórios circunvizinhos. Uma forma de melhorar a representação do escoamento subterrâneo no modelo hidrológico seria em representar esse escoamento por meio de equações, como a equação de Darcy, que representem os processos físicos desse sistema. Dessa forma, a comunicação entre células na simulação do fluxo subterrâneo seria possível, embora, nesse caso, o número de parâmetros necessários para representação do sistema, como a condutividade hidráulica e a capacidade específica do aquífero, e a necessidade de dados medidos para a calibração do modelo seriam maiores.

Sobre a representação linear e não-linear do reservatório subterrâneo.

As simulações realizadas com o modelo MGB-IPH para a representação linear e não-linear do reservatório subterrâneo mostraram não haver significativa diferença em se utilizar quaisquer dessas funções para modelagem das recessões nos hidrogramas.

As recessões na bacia do Alto Rio Paranaíba, nas quais foram testadas essas duas formulações, duram, em média, 150 dias. A indiferença observada no modelo quanto à simulação do aquífero como uma função linear ou não-linear do reservatório subterrâneo pode

ser explicada pelo tempo de duração das recessões na bacia, que, segundo Chapman (1999), quando superiores a 10 dias, podem ser bem aproximadas pelo modelo linear.

A representação linear pode ter sido também apropriada caso a camada inferior ao aquífero não-confinado esteja bem abaixo do rio ou caso as contribuições na vazão de base sejam resultantes de um aquífero confinado. Essas suposições, entretanto, só poderiam ser confirmadas por um estudo hidrogeológico da bacia.

7.2 - RECOMENDAÇÕES

A análise dos usos de água superficial e subterrânea realizada nesse trabalho foi baseada nos efeitos das retiradas sobre o escoamento do rio. Pela forma como o aquífero foi representado no MGB-IPH, não foi possível avaliar os impactos da captação de água superficial sobre os níveis subterrâneos no aquífero. Embora as informações hidrogeológicas básicas não estivessem disponíveis, como na maioria das bacias brasileiras, na medida em que estudos da ocorrência e da física das águas do subsolo em determinadas áreas forem sendo elaborados, é recomendado que se avalie o impacto das retiradas de água superficial também sobre o nível dos aquíferos.

Em relação à análise na macro-escala da bacia, cabe destacar que as condições de recarga e do escoamento nos aquíferos variam fortemente com as condições geológicas, climáticas e geomorfológicas. Por isso, mesmo que a análise regional indique que a vazão de retirada deva ser inferior à máxima vazão de recarga do aquífero, não se pode garantir que localmente o aquífero seja capaz de suprir toda a demanda. Para que esse tipo de avaliação seja mais precisa, recomenda-se fazer as análises examinando as condições locais da capacidade de exploração do aquífero, como por testes de bombeamento.

Como forma de integrar, de forma expedita e imediata, a outorga de água superficial e subterrânea, sugere-se que a outorga de água total de água na bacia (superficial mais subterrânea) continue sendo adotada em relação a uma vazão de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} ou Q_{95}) e que retiradas superficiais e subterrâneas sejam consideradas equivalentes; por exemplo, uma retirada de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de água subterrânea implicaria em uma indisponibilidade de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de água superficial. Supondo o critério adotado em Minas Gerais, a vazão máxima para outorga superficial de 30% da $Q_{7,10}$ passaria a

incluir a máxima retirada superficial e subterrânea na bacia. Assim, se 30% da $Q_{7,10}$ correspondessem a 4,0 m³/s e as retiradas subterrâneas totalizassem 0,5 m³/s, então apenas 3,5 m³/s estariam disponíveis para retiradas superficiais. Um critério semelhante a esse já vem sendo aplicado na bacia do Sistema Curema-Açu, nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, no qual as vazões totais outorgadas referem-se aos usos totais superficiais e subterrâneos (Brasil, 2004). Essa sugestão refere-se ao conjunto de todas as retiradas subterrâneas na bacia e está baseada em resultados de simulações de um modelo relativamente simplificado que, no entanto, representa de forma adequada o comportamento da água subterrânea na escala da bacia. Critérios adicionais devem ser definidos para outorga de cada poço ou retiradas subterrâneas individualmente, como por exemplo, a definição da vazão máxima explotável localmente e o efeito dessas retiradas sobre poços e corpos hídricos superficiais adjacentes aos pontos de exploração.

A avaliação sobre a adequabilidade da formulação linear e não-linear para representar o reservatório subterrâneo no modelo mostrou não haver diferença significativa entre o emprego de uma ou outra função. Na calibração com o modelo não-linear, o parâmetro β foi fixado em 0,5 (Wittenberg, 1999). Uma avaliação mais conclusiva sobre a adequabilidade da função não-linear proposta poderia ser determinada considerando a calibração do parâmetro β e a sensibilidade de seu valor com os outros parâmetros do modelo.

Uma dificuldade que pode surgir no gerenciamento integrado dos recursos hídricos é devida ao conflito entre legislações, que criam incompatibilidades entre as atribuições institucionais e legais das responsabilidades sobre as águas subterrâneas, podendo criar dificuldades no estabelecimento de critérios integrados no gerenciamento dos usos dos recursos hídricos. Recomenda-se uma revisão das legislações quanto ao domínio legal das águas subterrâneas e o estabelecimento de diretrizes legais gerais para a integração entre a gestão desses recursos hídricos com os recursos hídricos superficiais. Além disso, é importante que se considere a integração e a atuação articulada entre órgãos e entidades cujas competências se refiram aos recursos hídricos de domínio dos Estados (rios de dominialidade estadual e as águas subterrâneas) e da União (rios de dominialidade federal e as águas minerais), conforme estabelecido na Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988).

Os critérios de aceitabilidade escolhidos para a definição dos limites de outorga integrada basearam-se apenas nos impactos sobre vazões mínimas de referência. Do ponto de vista da sustentabilidade ecológica dos ecossistemas, não somente o efeito sobre a redução na magnitude da vazão mínima é importante, mas também os impactos na taxa de variação de vazão entre eventos e na frequência, duração e tempo de ocorrência dessas vazões e de vazões máximas (cheias e inundações). Sugere-se que esses aspectos do hidrograma ecológico (Collischonn, 2005) sejam também avaliados ao se definir qual impacto provocado pelas retiradas é considerado aceitável.

O cálculo da evapotranspiração pelo modelo mostrou forte influência na qualidade do ajuste das recessões nos hidrogramas, cujas vazões sempre eram superestimadas nesse período. A alternativa encontrada foi aumentar a taxa de evapotranspiração em 30% de seu valor calculado para cada intervalo de tempo. A falha na estimativa da evapotranspiração pelo modelo é devida à escassez de dados para o período de simulação e do uso de valores mensais para cálculo da evapotranspiração usada em intervalo de tempo diário. Uma recomendação que se faz é avaliar o quanto o resultado da simulação no modelo é afetado pelo uso de dados climatológicos diários observados e o uso da média de valores. Uma outra possibilidade seria verificar o desempenho de outras equações de cálculo de evapotranspiração no modelo, que pudessem melhor representar esse processo ainda que com deficiência de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACREMAN, M. (2006) **Guidelines for sustainable management of groundwater-fed catchments in Europe**. Disponível em: <<http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/maastricht/s2/s236.htm>>. Acesso em: 26/12/2006.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. (1999). **Sustainability of groundwater resources**. U. S. Geological Survey Circular 1186, Denver, EUA, 86 p.
- ALLEY, W. M.; LEAKE, S. A. (2004). **The journey from safe yield to sustainability**. Ground Water, vol. 42, no. 1, p. 12-16.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. (1992). **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press, Nova Iorque, p. 381.
- ANDREOLLI, I. (2003). **Previsão de vazão em tempo real no rio Uruguai com base na previsão meteorológica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 182 p.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. (2000). **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin**. Journal of Hydrology, vol. 227 (1-4), p. 21-40.
- ARTINGTON, A. H.; BUNN, S. E.; POFF, N. L.; NAIMAN, R. J. (2006). **The challenge of proving environmental flow rules to sustain river ecosystems**. Ecological Applications, vol. 16, nº 4, p. 1311-1318.
- AUSTRALIA (País). (2006). **Department of Primary Industries**. Disponível em: <<http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/glenreg.nsf/696c4532f2cc03304a256718003e5c09/57bcc21ea3987fb64a256aa1000a04c1?OpenDocument>>. Acesso em: 26/12/2006.
- BAHIA (Estado) (2003). SRH – Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia (2003). In: **Uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas da sub-bacia do rio das Fêmeas – Bahia**. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Salvador, Bahia. 208 p.
- BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; MARCUSSI, F. F. N. (2006). **A interação rio-aquífero na bacia do Ribeirão da Onça: aplicação de equações empíricas para estimativa do escoamento de base**. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, Curitiba, 07-10 de novembro de 2006, 20 p.
- BELL, J. W. (2006). **Las Vegas Valley: land subsidence and fissuring due to groundwater withdrawal**. Disponível em: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/impacts/hydrology/vegas_gw/>. Acesso em: 26/12/2006.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. (2003). **Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios**. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 8, n. 2, p. 149-160.

- BIRTLES, A. B. (1978). **Identification and separation of major base flow components from a stream hydrograph**. Water Resources Research, vol. 14, nº 5, p. 791-803.
- BOUWER H.; MADDOCK, T III (1997). **Making sense of the interaction between groundwater and streamflow: lessons for watermasters and adjudicators**. Rivers, n. 6, Vol. 1, p. 19-31.
- BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; FILHO, E. F. R. (2006). **Aquífero Guarani**. Disponível em: <http://www.oaquiferoguarani.com.br/index_02.htm>. Acesso em: 07/12/2006.
- BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. (2006). **A review of techniques for analyzing baseflow from stream hydrographs**. Bureau of Rural Sciences, Commonwealth of Australia. Disponível em: <<http://connectedwater.gov.au/resources/Downloads.html>>. Acesso em: 20/06/2006.
- BRASIL (País). (1967). Decreto-Lei nº 227 de 28 de fevereiro de 1967. **Código de Mineração – Código de Minas**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del0227.htm>. Acesso em: 05/02/2006.
- _____ (1972). DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 117 de 17 de julho de 1972. **Estabelece instruções sobre os estudo in loco de fontes de águas minerais ou potáveis de mesa como condição indispensável à aprovação do relatório final de pesquisa**. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=67&IDPagina=84&IDLegislacao=82>>. Acesso em: 24/06/2007.
- _____ (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm>. Acesso em: 02/01/2006.
- _____ (1997). Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 - Lei das Águas. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 02/02/2006.
- _____ (2000). IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. In: **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/abastecimento_de_agua/abagua05.shtm>. Acesso em: 11/07/2006.
- _____ (2001). CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 15, de 11 de janeiro de 2001. **Estabelece diretrizes para inserção das águas subterrâneas no instrumento Planos de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/delibera/resolucoes/R022.htm>>. Acesso em: 15/06/2005.
- _____ (2002a). ANA – Agência Nacional de Águas. In: **The evolution of water resources management in Brazil**. Brasília: ANA, 45 p.
- _____ (2002b). CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 22, de 04 de julho de 2002. **Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas**. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/delibera/resolucoes/R015.htm>>. Acesso em: 15/06/2005.

- _____ (2004). ANA – Agência Nacional de Águas. Resolução nº 687, de 03 de dezembro de 2004. **Dispõe sobre o Marco Regulatório para a gestão do Sistema Cuiabá-Açu e estabelece parâmetros e condições para a emissão de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos e declaração de uso insignificante.** Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/Resolucoes/resolucoes2004/687-2004.pdf>>. Acesso em: 18/07/2007.
- _____ (2005a). ANA – Agência Nacional de Águas. In: **Caderno de Recursos Hídricos: Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no país – Diretrizes e prioridades.** Brasília: ANA, 153 p.
- _____ (2005b). ANA – Agência Nacional de Águas. In: **Caderno de Recursos Hídricos: Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil.** Brasília: ANA, 134 p.
- _____ (2006). MMA – Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. In: **Secretaria de Recursos Hídricos.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/srh/index.cfm>>. Acesso em: 26/03/2006.
- CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M., PONTES FILHO, I. D. S. P. (2006). **Bombeamento intensivo de água subterrânea e riscos de subsidência do solo.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 11, No. 3, p. 147-157.
- CANADA (País). (2006). Environment Canada. **Environmental Sustainability Project.** Disponível em: <http://www.umaine.edu/sustainability/Program_Content/groundwater_resources.htm>. Acesso em: 26/12/2006.
- CARRIGER, S. (2005). **Reducción de la pobreza por medio de la gestión integrada de las aguas subterráneas y superficiales.** Centro Consultivo do Global Water Partnership, IWMI, 10 p.
- CHAPMAN, T. G. (1991). **Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon.** Water Resources Research, vol. 27, nº 7, p. 1783-1784.
- CHAPMAN, T. (1999). **A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation.** Hydrological Processes, vol. 13, p. 701-714.
- CLARKE, R. T. (2004). Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação.** 3ª. Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 943 p.
- COLLISCHONN, B. (2006). **Uso de precipitação estimada por satélite em um modelo hidrológico distribuído.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 174 p.
- COLLISCHONN, W.; AGRA, S. G.; FREITAS, G. K.; PRIANTE, G. R.; TASSI, R.; SOUZA, C. F. (2005). **Em busca do hidrograma ecológico.** In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Paraíba, 21 p.
- COLLISCHONN, W. (2001). **Simulação hidrológica de grandes bacias.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 270 p.

