

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO
SUBTERRÂNEO DAS ÁGUAS NA PORÇÃO
SUDOESTE DA BACIA REPRESENTATIVA DE
JUATUBA

Rossana Cristina Vasconcellos Soares

Belo Horizonte
2010

**CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO
SUBTERRÂNEO DAS ÁGUAS NA PORÇÃO
SUDOESTE DA BACIA REPRESENTATIVA DE
JUATUBA**

Rossana Cristina Vasconcellos Soares

Rossana Cristina Vasconcellos Soares

CARACTERIZAÇÃO DO FLUXO SUBTERRÂNEO DAS ÁGUAS NA PORÇÃO SUDOESTE DA BACIA REPRESENTATIVA DE JUATUBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Linha de pesquisa: Modelagem de Processos Hidrológicos – armazenamento e escoamento em meios porosos.

Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro, PhD.

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2010

Para Raimundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais essa etapa vencida. Sem a inspiração, persistência, amor e principalmente fé doados a mim por Ele não poderia concretizar esta obra científica.

Ao meu esposo e engenheiro David Veiga Soares, companheiro em minha vida acadêmica e profissional, contribuindo sempre ao meu crescimento em nossas discussões técnicas e sendo exemplo de disciplina e busca por aprendizagem.

Ao meu pai e engenheiro Raimundo Nonato de Vasconcellos, a minha mãe Vera Lúcia Ferreira de Vasconcellos e meus irmãos, que com muito amor me ensinaram os valores que hoje tenho, como a família, a ética e a persistência. Sem o desafio lançado por meu pai não teria tido tanto empenho em concluir com êxito mais essa etapa.

Ao amigo Marcos Machado Drumond, que aceitou minha ajuda em seus projetos e muito me ensinou, mesmo quando não mais estava sob sua orientação no CDTN. A partir de seu exemplo e curiosidade sobre a pesquisa experimental é que foi despertado em mim o interesse por conhecer mais sobre os processos hidrológicos na bacia de Juatuba.

Ao professor Celso de Oliveira Loureiro, por sua orientação acadêmica e amizade, me ensinando pacientemente em suas disciplinas, esclarecendo minhas dúvidas de forma objetiva e possibilitando minha confiança no trabalho desenvolvido.

Não deixo de lembrar dos amigos da Golder, que me auxiliaram muito nos trabalhos de campo e produtos desenvolvidos: João Alves da Silva Filho, Marcus Dilascio, Ivan Soares Loutfi, Márcio Figueiredo Resende, Celmo Aparecido Ferreira e Samantha Barriga Dias.

Ao amigo e grande profissional Rinaldo Afrânio Fernandes, que compartilhou diversas vezes sua experiência na apresentação de soluções e caminhos para o desenvolvimento dos