- CORBO, M. D.; COLLISCHONN, W.; KIRCHHEIM, R. ; SILVA, B. C. (2005). **Análise do efeito da extração de água subterrânea sobre a disponibilidade de água superficial na bacia do rio Grande (BA)**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa.
- CRUZ, J. C. (2001). **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 187 p.
- CUSTODIO, E. (2002). **Aquifer overexploitation: what does it mean?**. Hydrogeology Journal, Vol. 10, p. 254-277.
- DANTAS, A.; PEIXINHO, F. C. (2006). **O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS – Instrumento de gestão de águas subterrâneas com aplicação da tecnologia social**. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba, 13 p.
- DELLEUR, J. W. (1998). **The handbook of groundwater engineering**. 1ª. Edição. Florida, CRC Press, p. 940.
- DINGMAN, S. L. (2002). **Physical Hydrology**. 2ª. Edição. Nova Jersey: Prantice Hall, p. 646.
- DOOGE, J. C. I. (1986). **Looking for hydrologic laws**. Water Resources Research, vol. 22, p. 465-585.
- DUNNE, T.; BLACK, R. D. (1970). **Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed**. Water Resources Research, vol. 6, p. 1296-1311.
- EASTMAN, J. R. (2006). **IDRISI Andes Tutorial**. Massachusetts: Clark Labs, Clark University, Estados Unidos, 284 p.
- ESPANHA (País) (2002). Fundación Centro Internacional de Hidrologia Subterrânea. **Declaración de Valência**. Disponível em: <<http://www.fcihis.org/pub/info/novedade/valencia/vdeclaracion.pdf>>. Acesso em: 23/12/06.
- ESTADOS UNIDOS (País) (2006). USGS – United States Geological Service. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>>. Acesso em: 15/02/2006.
- FENICIA, F.; SAVENIJE, H. H. G.; MATGEN, P.; PFISTER, L. (2006). **Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modeling**. Hydrology and Earth System Sciences, vol. 10, p. 139-150.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. (1979). **Groundwater**. Englewood Cliffs, Nova Jersey: Prentice Hall, 603 p.
- FREEZE, R. A.; WITHERSPOON, P. A. (1967). **Theoretical analysis of regional groundwater flow 2: Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation**. Water Resources Reseach, vol. 3, p. 623-634.

- FREIRE, C. C. (2002). **Modelo de Gestão para água subterrânea**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 140 p.
- FULLAGAR, I. *et al.* (2006). **Managing connected surface water and groundwater resources**. Science for Decision Makers, Australian Government – Bureau of Rural Sciences, 8 p.
- GIFFORD, C.; OXON, WALLINGFORD (1980). The low flow estimation procedure. In: **Low flow studies**. Institute of Hydrology, Research Report N° 1.
- GIRRARD, P.; DA SILVA, C. J.; ABDO, M. (2003). **River-groundwater interactions in the Brazilian Pantanal – The case of the Cuiabá River**. Journal of Hydrology, v. 283, p. 37-66.
- GUNTEN, H. R.; LIENERT, C. H. (1993). **Decreased metal concentrations in groundwater caused by controls of phosphate emissions**. Nature, vol. 364, pág. 220-222.
- HALL, F. R. (1968). **Base-flow recessions – A review**. Water Resources Research, vol. 4, n° 5, p. 973-983.
- HIRATA, R. **Palestra: Aquíferos no estado de São Paulo**. Instituto de Engenharia de São Paulo. Vídeo disponível em: <<http://itv.netpoint.com.br/ie/principal.asp?id=videoteca>> Acesso: 30/11/2006.
- HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J.P.; WIBERG, P.L.; ESHLEMAN, K. L. (1998). Elements of Physical Hydrology. In: **Groundwater Hydrology**. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, Estados Unidos, 302 p.
- HORTON, R. E. (1931). **The field, scope, and status of the science of hydrology**. American Geophysical Union Transactions, Reports and Papers, Hydrology, p. 189-202.
- _____ (1933). **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. American Geophysical Union Transactions, vol. 14, p. 446-460. In: Beven, K. J. *Streamflow generation processes*. Wallingford: International Association of Hydrological Science (2006), 431 p.
- _____ (1945). **Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology**. Geological Society of America Bulletin, vol. 56, p. 275-370. In: Beven, K. J. *Streamflow generation processes*. Wallingford: International Association of Hydrological Science (2006), 431 p.
- HUBBERT, M. K. (1940). **The theory of groundwater motion**. Journal of Geology, vol. 48, p. 785-944.
- HUGHES, D. A. (2004). **Incorporating groundwater recharge and discharge functions into an existing monthly rainfall-runoff model**. Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques, vol. 49 (2), p. 297-311.
- KHAN, L. R.; MAWDSLEY, J. A. (1988). **Reliable yield of unconfined aquifers**. Hydrological Sciences Journal, vol. 33, n° 3, p. 151-171.

- KIRKBY, M. J. (1988). **Hillslope runoff processes and models**. Journal of Hydrology, vol. 100, p. 315-339.
- KROKLI, B. (1989). **Low flow analysis**. FRIENDS in Hydrology, IAHS n° 187, p. 443-451.
- KULANDAISWAMY, V.C.; SEETHARAMAN, S. (1969). **A note on Barnes' method of hydrograph separation**. Journal of Hydrology, vol. 9, p. 222-229.
- LANNA, A. E. (2004). Elementos de Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. 3ª. Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 943 p.
- LANNA, A. E. (2006). **Outorga de água subterrânea** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <fnandojp@gmail.com> em 18/10/2006.
- LARENTIS, D. G. (2004). **Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: sistema Taquari-Antas – RS**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 177 p.
- LARKIN, R. G.; SHARP Jr., J. M. (1992). **On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers**. Geological Society of America Bulletin, vol. 104, p. 1608-1620. Disponível em: <<http://www.gsjournals.org/archive/0016-7606/104/12/pdf/i0016-7606-104-12-1608.pdf>>. Acesso em: 20/12/2006.
- LARSON, K. J.; BASAGAOGLU, H.; MARIÑO, M. A. (2001). **Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model**. Journal of Hydrology, vol. 242, p. 79-102.
- LEPPAJARVI, R. (1989). **Frequency analysis of flood and low flow**. FRIENDS in Hydrology, IAHS N° 187, p. 435-442.
- LEVINE, J. B.; SALVUCCI, G. D. (1999). **Equilibrium analysis of groundwater-vadose zone interactions and the resulting spatial distribution of hydrologic fluxes across a Canadian prairie**. Water Resources Research, vol. 35, pág. 1369-1383.
- LLAMAS, R. (2004). **Água e ética – Uso da água subterrânea**. Série: Água e Ética, ensaio 7. França: Unesco, 39 p.
- MINAS GERAIS (Estado) (1998). IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Portaria n° 010/98 de 30 de dezembro de 1998. In: **Regulamenta o processo de outorga de direito de uso de águas de domínio do Estado**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=669>>. Acesso em: 20/06/2006.
- _____ (1999a). Lei n° 13.199 de 29 de janeiro de 1999. In: **Política Estadual de Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5309>>. Acesso em: 06/05/2006.

- _____ (1999b). IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Portaria nº 007/99 de 19 de outubro de 1999. In: **Regulamenta o processo de outorga de direito de uso de águas de domínio do Estado**. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=3774>>. Acesso em: 20/06/2006.
- _____ (2006). IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. In: **Outorgas**. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/>>. Acesso em: 10/10/2006.
- MOORE, R. D. (1997). **Storage-outflow modelling of streamflow recessions, with application to a shallow-soil forested catchment**. Journal of Hydrology, v. 198, p. 260-270.
- MOORE, R. J.; BELL, V. A. (2002). **Incorporation of groundwater losses and well level date in rain-fall runoff model illustrated using the PDM**. Hydrology and Earth System Sciences, vol. 6 (1), p. 25-38.
- NATHAN, R. J.; McMAHON, T. A. (1990). **Evaluation of automated techniques for base flow and recessions analysis**. Water Resources Research, vol. 26, n. 7, p. 1465-1473.
- NCL – Newcastle University. (2006). **Water Resource Systems Research Laboratory**. Disponível em: <<http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl/>>. Acesso em: 20/07/2006.
- NEGRELLO FILHO, O. A. (2005). **Influência do vento sul sobre a estabilidade de associações bênticas da Baía de Paranaguá – PR**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná. 101 p. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/1884/2317/1/Tese+Orlei+A.+Negrello+Filho.pdf>>. Acesso em: 04/01/2007.
- PARSOPOULOS K. E.; VRAHATIS, M. N. (2001). **Particle Swarm Optimization for imprecise problems**. Proceedings of the 5th International Workshop on Mathematical Methods in Scattering Theory and Biomedical Technology, Confu, Grécia.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2005). **Geração de direções de fluxo para modelagem hidrológica de grande escala**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB.
- _____ (2007). **Extração automática de comprimentos de trechos de rio a partir do Modelo Numérico do Terreno para modelagem hidrológica distribuída**. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, SC.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, L. L. (2006). **Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models**. Water Resources Research, vol. 42, W08502, doi:10.1029/2005WR004544.
- POSTEL, S.; RICHTER, B. (2003). Down to the river. In: **Rivers for life: managing water for people and nature**. 1^a. Ed., Washington: Island Press, 253 p.
- PIMENTEL, A. L. *et al.* (2000). **Estimativa da recarga do aquífero Urucuiá na sub-bacia do rio das Fêmeas – oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas**. Anais do 1º Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português, Rio de Janeiro, p. 27-37.

- RAMIREDDYGARI, S. R.; SOPHOCLEOUS, M. A.; KOELLIKER, J. K.; PERKINS, S. P.; GOVINDARAJU, R. S. (2000). **Development and application of a comprehensive simulation model to evaluate impacts of watershed structures and irrigation water use on streamflow and groundwater: the case of Wet Walnut Creek Watershed, Kansas, USA.** Journal of Hydrology, v. 236, n. 3-4, p. 223-246.
- REINO UNIDO (País) (2006). IGARF – Impact of Groundwater in River Flows. In: **Impact of groundwater in river flows Phase 2: A numerical approach to the estimation of impact.** Disponível em: <<http://www.ncl.ac.uk/wrgi/wrsrl/projects/igarf2/igarf2.html>>. Acesso em: 02/11/2006.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. (2005). **Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – Parte 1: Classificação.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 10, nº 4; p. 05-18.
- SCHUSTER, H. D. M. *et al.* (2002). **Estudos hidrogeológicos do aquífero Urucua no oeste baiano para obtenção de parâmetros nas outorgas de mananciais subterrâneos.** Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis, SC, Brasil.
- SCOTT, R. F. (1979). **Subsidence – A review. Evaluation and prediction of subsidence.** Nova York: ASCE, p. 1-25.
- SCROCCARO, J. L. (2006). **Critérios para a definição do conceito de vazão ecológica.** Ata da 54ª reunião da Câmara Técnica de Análise de Projetos do CNRH. Disponível em: <<http://www.cnrh-srh.gov.br/>>. Acesso em: 15/05/2007.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (1993). Evaporation. In: MAIDMENT, D R. **Handbook of hydrology.** Nova York: McGraw-Hill, 1 v. (várias paginações).
- SILVA, B. C. (2005). **Previsão de vazões de curto prazo em grandes bacias.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, UFRGS, Porto Alegre, 280 pág.
- SILVA, F. C.; LARENTIS, D. G.; COLLISCHON, W. (2006a). **Análise integrada de ofertas e demandas hídricas.** Anais do Workshop sobre Gestão Estratégica de Recursos Hídricos, Brasília, DF, Brasil.
- SILVA, G. E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAVALCANTI, G. L.; COSTA, L. M., MONTENEGRO, A. A. A. (2006b). **Aplicação e modelagem da recarga artificial com águas pluviais para recuperação potenciométrica de aquífero costeiro na planície do Recife-PE.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 11, No. 3, p. 159-170.
- SILVEIRA, G. L.; ROBAINA, A. D.; GIOTTO, E.; DEWES, R. (1998). **Outorga para uso dos recursos hídricos: aspectos práticos e conceituais para o estabelecimento de um sistema informatizado.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 3, No. 3, p. 5-16.
- SLOTO, R. A. A.; CROUSE, M. Y. H. (1996). **A computer program for stream flow hydrograph separation and analysis.** U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigation Report, p. 96-4040.

- SMAKHTIN, V. U. (2001) **Low flow hydrology: a review**. Journal of Hydrology, vol. 240, p. 147-186.
- SOPHOCLEOUS, M.A. *et al.* (1999). **Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas**. Journal of Hydrology, v. 214, n. 1-4, p. 179-196.
- SOPHOCLEOUS, M. (1997). *Managing water resources systems: Why 'safe yield' is not sustainable*. Ground Water Journal, v. 35, n. 4, p. 561.
- _____ (2002). *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeology Journal, v. 10, p. 52-67.
- _____ (2005). **Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA**. Hydrogeology Journal, v. 13, p. 351-365.
- STROMBERG, J. C.; TILLER, R.; RICHTER, B. (1996). **Effects of groundwater decline on riparian vegetation of semiarid regions: the San Pedro, Arizona**. Ecological Applications, vol. 6, n° 1, p. 113-131.
- SUJONO, J.; SHIKASHO, S.; HIRAMATSU, K. (2004). **A comparison of techniques for hydrograph recession analysis**. Hydrological Process, vol. 18, p. 403-413.
- TALLAKSEN, L. M. (1995). **A review of baseflow recession analysis**. Journal of Hydrology, vol. 165, n° 1, p. 349-370.
- TÓTH, J. (1970). **A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment**. *Journal of Hydrology*, vol. 10, p. 164-176.
- TUCCI, C.E.M. (1998). **Modelos Hidrológicos**. 1ª. Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS com colaboração da ABRH, 652 p.
- _____ (2002). **Regionalização de vazões**. 1ª. Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 256 p.
- _____ (2004). **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. 3ª. Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 943 p.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. (2003) **Revisão sobre modelos matemáticos hidrológicos**. Material de Disciplina, IPH, UFRGS.
- VALLET, H. M.; FISHER, S. G.; GRIMM, N. B.; CAMILL, P. (1994). **Vertical hydrologic exchange and ecologic stability of a desert stream ecosystem**. Ecology, vol. 75, p. 548-560.
- VOGEL, R. M.; KROLL, C. N. (1989). **Low-flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients**. Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 115, n° 3, p. 338-357.
- WANG, H. F.; ANDERSON, M. P. (1982). **Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods**. São Francisco: W. H. Freeman and Company, 237 p.

- WINGE, M. *et al.* (2001). **Glossário geológico ilustrado**. Universidade de Brasília. Disponível em: <<http://www.unb.br/ig/glossario/>>. Acesso em: 20/02/2007.
- WINTER, T. C. (1999). **Relation of streams, lakes and wetlands to groundwater flow systems**. Hydrogeology Journal, vol. 7, p. 28-45.
- WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. (1998). **Groundwater and surface water: a single resource**. U. S. Geological Survey Circular 1139. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/circ/circ1139/#pdf>>. Acesso em: 30/11/2006.
- WITTENBERG, H. (1994). **Nonlinear analysis of flow recession curves**. FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data, IAHS n° 221, p. 61-67.
- _____ (1999). **Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes**. Hydrological Processes, vol. 13, p. 715-726.
- _____ (2006). **Non-linear reservoir** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <fnandojp@gmail.com> em 13/10/2006.
- YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. (1998). **Multi-objective global optimization for hydrologic models**. Journal of Hydrology, vol. 204, p. 83-97.

ANEXO A: DEDUÇÃO MATEMÁTICA DO PARÂMETRO CB E CB'

O parâmetro CB é obtido por meio da análise dos períodos de recessão dos hidrogramas nas bacias e pode ser determinado por equações deduzidas a partir da equação da continuidade e dos reservatórios subterrâneos.

A seguir são apresentadas as deduções das fórmulas de cálculo do CB no reservatório linear e não-linear, respectivamente.

A.1. Reservatório Linear

O modelo de reservatório linear assume que o armazenamento S é linearmente proporcional à descarga de saída Q :

$$S = CB \cdot Q, \quad (\text{eq. A.1})$$

nesse caso, o parâmetro CB é relacionado ao tempo médio de esvaziamento do armazenamento subterrâneo, tendo, portanto, unidade de tempo.

No período de recessão, a entrada no reservatório subterrâneo é nula, logo a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{dS}{dt} = -Q. \quad (\text{eq. A.2})$$

Derivando a equação do reservatório linear (eq. A.1) com relação ao tempo e substituindo a variação do armazenamento no tempo pela equação A.2, resulta:

$$\frac{dS}{dt} = CB \cdot \frac{dQ}{dt} \therefore -Q = CB \cdot \frac{dQ}{dt} \therefore -dt = CB \cdot \frac{dQ}{Q}. \quad (\text{eq. A.3})$$

Integrando a equação A.3:

$$-\int_{t_i}^{t_f} dt = CB \cdot \int_{Q_i}^{Q_f} \frac{dQ}{Q} \therefore -(t_f - t_i) = CB \cdot (\ln Q_f - \ln Q_i). \quad (\text{eq. A.4})$$

O termo $(t_f - t_i)$ corresponde à data final e inicial do período de recessão, correspondendo ao número de dias (ND) de duração da recessão. Substituindo termos,

isolando o CB e ordenando os termos da equação A.4, o parâmetro CB do reservatório linear é dado por:

$$CB = -\frac{ND}{\ln\left(\frac{Q_f}{Q_i}\right)}, \quad (\text{eq. A.5})$$

onde: CB e ND têm unidade de tempo (dias); Q_f e Q_i , vazões ao final e no início da recessão, têm unidade de m^3/s .

A.2. Reservatório Não-linear

O modelo de reservatório linear assume que o armazenamento S varia de forma não-linear com relação à descarga de saída Q :

$$S = CB' \cdot Q^b. \quad (\text{eq. A.6})$$

nesse caso, o parâmetro CB representa uma relação física da vazão de saída do reservatório subterrâneo.

Derivando a equação do reservatório não-linear (eq. A.6) com relação ao tempo e substituindo a variação do armazenamento no tempo pela equação A.2, resulta:

$$\frac{dS}{dt} = CB' \cdot \frac{dQ^b}{dt} \therefore -Q = CB' \cdot \frac{dQ^b}{dt} \therefore -Q = CB' \cdot b \cdot Q^{(b-1)} \cdot \frac{dQ}{dt} \therefore -dt = CB' \cdot b \cdot \frac{Q^{(b-1)}}{Q} \cdot dQ \therefore$$

$$\therefore -dt = CB' \cdot b \cdot Q^{b-2} \cdot dQ. \quad (\text{eq. A.7})$$

Integrando a equação A.7:

$$-\int_{t_i}^{t_f} dt = CB' \cdot b \int_{Q_i}^{Q_f} Q^{b-2} \cdot dQ \therefore -(t_f - t_i) = \frac{CB' \cdot b}{b-1} \cdot (Q_f^{b-1} - Q_i^{b-1}). \quad (\text{eq. A.8})$$

Substituindo o termo $(t_f - t_i)$ por ND (número de dias de duração da recessão), isolando o CB' e ordenando os termos da equação A.8, o parâmetro CB' do reservatório não-linear é dado por:

$$CB' = -\frac{ND \cdot (b-1)}{b \cdot (Q_f^{b-1} - Q_i^{b-1})}, \quad (\text{eq. A.9})$$

onde: CB' tem unidade de $[L]^{3-3 \cdot b} \cdot [T]^b$; ND têm unidade de tempo; Q_f e Q_i , as vazões ao final e no início da recessão, têm unidade de m^3/s , e b é adimensional.

**ANEXO B: USOS DA ÁGUA OUTORGADOS PELO IGAM
NA BACIA DO ALTO PARANAÍBA**

B.1. Usos superficiais

Latitude	Longitude	Rio	Município	Data Publ.	Vazão (m³/s)	Vazão (m³/h)	Uso	Regime de Uso
-46.79	-18.69	Paranaíba	Guimarães	10/03/01	0.0060	21.60	Dess.animais	Indefinido
-46.79	-18.70	Paranaíba	Guimarães	19/09/06	0.0100	36.00	Irrigação	21 h/dia - 8 meses/ano.
-46.83	-18.73	Paranaíba	Guimarães	06/09/06	0.0250	90.00	Irrigação	21 h/dia - 8 meses/ano.
-46.78	-18.73	Paranaíba	Guimarães	16/06/04	0.0100	36.00	Irrigação	24 h/dia - 6 meses/ano.
-46.92	-18.75	Paranaíba	Patrocínio	28/12/00	0.0024	8.64	Irrigação	Indefinido
-46.90	-18.75	Paranaíba	Patrocínio	26/05/04	0.1300	468.00	Irrigação	12h/dia-Abril a outubro
-46.79	-18.75	Paranaíba	Guimarães	27/05/03	0.0025	9.00	Cons. Humano, Dess.animais e Irrigação	15 horas/dia-06 meses/ano
-46.81	-18.76	Paranaíba	Guimarães	20/08/05	0.0045	16.20	Irrigação, Cons. Humano e Dess.animais	16 h/dia - 12 meses/ano.
-46.71	-18.76	Paranaíba	Patos de Minas	12/01/02	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.92	-18.77	Paranaíba	Patrocínio	06/07/01	0.0241	86.76	Irrigação	Indefinido
-46.69	-18.80	Paranaíba	Patos de Minas	25/03/06	0.0253	91.08	Irrigação	24 h/dia - 04 meses/ano.
-46.90	-18.81	Paranaíba	Patrocínio	02/12/00	0.0030	10.80	Irrigação	Indefinido
-46.74	-18.81	Paranaíba	Patrocínio	14/09/01	0.0020	7.20	Irrigação	Indefinido
-46.69	-18.81	Paranaíba	Patos de Minas	14/07/06	0.0250	90.00	Irrigação	24 h/dia - 8 meses/ano.
-46.88	-18.82	Paranaíba	Patrocínio	26/01/06	0.0210	75.60	Irrigação	21 h/dia - Abril a Novembro
-46.80	-18.82	Paranaíba	Patrocínio	06/03/04	0.0042	15.12	Irrigação	20 h/dia - 12 meses/ano.
-46.64	-18.82	Paranaíba	Patos de Minas	12/01/00	0.0174	62.64	Irrigação	Indefinido
-46.80	-18.83	Paranaíba	Guimarães	12/02/05	0.0009	3.24	Dess.animais e Cons. Humano	10 h/dia - 12 meses/ano.
-46.75	-18.83	Paranaíba	Guimarães	26/01/06	0.0293	105.48	Irrigação	24 h/dia - Março a Outubro
-46.72	-18.83	Paranaíba	Guimarães	01/08/01	0.0300	108.00	Irrigação	Indefinido
-46.91	-18.84	Paranaíba	Patrocínio	28/10/05	0.0490	176.40	Irrigação	21 h/dia - Fevereiro a Maio e Agosto a Outubro
-46.74	-18.84	Paranaíba	Patos de Minas	10/03/01	0.0120	43.20	Irrigação	Indefinido
-46.83	-18.85	Paranaíba	Patrocínio	16/03/01	0.0011	3.96	Industrial	Indefinido
-46.82	-18.85	Paranaíba	Patrocínio	12/02/05	0.0045	16.20	Irrigação	12 h/dia - Maio a Outubro

-46.57	-18.85	Paranaíba	Patos de Minas	19/03/02	0.0600	216.00	Irrigação	Indefinido
-46.81	-18.88	Paranaíba	Patrocínio	27/09/95	0.0700	252.00	Irrigação	Indefinido
-46.81	-18.86	Paranaíba	Guimarânia	14/11/03	0.0013	4.68	Irrigação	24 horas/dia 12 meses/ano
-46.80	-18.86	Paranaíba	Guimarânia	12/02/04	0.0002	0.72	Irrigação	24 h/dia - 8 meses/ano
-46.74	-18.86	Paranaíba	Guimarânia	20/02/04	0.0210	75.60	Irrigação	10 h/dia - 6 meses/ano
-46.62	-18.86	Paranaíba	Patos de Minas	16/11/98	0.0180	64.80	Irrigação	Indefinido
-46.85	-18.87	Paranaíba	Patrocínio	31/12/98	0.0220	79.20	Industrial	Indefinido
-46.64	-18.87	Paranaíba	Patos de Minas	08/04/04	0.0500	180.00	Irrigação	18 h/dia - 6 meses/ano.
-46.80	-18.89	Paranaíba	Patrocínio	27/09/95	0.1370	493.20	Irrigação	Indefinido
-46.70	-18.89	Paranaíba	Guimarânia	05/02/98	0.0020	7.20	Irrigação	Indefinido
-46.58	-18.89	Paranaíba	Patos de Minas	19/03/02	0.0300	108.00	Irrigação	Indefinido
-46.83	-18.90	Paranaíba	Patrocínio	17/08/04	0.0300	108.00	Irrigação	21 h/dia - 5 meses/ano
-46.83	-18.91	Paranaíba	Patrocínio	17/10/95	0.0150	54.00	Irrigação	Indefinido
-46.81	-18.91	Paranaíba	Patrocínio	23/01/98	0.0600	216.00	Irrigação	Indefinido
-46.60	-18.91	Paranaíba	Rio Paranaíba	22/09/04	0.0829	298.33	Irrigação	20 h/dia - Todos meses exceto Agosto
-46.84	-18.92	Paranaíba	Patrocínio	09/07/98	0.0120	43.20	Irrigação	Indefinido
-46.82	-18.92	Paranaíba	Patrocínio	12/07/05	0.0059	21.24	Irrigação	12 h/dia - 6 meses/ano.
-46.68	-18.92	Paranaíba	Guimarânia	11/03/00	0.0130	46.80	Irrigação	Indefinido
-46.60	-18.92	Paranaíba	Patos de Minas	04/10/02	0.0200	72.00	Irrigação	Indefinido
-46.68	-18.94	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	05/12/90	0.0060	21.60	Abastecimento	Indefinido
-46.61	-18.94	Paranaíba	Patos de Minas	04/10/02	0.0150	54.00	Irrigação	Indefinido
-46.59	-18.94	Paranaíba	Patos de Minas	18/01/05	0.0394	141.84	Irrigação	20 h/dia - Todos meses exceto Agosto
-46.64	-18.95	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	14/11/01	0.0070	25.20	Irrigação	Indefinido
-46.69	-18.96	Paranaíba	Cruzeiro de Fortaleza	29/01/98	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.69	-18.97	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	06/11/04	0.5560	2001.60	Industrial	24 h/dia - 12 meses/ano.
-46.63	-19.00	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	02/09/98	0.0040	14.40	Irrigação	Indefinido
-46.65	-19.01	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	28/12/00	0.0250	90.00	Irrigação	Indefinido
-46.72	-19.05	Paranaíba	Serra do Salitre	18/05/04	0.0260	93.60	Irrigação	10 h/dia - Maio à Outubro
-46.52	-18.90	Paranaíba	Patos de Minas	07/10/98	0.0410	147.60	Irrigação	Indefinido
-46.51	-18.87	Paranaíba	Patos de Minas	03/03/04	0.0185	66.60	Irrigação	20 h/dia - 12 meses/ano.

-46.53	-18.85	Paranaíba	Patos de Minas	01/04/98	0.0500	180.00	Irrigação	Indefinido
-46.50	-18.88	Paranaíba	Patos de Minas	19/03/02	0.0240	86.40	Cons. Humano e Irrigação	Indefinido
-46.47	-18.91	Paranaíba	Patos de Minas	22/02/03	0.0230	82.80	Irrigação	2 em 2 dias 20 horas/dia.
-46.41	-18.91	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	30/04/98	0.1210	435.60	Irrigação	Indefinido
-46.56	-18.92	Paranaíba	Patos de Minas	03/07/04	0.0278	100.08	Irrigação	20 h/dia - Todos meses exceto Agosto
-46.54	-18.92	Paranaíba	Patos de Minas	01/06/04	0.0200	72.00	Irrigação	20 h/dia - Janeiro à Novembro
-46.38	-18.92	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	13/01/04	0.0410	147.60	Irrigação	Tempo de captação 18 h/dia - Abril a out.
-46.33	-18.92	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	29/07/00	0.0011	3.96	Irrigação	Indefinido
-46.48	-18.93	Paranaíba	Patos de Minas	17/07/97	0.0050	18.00	Irrigação	Indefinido
-46.47	-18.93	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	03/12/02	0.0208	74.88	Irrigação	Indefinido
-46.48	-18.94	Paranaíba	Patos de Minas	06/11/04	0.0162	58.32	Irrigação	22 h/dia - Setembro a Julho
-46.39	-18.94	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	08/04/06	0.0030	10.80	Irrigação	18 h/dia - 7 meses/ano.
-46.52	-18.95	Paranaíba	Patos de Minas	15/08/01	0.0150	54.00	Irrigação	Indefinido
-46.31	-18.95	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	22/03/05	0.0011	3.96	Agroindustrial e Cons. Humano	20 h/dia - 12 meses/ano.
-46.54	-18.96	Paranaíba	Serra do Salitre	27/05/00	0.0625	225.00	Irrigação	Indefinido
-46.58	-18.97	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	28/09/06	0.0086	30.96	Cons. Humano e Irrigação	Indefinido
-46.45	-18.97	Paranaíba	Patrocínio	25/11/99	0.0250	90.00	Irrigação	Indefinido
-46.38	-18.97	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	08/04/06	0.0090	32.40	Irrigação	11 h/dia - 12 meses/ano.
-46.33	-18.97	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	28/12/00	0.0013	4.68	Irrigação	Indefinido
-46.31	-18.97	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	07/01/04	0.0140	50.40	Irrigação	11 meses/ano
-46.30	-18.97	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	01/08/01	0.0140	50.40	Irrigação	Indefinido
-46.29	-18.98	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	19/05/04	0.0014	5.04	Irrigação	24 h/dia - 12 meses/ano.
-46.57	-18.99	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	28/09/06	0.0567	204.12	Irrigação	Indefinido
-46.29	-18.99	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	05/02/98	0.0040	14.40	Irrigação	Indefinido
-46.57	-19.00	Paranaíba	Serra do Salitre	24/01/01	0.0200	72.00	Irrigação	Indefinido
-46.39	-19.01	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	25/07/98	0.0104	37.44	Irrigação	Indefinido
-46.27	-19.01	Paranaíba	Campos Altos	27/04/00	0.0198	71.28	Irrigação	Indefinido
-46.31	-19.02	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	22/12/05	0.0014	5.04	Irrigação	21 h/dia - Março a Outubro
-46.28	-19.02	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	05/12/90	0.0250	90.00	Abastecimento	Indefinido

-46.26	-19.02	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	27/05/99	0.0250	90.00	Irrigação	Indefinido
-46.25	-19.02	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	10/10/98	0.0090	32.40	Irrigação	Indefinido
-46.38	-19.03	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	14/01/00	0.0220	79.20	Irrigação	Indefinido
-46.30	-19.03	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	02/06/01	0.0040	14.40	Irrigação	Indefinido
-46.28	-19.03	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	12/02/98	0.0360	129.60	Irrigação	Indefinido
-46.27	-19.03	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	16/12/05	0.0200	72.00	Agroindustrial	24 h/dia - 12 meses/ano
-46.25	-19.03	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	07/01/04	0.0150	54.00	Irrigação	Indefinido
-46.29	-19.04	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	07/09/00	0.0040	14.40	Irrigação	Indefinido
-46.41	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	01/10/98	0.0060	21.60	Irrigação	Indefinido
-46.32	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	28/03/02	0.0542	195.12	Abastecimento	Indefinido
-46.29	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	26/06/99	0.0010	3.60	Irrigação	Indefinido
-46.26	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	10/10/98	0.0170	61.20	Irrigação	Indefinido
-46.25	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	23/12/98	0.0060	21.60	Irrigação	Indefinido
-46.24	-19.05	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	03/03/04	0.0060	21.60	Irrigação	20 h/dia - 6 meses/ano.
-46.41	-19.07	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	01/04/98	0.1450	522.00	Irrigação	Indefinido
-46.27	-19.07	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	09/11/02	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.28	-19.08	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	10/07/97	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.25	-19.08	Paranaíba	Rio Paranaíba	13/07/00	0.0030	10.80	Irrigação	Indefinido
-46.36	-19.09	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	05/02/98	0.1000	360.00	Irrigação	Indefinido
-46.27	-19.09	Paranaíba	Rio Paranaíba	22/12/05	0.0015	5.40	Irrigação	21 h/dia - Junho a Outubro
-46.21	-19.09	Paranaíba	Rio Paranaíba	30/06/98	0.0050	18.00	Irrigação	Indefinido
-46.43	-19.12	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/04/04	0.0001	0.36	Cons. Humano e Dess.animais	24 h/dia - 12 meses/ano.
-46.36	-19.12	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	30/03/00	0.0200	72.00	Irrigação	Indefinido
-46.34	-19.12	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	04/09/01	0.0167	60.12	Irrigação	Indefinido
-46.43	-19.14	Paranaíba	Rio Paranaíba	24/11/00	0.0090	32.40	Irrigação	Indefinido
-46.39	-19.14	Paranaíba	Rio Paranaíba	25/04/97	0.0300	108.00	Irrigação	Indefinido
-46.39	-19.15	Paranaíba	Rio Paranaíba	31/03/99	0.1000	360.00	Irrigação	Indefinido
-46.32	-19.16	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/03/98	0.1000	360.00	Irrigação	Indefinido
-46.15	-19.16	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/04/04	0.0001	0.36	Cons. Humano e Dess.animais	24 h/dia - 12 meses/ano.
-46.32	-19.17	Paranaíba	Rio Paranaíba	05/10/02	0.0400	144.00	Irrigação	Indefinido
-46.28	-19.17	Paranaíba	Rio Paranaíba	26/10/02	0.0300	108.00	Irrigação	Indefinido

-46.25	-19.17	Paranaíba	Rio Paranaíba	31/05/97	0.0020	7.20	Irrigação	Indefinido
-46.40	-19.18	Paranaíba	Rio Paranaíba	20/12/03	0.0700	252.00	Irrigação	21 horas/dia -maio à setembro
-46.24	-19.18	Paranaíba	Rio Paranaíba	14/12/00	0.0050	18.00	Irrigação	Indefinido
-46.22	-19.18	Paranaíba	Rio Paranaíba	07/04/01	0.0090	32.40	Irrigação	Indefinido
-46.16	-19.18	Paranaíba	Rio Paranaíba	30/03/04	0.0090	32.40	Irrigação	10 h/dia - 10 meses/ano.
-46.35	-19.19	Paranaíba	Rio Paranaíba	15/12/94	0.0400	144.00	Irrigação	Indefinido
-46.31	-19.19	Paranaíba	Rio Paranaíba	12/09/03	0.0450	162.00	Irrigação	24 horas/dia 8 meses/ano
-46.29	-19.19	Paranaíba	Rio Paranaíba	09/10/97	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.16	-19.19	Paranaíba	Rio Paranaíba	30/04/97	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.51	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	16/09/03	0.0055	19.80	Irrigação	18 horas/dia 6 meses/ano
-46.42	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	22/05/91	0.0840	302.40	Irrigação	Indefinido
-46.30	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	12/09/03	0.0450	162.00	Irrigação	24 horas/dia 8 meses/ano
-46.26	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/12/02	0.0050	18.00	Irrigação	Indefinido
-46.25	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/12/02	0.0050	18.00	Irrigação	Indefinido
-46.19	-19.20	Paranaíba	Rio Paranaíba	25/07/95	0.0600	216.00	Irrigação	Indefinido
-46.37	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	06/07/01	0.0125	45.00	Irrigação	Indefinido
-46.35	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	25/04/97	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.30	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	12/09/03	0.0050	18.00	Irrigação	24 horas/dia 07 meses/ano-Abril a outubro
-46.18	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	02/06/06	0.0990	356.40	Irrigação	3 h/dia - 12 meses/ano.
-46.17	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	25/04/97	0.0170	61.20	Irrigação	Indefinido
-46.15	-19.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	26/09/00	0.0030	10.80	Irrigação	Indefinido
-46.41	-19.22	Paranaíba	Rio Paranaíba	16/09/03	0.0544	195.84	Irrigação	21 horas/dia 12 meses/ano
-46.35	-19.22	Paranaíba	Rio Paranaíba	30/08/00	0.0200	72.00	Irrigação	Indefinido
-46.34	-19.22	Paranaíba	Rio Paranaíba	29/07/04	0.0200	72.00	Irrigação	20 horas/dia 12 meses/ano
-46.33	-19.22	Paranaíba	Rio Paranaíba	15/07/96	0.0100	36.00	Irrigação	Indefinido
-46.18	-19.22	Paranaíba	Rio Paranaíba	31/05/97	0.0020	7.20	Industrial	Indefinido
-46.45	-19.23	Paranaíba	Vazante	08/04/04	0.0236	84.96	Irrigação	21 h/dia - 12 meses/ano.
-46.43	-19.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	16/09/03	0.0279	100.44	Irrigação	21 horas/dia 12 meses/ano
-46.30	-19.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/06/95	0.0300	108.00	Irrigação	Indefinido
-46.23	-19.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	10/07/96	0.0040	14.40	Irrigação	Indefinido
-46.22	-19.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	22/05/91	0.0440	158.40	Irrigação	Indefinido

-46.17	-19.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	11/09/92	0.0590	212.40	Irrigação	Indefinido
-46.35	-19.24	Paranaíba	Rio Paranaíba	27/04/00	0.0090	32.40	Irrigação	Indefinido
-46.23	-19.24	Paranaíba	Rio Paranaíba	18/03/05	0.0530	190.80	Irrigação	Indefinido
-46.17	-19.24	Paranaíba	Rio Paranaíba	01/04/98	0.0070	25.20	Irrigação	Indefinido
-46.40	-19.26	Paranaíba	Rio Paranaíba	29/07/00	0.0015	5.40	Irrigação	Indefinido
-46.39	-19.27	Paranaíba	Rio Paranaíba	09/10/97	0.0400	144.00	Irrigação	Indefinido

B.2 Usos subterrâneos

Latitude	Longitude	Rio	Município	Data Publ.	Vazão (m³/s)	Vazão (m³/h)	Uso	Regime de Uso
-18.84	-46.79	Paranaíba	Guimarânia	19/02/05	0.0004	1.51	Industrial e Cons. Humano	20 h/dia - 12 meses/ano.
-18.86	-46.46	Paranaíba	Lagoa Formosa	07/11/01	0.0080	28.80	Irrigação	Indefinido
-18.93	-46.40	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	17/03/06	0.0016	5.60	Agroindustrial e Cons. Humano	1 h/dia - 12 meses/ano.
-18.95	-46.36	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	22/03/06	0.0008	2.90	Dess.animais e Cons. Humano	3 h e 30 minutos/dia - 12 meses/ano.
-18.99	-46.32	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	25/08/04	0.0019	6.92	Dess.animais e Cons. Humano	13 h e 45 minutos/dia - 12 meses/ano.
-18.99	-46.31	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	28/11/03	0.0014	5.00	Industrial	10 horas/dia
-18.99	-46.28	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	18/09/04	0.0006	2.00	Dess.animais e Cons. Humano	10 h por dia - 12 meses/ano
-19.00	-46.31	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	20/10/04	0.0007	2.50	Industrial	6 h/dia - 12 meses/ano.
-19.01	-46.61	Paranaíba	Cruzeiro da Fortaleza	05/04/03	0.0004	1.31	Lavagem de veículos e Cons. Humano	5 horas/dia
-19.01	-46.29	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	01/08/01	0.0011	4.00	Cons. Humano e Dess.animais	Indefinido
-19.05	-46.25	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	01/12/04	0.0002	0.80	Cons. Humano	1 h/dia - 12 meses/ano.
-19.06	-46.23	Paranaíba	Carmo do Paranaíba	14/07/04	0.0005	1.97	Lavagem de veículos e Cons. Humano	20 h/dia - 12 meses/ano
-19.08	-46.21	Paranaíba	Rio Paranaíba	01/04/04	0.0083	30.00	Irrigação	16 h/dia - 12 meses/ano.
-19.12	-46.38	Paranaíba	São Gotardo	19/09/97	0.0030	10.80	Irrigação	Indefinido
-19.12	-46.24	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/04/01	0.0004	1.50	Dess.animais	Indefinido

-19.12	-46.23	Paranaíba	Rio Paranaíba	21/04/01	0.0006	2.00	Dess.animais	Indefinido
-19.15	-46.15	Paranaíba	Rio Paranaíba	03/04/04	0.0004	1.44	Cons. Humano e Dess.animais	1 h/dia - 12 meses/ano.
-19.20	-46.24	Paranaíba	Rio Paranaíba	23/09/03	0.0004	1.40	Cons. Humano e Lavagem de veículos	3 horas/dia
-19.23	-46.16	Paranaíba	Rio Paranaíba	26/09/06	0.0018	6.40	Cons. Humano, Lavagem de veículos e agroindustrial	5 h e 15 minutos/dia - 12 meses/ano.
-18.94	-46.65	Paranaíba	Cruzeiro da fortaleza	-	0.0030	10.8	Irrigação	Indefinido
-19.00	-46.61	Paranaíba	Cruzeiro da fortaleza	-	0.0089	32.06	Irrigação	Indefinido
-19.01	-46.65	Paranaíba	Cruzeiro da fortaleza	-	0.0008	2.73	Irrigação	Indefinido
-18.94	-46.63	Paranaíba	Cruzeiro da fortaleza	-	0.0037	13.42	Irrigação	Indefinido

ANEXO C: ARQUIVO DE ENTRADA PRINCIPAL NO MODELO

- CELL.HIG -

C.1 Arquivo principal de entrada no modelo

O arquivo de entrada principal no modelo MGB-IPH contém informações sobre as células. Esse arquivo é denominado CELL.HIG e é apresentado na tabela abaixo. Cada linha corresponde a uma célula do modelo, numerada pelo valor indicado na primeira coluna; as colunas Long e Lat são as coordenadas geográficas dessa célula, longitude e latitude, respectivamente; SB é o código da bacia a que pertence a célula; área acumulada é o valor acumulado da área de drenagem de cada célula, indicada na coluna seguinte; Hmax e Hmin são, respectivamente, a altitude máxima e mínima na célula; L é o comprimento do rio na célula; S é a declividade do rio na célula; CJ é o número da célula localizada à jusante; e, P1 à P6 são as porcentagens da área da célula que correspondem a cada um dos blocos (nesse caso, são seis blocos).

Nº	Long	Lat	SB	Área acum.	Área	Hmax	Him	L	S	CJ	P1	P2	P3	P4	P5	P6
368	-46.18	-19.23	4	29.30	29.30	1148	958	0.00	0.0000	406	34.20	41.70	0.00	20.30	0.00	3.80
369	-46.58	-18.88	4	29.30	29.30	899	807	0.00	0.0000	458	17.50	55.10	0.00	26.60	0.00	0.80
370	-46.63	-19.03	4	29.30	29.30	1038	873	0.00	0.0000	412	16.50	33.70	0.00	49.30	0.00	0.50
371	-46.78	-18.88	4	29.30	29.30	1256	859	0.00	0.0000	433	24.90	17.40	4.60	41.00	11.20	1.00
372	-46.73	-19.03	4	29.30	29.30	1082	871	0.00	0.0000	422	11.20	13.40	3.90	55.00	16.00	0.60
373	-46.33	-18.98	4	29.30	29.30	1128	916	0.00	0.0000	424	34.70	35.50	0.00	28.70	0.00	1.20
374	-46.38	-18.98	4	29.30	29.30	1070	841	0.00	0.0000	409	33.20	22.50	0.00	41.40	0.00	2.90
375	-46.43	-18.88	4	29.30	29.30	949	829	0.00	0.0000	414	8.60	35.10	0.00	55.60	0.00	0.60
376	-46.43	-18.98	4	29.30	29.30	933	821	0.00	0.0000	451	10.50	57.40	0.00	32.00	0.00	0.20
377	-46.33	-19.03	4	29.30	29.30	1125	876	0.00	0.0000	421	30.60	37.30	0.00	29.30	0.00	2.80
378	-46.83	-18.93	4	29.30	29.30	1264	1140	0.00	0.0000	417	56.80	0.00	24.40	0.00	16.10	2.70
379	-46.78	-18.93	4	29.30	29.30	1260	912	0.00	0.0000	423	30.40	1.90	18.80	10.60	36.00	2.30
380	-46.63	-18.98	4	29.30	29.30	933	841	0.00	0.0000	438	11.60	46.20	0.00	40.70	0.00	1.40
381	-46.73	-18.98	4	29.30	29.30	1051	861	0.00	0.0000	432	10.40	15.70	0.00	73.20	0.40	0.20
382	-46.78	-18.98	4	29.30	29.30	1193	924	0.00	0.0000	423	17.00	1.00	17.90	2.70	60.10	1.30
383	-46.88	-18.88	4	29.30	29.30	1243	945	0.00	0.0000	444	48.40	22.90	0.80	25.20	0.10	2.60
384	-46.28	-19.03	4	29.30	29.30	1131	944	0.00	0.0000	421	35.80	48.00	0.00	13.40	0.00	2.80
385	-46.33	-18.93	4	29.30	29.30	1112	886	0.00	0.0000	424	44.00	27.00	0.80	25.70	0.40	1.90

386	-46.53	-19.18	4	29.30	29.30	1183	977	0.00	0.0000	413	24.60	0.00	46.70	0.00	26.20	2.50
387	-46.33	-19.23	4	29.30	29.30	968	852	0.00	0.0000	407	9.70	67.30	0.00	21.80	0.00	1.20
388	-46.43	-19.23	4	29.30	29.30	1030	856	0.00	0.0000	427	9.90	45.40	0.00	44.20	0.00	0.50
389	-46.18	-19.18	4	29.30	29.30	1131	909	0.00	0.0000	420	37.70	31.00	0.00	24.50	0.00	6.80
390	-46.23	-19.18	4	29.30	29.30	1140	872	0.00	0.0000	431	28.00	26.10	0.00	40.90	0.00	5.00
391	-46.48	-19.18	4	29.30	29.30	1097	877	0.00	0.0000	449	17.40	0.00	24.00	0.00	57.10	1.50
392	-46.18	-19.13	4	29.30	29.30	1136	896	0.00	0.0000	420	27.90	18.00	0.00	48.40	0.00	5.70
393	-46.68	-19.08	4	29.30	29.30	1255	934	0.00	0.0000	422	27.40	1.50	25.90	12.20	28.80	4.20
394	-46.58	-18.93	4	29.30	29.30	893	816	0.00	0.0000	457	11.70	57.10	0.00	30.00	0.00	1.20
395	-46.53	-19.08	4	29.30	29.30	1159	875	0.00	0.0000	410	18.90	26.00	8.30	28.00	17.40	1.40
396	-46.58	-19.08	4	29.30	29.30	1170	911	0.00	0.0000	411	31.00	1.80	19.30	15.20	29.80	2.80
397	-46.23	-19.08	4	29.30	29.30	1144	975	0.00	0.0000	408	34.80	43.70	0.00	18.80	0.00	2.80
398	-46.48	-19.08	4	29.30	29.30	984	837	0.00	0.0000	450	11.20	47.50	0.00	40.40	0.00	0.90
399	-46.28	-19.13	4	29.30	29.30	1120	867	0.00	0.0000	428	28.90	20.50	0.00	46.20	0.00	4.40
400	-46.48	-19.13	4	29.30	29.30	1084	873	0.00	0.0000	450	32.10	7.50	9.40	13.00	36.30	1.80
401	-46.78	-18.68	4	29.40	29.40	1166	958	0.00	0.0000	426	19.60	0.00	20.40	0.00	58.90	1.00
402	-46.83	-18.68	4	29.40	29.40	1199	1028	0.00	0.0000	426	20.10	0.00	51.90	0.00	26.20	1.80
403	-46.88	-18.73	4	29.40	29.40	1262	1079	0.00	0.0000	415	28.90	0.00	49.80	0.00	18.90	2.40
404	-46.78	-18.78	4	29.40	29.40	1113	901	0.00	0.0000	416	21.30	0.00	20.70	0.00	57.20	0.80
405	-46.78	-18.73	4	29.40	29.40	1146	959	0.00	0.0000	434	15.60	0.00	28.80	0.00	54.60	0.90
406	-46.23	-19.23	4	58.50	29.20	1150	929	6.25	0.0170	418	25.20	40.40	0.00	29.30	0.00	5.10
407	-46.38	-19.23	4	58.50	29.20	949	841	6.00	0.0036	443	12.80	56.40	0.00	30.40	0.00	0.40
408	-46.28	-19.08	4	58.60	29.30	1121	872	10.32	0.0161	428	31.20	37.30	0.00	27.80	0.00	3.70
409	-46.38	-19.03	4	58.60	29.30	1073	829	16.92	0.0067	451	19.00	47.60	0.00	32.60	0.00	0.80
410	-46.53	-19.03	4	58.60	29.30	951	839	13.08	0.0045	453	8.40	49.80	0.00	41.00	0.00	0.70
411	-46.63	-19.08	4	58.60	29.30	1166	921	11.03	0.0106	419	29.60	3.20	18.30	14.40	32.20	2.40
412	-46.58	-18.98	4	58.60	29.30	927	825	6.00	0.0039	456	9.60	45.20	0.00	44.40	0.00	0.90
413	-46.48	-19.23	4	58.60	29.30	1143	885	11.99	0.0103	427	20.10	0.00	33.40	0.00	43.90	2.60
414	-46.48	-18.88	4	58.70	29.40	916	817	7.42	0.0022	456	7.40	63.40	0.00	28.70	0.00	0.50
415	-46.93	-18.78	4	58.70	29.30	1186	927	8.62	0.0205	439	27.50	0.00	38.10	0.00	31.30	3.00
416	-46.73	-18.78	4	58.70	29.30	1078	845	6.63	0.0152	425	19.60	20.00	10.30	25.50	23.40	1.20
417	-46.83	-18.88	4	58.70	29.40	1246	949	11.50	0.0250	444	44.80	20.80	10.20	19.10	3.30	1.90
418	-46.28	-19.23	4	87.80	29.30	1148	859	12.90	0.0080	440	24.00	39.10	0.00	31.90	0.00	5.00

419	-46.58	-19.03	4	87.90	29.30	1003	849	6.00	0.0059	429	11.60	25.60	0.00	62.20	0.00	0.70
420	-46.23	-19.13	4	87.90	29.30	1145	880	6.23	0.0030	431	27.20	33.50	0.00	35.70	0.00	3.50
421	-46.33	-19.08	4	87.90	29.30	1116	848	6.00	0.0058	437	18.90	30.90	0.00	46.30	0.00	3.90
422	-46.68	-19.03	4	87.90	29.30	1032	860	6.00	0.0070	432	20.20	22.30	0.00	55.80	0.00	1.60
423	-46.73	-18.93	4	88.00	29.40	1024	832	8.01	0.0100	433	13.20	20.10	0.00	66.00	0.00	0.70
424	-46.38	-18.93	4	88.00	29.40	1068	836	10.03	0.0088	430	25.40	23.40	0.00	47.70	0.00	3.50
425	-46.68	-18.78	4	88.10	29.40	934	834	16.82	0.0036	452	12.30	54.20	0.00	32.80	0.00	0.60
426	-46.83	-18.73	4	88.10	29.30	1179	958	6.00	0.0093	434	18.80	0.00	32.50	0.00	47.00	1.80
427	-46.43	-19.18	4	117.10	29.20	984	842	9.05	0.0035	448	7.20	50.10	5.30	31.40	5.60	0.40
428	-46.33	-19.13	4	117.20	29.30	1118	845	15.49	0.0034	437	16.60	36.80	0.00	44.00	0.00	2.60
429	-46.53	-18.98	4	117.20	29.30	903	813	8.62	0.0042	456	7.80	56.60	0.00	34.80	0.00	0.80
430	-46.43	-18.93	4	117.30	29.30	931	818	13.83	0.0017	454	5.40	56.30	0.00	37.90	0.00	0.40
431	-46.28	-19.18	4	146.40	29.20	1073	853	10.02	0.0020	440	25.40	35.50	0.00	35.20	0.00	3.90
432	-46.68	-18.98	4	146.50	29.30	951	838	7.49	0.0029	435	12.40	41.00	0.00	44.80	0.00	1.80
433	-46.73	-18.88	4	146.60	29.30	943	823	6.00	0.0031	436	14.20	40.40	0.00	44.50	0.00	0.80
434	-46.83	-18.78	4	146.80	29.30	1159	887	7.33	0.0045	439	17.80	0.00	29.00	0.00	52.10	1.20
435	-46.68	-18.93	4	175.90	29.40	930	824	8.99	0.0017	438	11.30	29.40	0.00	59.00	0.00	0.30
436	-46.68	-18.88	4	176.00	29.40	902	813	10.98	0.0015	452	9.20	59.60	0.00	30.40	0.00	0.80
437	-46.38	-19.08	4	234.40	29.30	950	824	10.30	0.0023	450	12.50	57.90	0.00	28.90	0.00	0.70
438	-46.63	-18.93	4	234.50	29.30	920	820	6.00	0.0011	441	10.00	44.40	0.00	44.70	0.00	1.00
439	-46.88	-18.78	4	234.90	29.40	1217	907	6.37	0.0052	442	32.20	0.00	23.90	0.00	39.90	4.10
440	-46.33	-19.18	4	263.50	29.30	945	840	8.85	0.0021	443	10.00	57.00	0.00	31.80	0.00	1.20
441	-46.63	-18.88	4	263.90	29.40	919	810	11.76	0.0009	452	13.80	56.20	0.00	28.90	0.00	1.00
442	-46.88	-18.83	4	264.20	29.30	1035	886	8.29	0.0066	444	25.70	14.20	12.80	17.50	28.60	1.20
443	-46.38	-19.18	4	351.40	29.40	925	834	8.49	0.0011	448	10.80	60.10	0.00	28.40	0.00	0.80
444	-46.83	-18.83	4	381.60	29.40	1031	864	6.64	0.0035	445	34.30	14.30	9.90	16.40	23.40	1.80
445	-46.78	-18.83	4	410.90	29.30	1028	834	8.24	0.0035	446	23.60	18.20	5.70	34.60	16.60	1.30
446	-46.73	-18.83	4	440.20	29.30	937	820	7.60	0.0021	447	15.60	39.70	1.80	41.00	0.80	1.10
447	-46.68	-18.83	4	469.60	29.40	897	810	8.83	0.0015	452	15.60	45.40	0.00	38.00	0.00	1.00
448	-46.38	-19.13	4	497.80	29.30	927	829	6.03	0.0008	449	10.20	60.60	0.00	28.60	0.00	0.70
449	-46.43	-19.13	4	556.30	29.20	933	828	6.00	0.0035	450	11.90	51.60	1.40	30.50	3.90	0.60
450	-46.43	-19.08	4	878.60	29.30	902	823	8.56	0.0004	451	13.90	48.80	0.00	35.80	0.00	1.50
451	-46.43	-19.03	4	995.90	29.40	901	822	8.68	0.0001	453	14.70	50.50	0.00	33.90	0.00	0.90

452	-46.63	-18.83	4	1026.80	29.20	909	807	15.50	0.0002	458	14.80	47.00	0.00	36.60	0.00	1.60
453	-46.48	-19.03	4	1083.80	29.30	914	822	6.00	0.0001	454	8.70	56.00	0.00	34.60	0.00	0.60
454	-46.48	-18.98	4	1230.40	29.30	905	810	9.08	0.0017	455	10.40	58.00	0.00	30.00	0.00	1.60
455	-46.48	-18.93	4	1259.70	29.30	901	809	6.00	0.0008	456	6.60	63.70	0.00	29.10	0.00	0.60
456	-46.53	-18.93	4	1523.60	29.40	881	807	10.00	0.0003	457	11.80	47.20	0.00	39.60	0.00	1.30
457	-46.53	-18.88	4	1582.20	29.30	895	807	10.16	0.0001	458	10.00	55.60	0.00	33.20	0.00	1.20
458	-46.58	-18.83	4	2667.70	29.40	889	807	6.00	0.0001	937	11.90	54.90	0.00	31.60	0.00	1.60

ANEXO D: RESUMO ANUAL DAS ANÁLISES DOS POSTOS PLUVIOMÉTRICOS

- DADOS CONSISTIDOS -

D.1 – Período de calibração

Postos	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
01845004.txt	f	f	f	f	f	p	c	c	p	c	p	c	c	p	c	c	c	p
01845014.txt	p	c	f	f	p	c	p	p	p	c	c	p	c	c	p	p	p	p
01846002.txt	c	c	c	c	c	c	c	c	c	p	p	c	c	c	c	c	p	p
01846003.txt	c	p	p	c	c	p	p	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c
01846004.txt	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01846005.txt	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01846006.txt	f	f	f	f	f	p	p	c	c	c	c	c	c	c	c	p	c	c
01846017.txt	p	c	f	f	p	c	p	c	p	c	c	c	c	p	c	c	c	c
01846019.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01847008.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
01945002.txt	p	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	p
01945013.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
01946004.txt	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	p	c	c
01946005.txt	c	p	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01946007.txt	c	c	c	c	p	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01946008.txt	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	p
01946009.txt	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	p
01946018.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
01947006.txt	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c

Convenção:

c – dados completos (ano sem falhas)

p – dados parcialmente completos (com falhas em pelo menos 5 meses)

f – dados com falhas (com falhas em mais de 5 meses)

D.2 – Período de verificação/aplicação

Postos	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
01845004.txt	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01845014.txt	c	c	c	c	p	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01846002.txt	p	c	f	f	f	f	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01846003.txt	c	c	c	p	c	p	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	c	f
01846004.txt	p	c	p	c	p	f	f	f	f	c	c	p	c	c	c	c	c	f
01846005.txt	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	f
01846006.txt	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	f	c	c	c	c	c	c
01846017.txt	c	c	c	p	c	p	c	c	c	c	p	c	p	c	c	c	c	c
01846019.txt	p	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	f
01847008.txt	f	f	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	f
01945002.txt	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c
01945013.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f
01946004.txt	p	c	c	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	f
01946005.txt	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01946007.txt	p	c	p	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01946008.txt	f	c	p	f	f	c	p	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
01946009.txt	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c
01946018.txt	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	f	c	c	c	c	c	c
01947006.txt	p	c	c	c	c	c	p	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	f

Convenção:

c – dados completos (ano sem falhas)

p – dados parcialmente completos (com falhas em pelo menos 5 meses)

f – dados com falhas (com falhas em mais de 5 meses)

**ANEXO E: CARACTERÍSTICAS DOS DADOS E RELAÇÃO
DOS POSTOS CLIMATOLÓGICOS**

E.1 Dados climatológicos de entrada no modelo MGB-IPH

A quantidade de postos com informações climatológicas é escassa na bacia em estudo; além disso, os poucos postos existentes, cuja localização é mostrada na tabela e na Figura E.1, apresentam curto período com dados. Dessa forma, para entrada no modelo, são utilizadas as médias mensais dos postos para cada uma das variáveis climatológicas necessárias.

Tabela E.1: Localização geográfica dos postos climatológicos.

Código	Nome	Latitude	Longitude
32334	ARAXÁ	-19°38'24''	-46°58'12''
32357	CALDAS NOVAS	-17°43'12''	-48°36'36''
32505	PARACATU	-17°15'00''	-46°52'48''

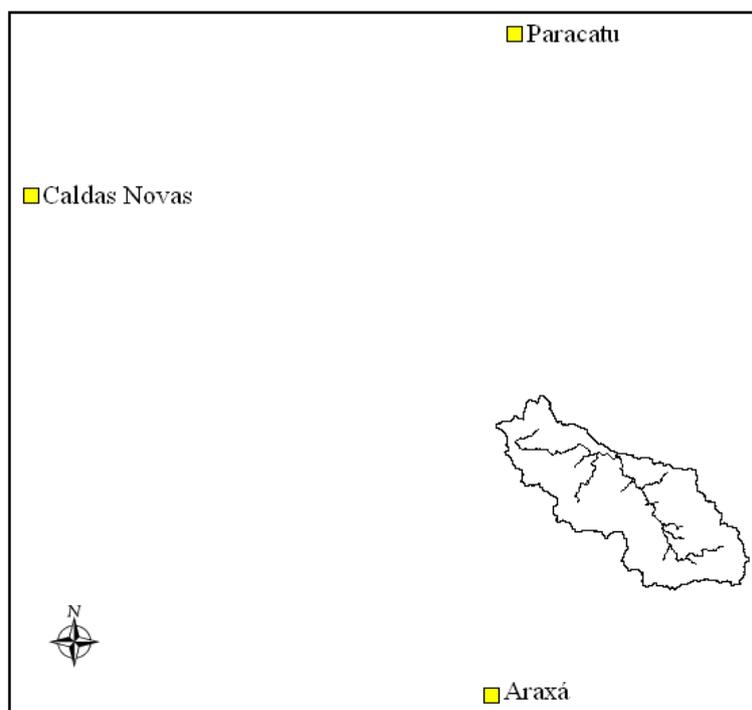


Figura E.1: Localização dos postos climatológicos.

As tabelas e os gráficos a seguir apresentam os valores médios mensais das variáveis climatológicas para cada uma das estações. Os valores em fonte itálica referem-se às estações em que, por falta de dados, foi utilizada a média mensal de todos os outros postos. Os gráficos permitem verificar a coerência entre os valores das variáveis climatológicas para a região da bacia.

(i) Temperatura (°C)

Estação	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Araxá	21,90	21,90	21,90	21,40	18,60	18,10	17,90	19,70	21,00	22,10	21,40	21,70
Caldas Novas	24,80	24,90	24,60	24,60	22,40	21,50	21,80	23,50	25,20	26,00	24,70	24,70
Paracatu	23,50	23,70	23,10	22,00	19,50	17,60	17,70	19,30	21,90	23,50	23,30	23,40

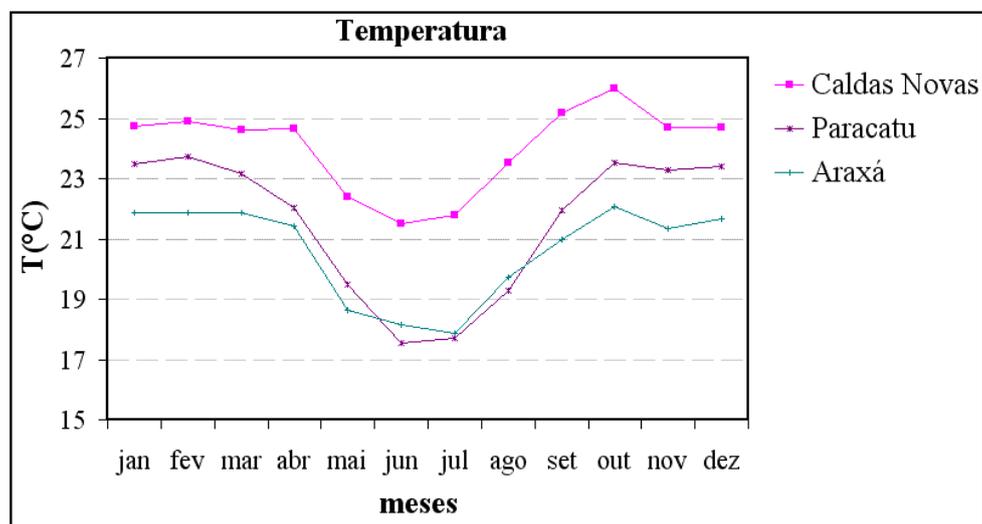


Figura E.2: Médias mensais das temperaturas nos postos climatológicos.

(ii) Umidade relativa do ar (%)

Estação	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Araxá	83,80	81,50	81,70	73,90	71,30	67,00	62,20	55,50	58,50	66,00	82,10	83,50
Caldas Novas	79,70	78,90	80,40	71,60	68,30	61,20	56,00	46,00	52,20	60,90	75,50	78,90
Paracatu	83,90	82,10	84,90	82,00	80,30	78,60	74,20	67,90	66,00	69,30	81,60	83,40

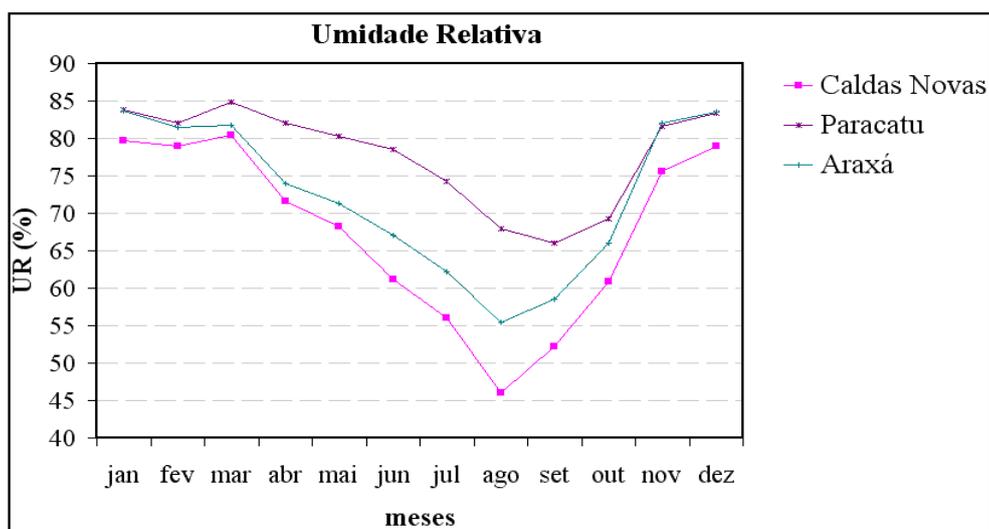


Figura E.3: Médias mensais da umidade relativa nos postos climatológicos.

(iii) Vento (m/s)

Estação	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Araxá	4,80	4,40	4,20	4,40	4,70	5,00	5,30	5,80	5,80	5,40	4,80	4,90
Caldas Novas	5,50	5,10	4,80	3,47	3,67	4,07	5,40	5,60	5,50	5,80	5,00	5,40
Paracatu	3,00	2,90	2,90	2,90	2,90	3,20	3,30	3,60	3,80	3,50	3,30	3,00

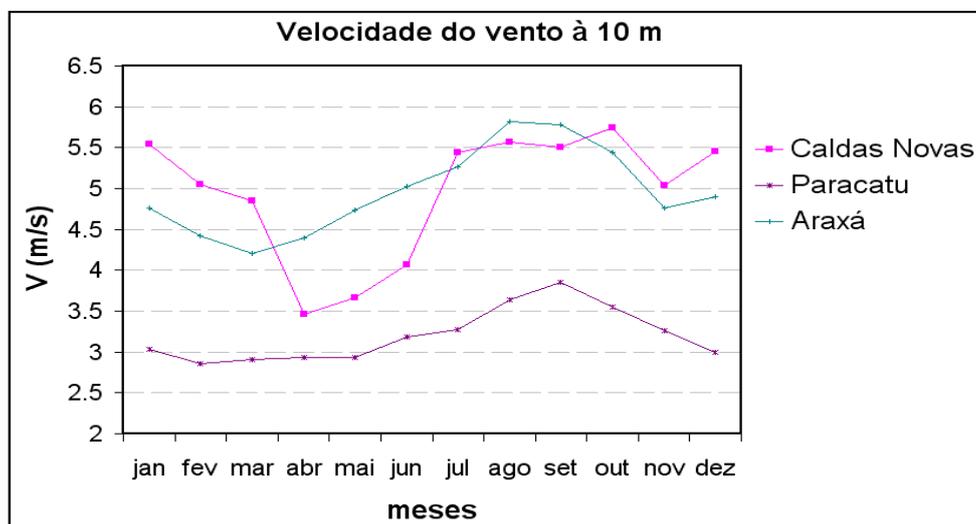


Figura E.4: Médias mensais dos ventos à 10 m nos postos climatológicos.

Na Figura E.5, é mostrada a rosa dos ventos na estação Araxá para dados de janeiro de 2001 à dezembro de 2006, e, como se observa, os ventos na região ocorrem predominantemente no sentido leste-oeste. Na figura, os percentuais indicam probabilidades de ocorrência das velocidades de vento indicadas na legenda, sendo de maior probabilidade os ventos com velocidade entre 3,6-5,7 m/s no sentido leste-oeste.

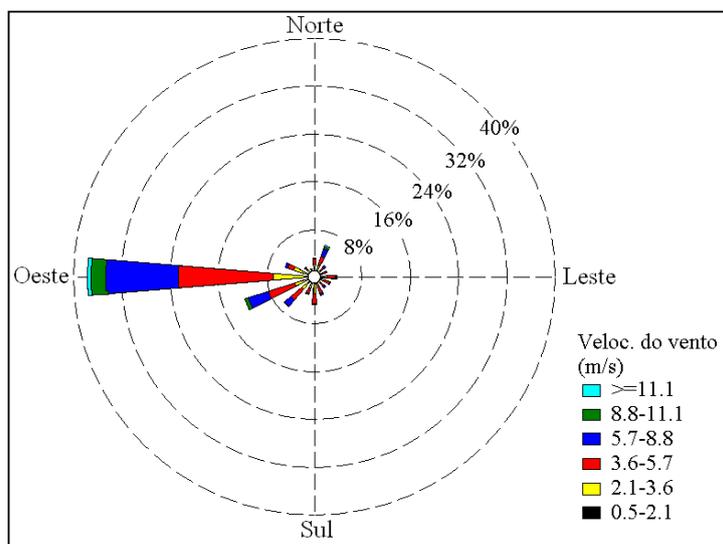


Figura E.5: Rosa dos ventos na estação de Araxá.

(iv) Pressão (kPa)

Estação	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Araxá	90,00	89,90	89,60	89,70	89,80	90,00	90,00	89,90	89,70	89,60	89,80	90,10
Caldas Novas	93,20	93,30	93,30	93,40	93,60	93,80	93,80	93,70	93,50	93,30	93,20	93,20
Paracatu	90,90	90,90	90,80	90,90	91,07	91,23	91,23	91,17	91,00	90,83	90,83	90,90

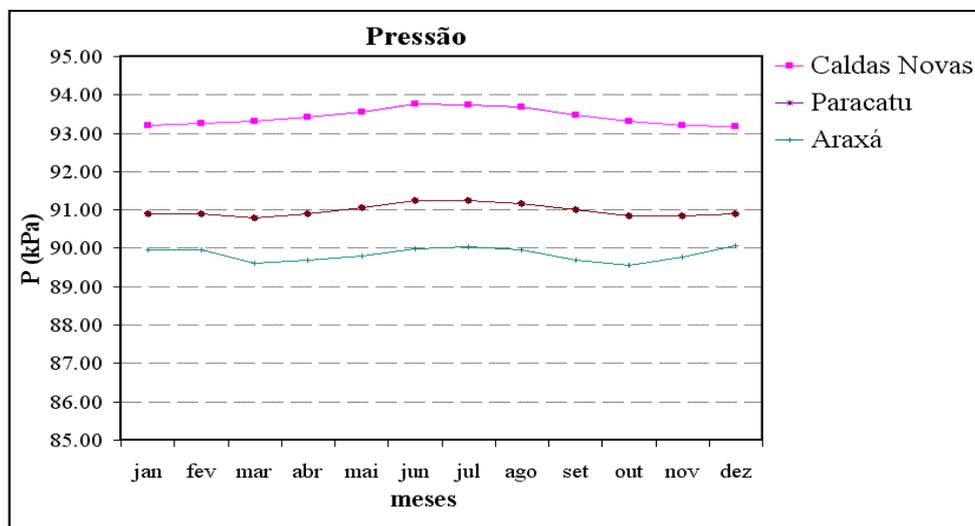


Figura E.6: Médias mensais das pressões nos postos climatológicos.

(v) Radiação solar global (MJ/m²/dia)

Estação	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Araxá	18,40	19,90	18,10	18,60	16,50	15,50	16,10	18,80	20,10	20,30	18,20	19,20
Caldas Novas	14,60	15,20	14,20	13,90	12,20	12,70	11,90	13,60	14,30	14,70	14,20	14,30
Paracatu	18,90	19,40	18,10	19,10	17,60	17,10	17,70	20,60	21,60	21,40	18,30	18,20

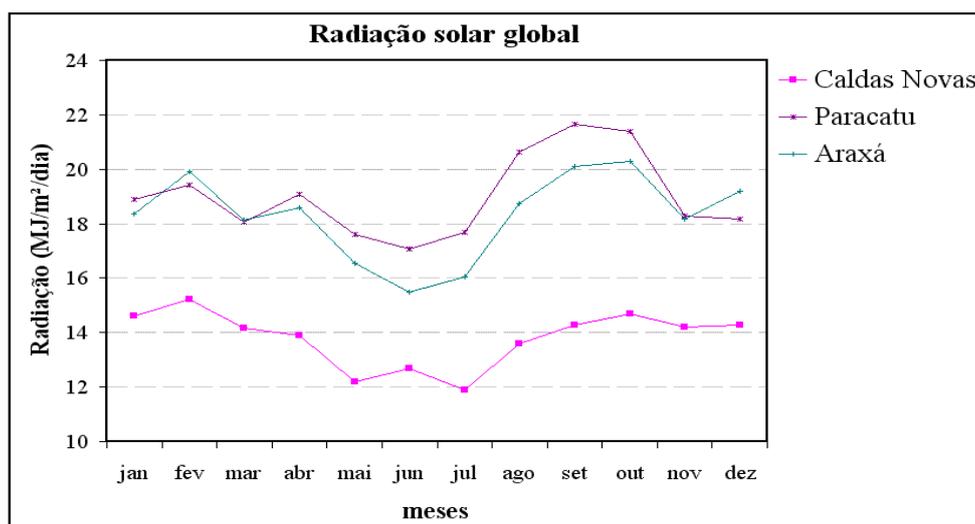
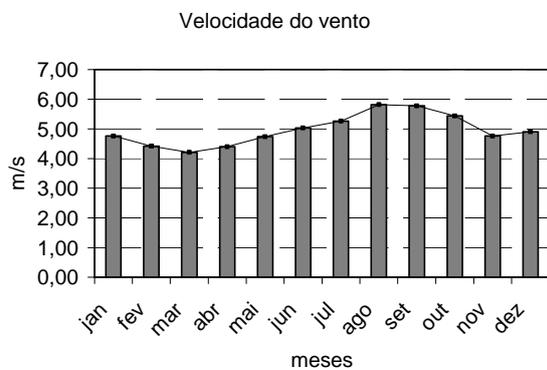
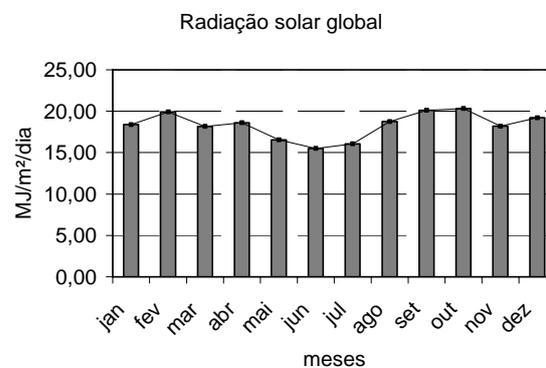
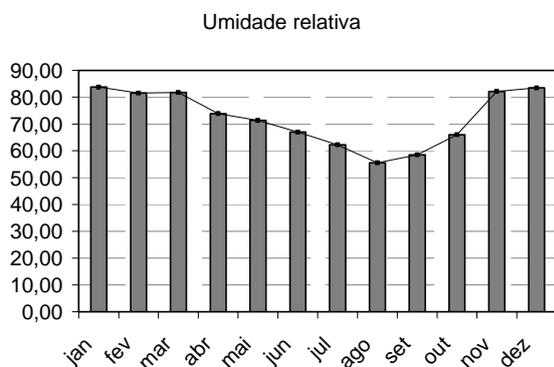
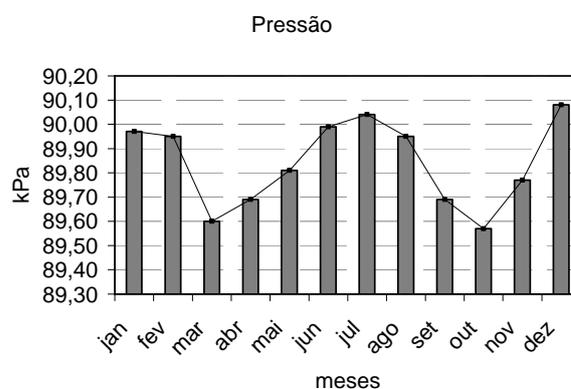
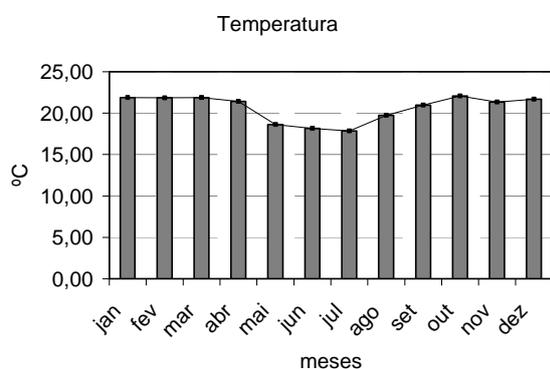


Figura E.7: Médias mensais da radiação solar global nos postos climatológicos.

E.1 Posto climatológico Araxá

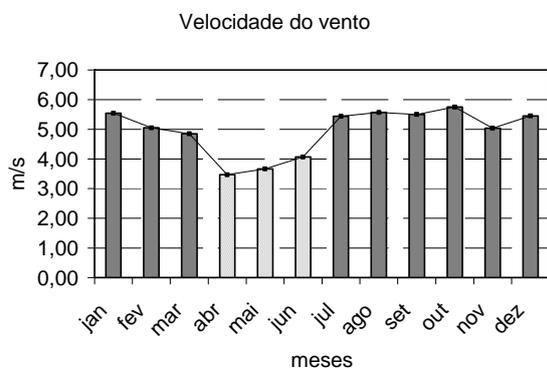
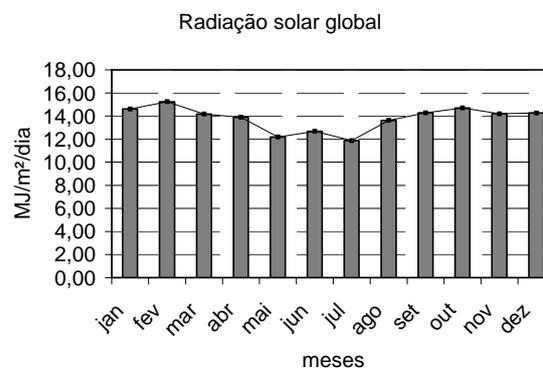
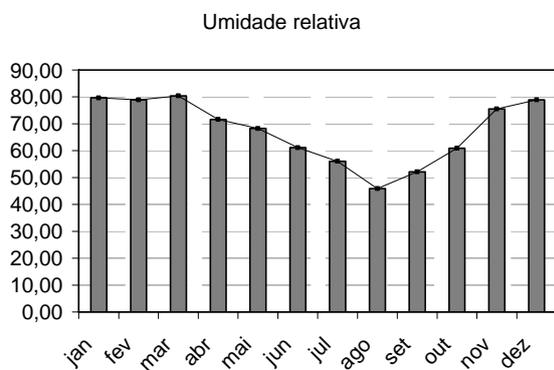
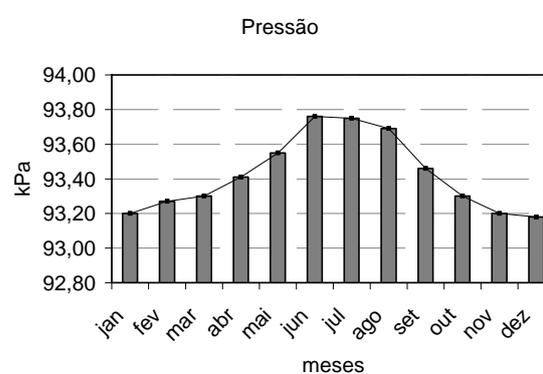
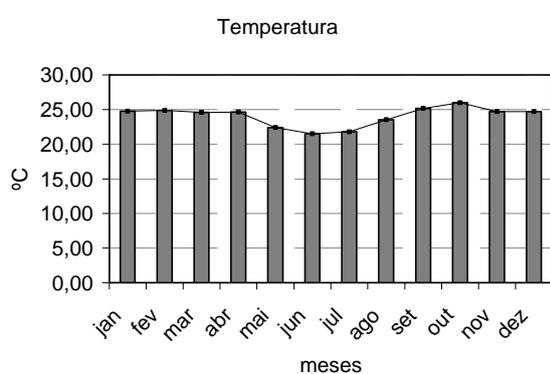
Nome da estação	Araxá
Código Cptec	32334
Tipo de estação	Meteorológica
Período de dados	2001 à 2006
Estado	Minas Gerais
Município	Araxá
Latitude	-19°38'24''
Longitude	-46°58'12''



- as barras preenchidas em cinza indicam dados existentes;
- as barras preenchidas em pontilhado indicam valores médios dos meses.

E.2 Posto climatológico Caldas Novas

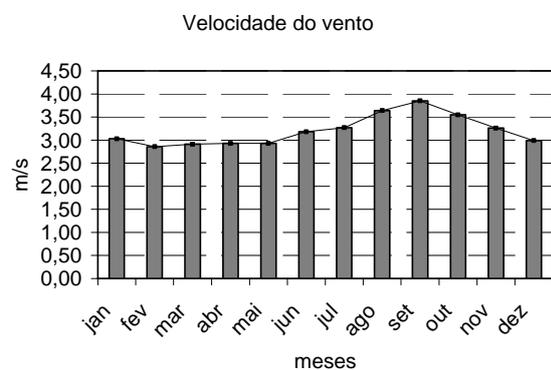
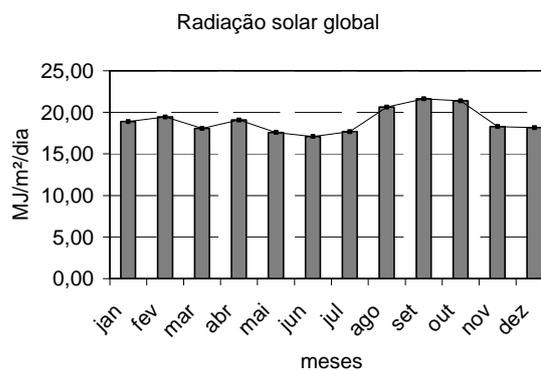
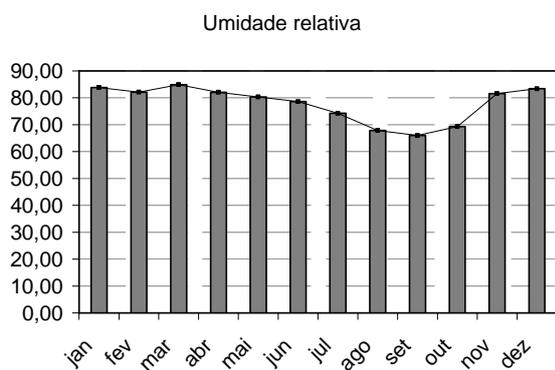
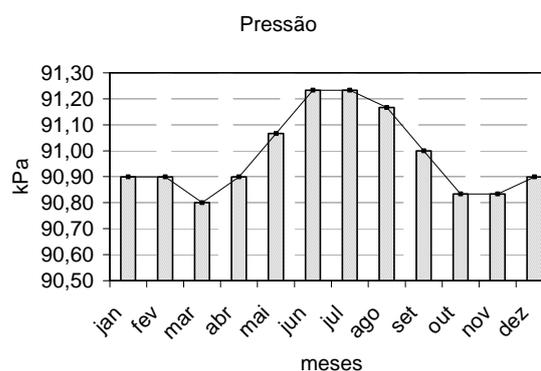
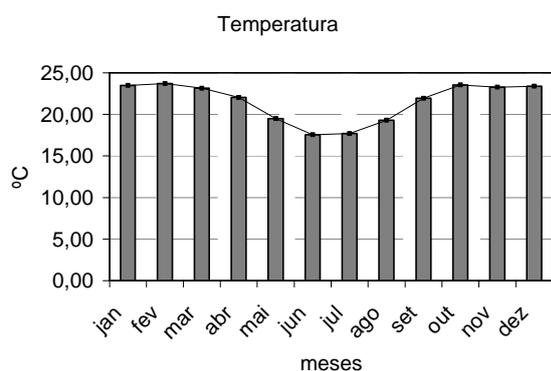
Nome da estação	Caldas Novas
Código Cptec	32357
Tipo de estação	Meteorológica
Período de dados	1999 à 2006
Estado	Goiás
Município	Caldas Novas
Latitude	-17°43'12''
Longitude	-48°36'36''



- as barras preenchidas em cinza indicam dados existentes;
- as barras preenchidas em pontilhado indicam valores médios dos meses.

E.3 Posto climatológico Paracatu

Nome da estação	Paracatu
Código Cptec	32505
Tipo de estação	Meteorológica
Período de dados	1997 à 2006
Estado	Minas Gerais
Município	Paracatu
Latitude	-17°15'00''
Longitude	-46°52'48''



- as barras preenchidas em cinza indicam dados existentes;
- as barras preenchidas em pontilhado indicam valores médios dos meses.

**ANEXO F: VALORES DOS PARÂMETROS FIXOS
USADOS NO MODELO**

ANEXO G: RESULTADO DAS COMBINAÇÕES DE RETIRADA DE ÁGUA

(ii) Redução na $Q_{7,10}$ em percentual

		Outorga superficial							
		Q7,10							
		0%	30%	50%	70%	80%	90%	100%	
Outorga subterrânea	Recarga	0%	0,00%	-29,38%	-50,36%	-68,80%	-78,38%	-86,96%	-93,07%
		4,95%	-21,06%	-50,46%	-71,06%	-87,92%	-95,79%	97,89%	-100,0%
		9,54%	-41,60%	-70,85%	-90,17%	-97,89%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		13,61%	-62,25%	-89,46%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		16,82%	-80,66%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		18,40%	-91,37%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%

*com relação a $Q_{7,10}$ antes das retiradas.

G.2 Simulações para bacias com média capacidade de regularização subterrânea – bacia do Alto Rio Paranaíba ($CB=3.000$ horas).

Retiradas durante o período seco

(i) Redução na $Q_{7,10}$ em valor absoluto (m^3/s)

		Outorga superficial							
		Q7,10							
		0%	30%	50%	70%	80%	90%	100%	
Outorga subterrânea	Recarga	0,00%	8,40	5,89	4,21	2,55	1,83	1,15	0,48
		10,00%	6,92	4,41	2,73	1,28	0,59	0,00	0,00
		20,00%	5,45	2,94	1,42	0,08	0,00	0,00	0,00
		30,00%	4,03	1,57	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
		39,26%	2,77	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		48,04%	1,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		55,77%	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		58,36%	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(ii) Redução na $Q_{7,10}$ em percentual

		Outorga superficial							
		Q7,10							
		0%	30%	50%	70%	80%	90%	100%	
Outorga subterrânea	Recarga	0,00%	0,00%	-29,90%	-49,83%	-69,59%	-78,16%	-86,32%	-94,32%
		10,00%	-17,65%	-47,55%	-67,46%	-84,81%	-92,97%	-100,0%	-100,0%
		20,00%	-35,12%	-65,02%	-83,14%	-99,04%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		30,00%	-52,05%	-81,27%	-97,48%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		39,26%	-67,01%	-94,76%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		48,04%	-80,54%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		55,77%	-91,12%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		58,36%	-94,34%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%

*com relação a $Q_{7,10}$ antes das retiradas.

	84,92%	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	86,42%	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(ii) Redução na $Q_{7,10}$ em percentual

		Outorga superficial							
		Q7,10							
		0%	30%	50%	70%	80%	90%	100%	
Outorga subterrânea	Recarga	0,00%	0,00%	-29,91%	-49,80%	-69,74%	-79,31%	-88,06%	-94,95%
		10,00%	-9,76%	-39,66%	-59,56%	-79,04%	-87,58%	-95,40%	-98,88%
		20,00%	-20,20%	-50,12%	-70,00%	-87,73%	-95,53%	-99,19%	-99,53%
		30,00%	-31,38%	-61,29%	-80,52%	-96,21%	-99,24%	-99,71%	-100,0%
		40,00%	-43,21%	-73,13%	-90,45%	-99,24%	-99,71%	-100,0%	-100,0%
		50,00%	-55,47%	-84,69%	-99,38%	-99,94%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		59,27%	-66,95%	-94,81%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		68,35%	-78,00%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		77,05%	-88,37%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
		84,92%	-97,04%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%
86,42%	-98,57%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%	-100,0%		

*com relação a $Q_{7,10}$ antes das retiradas.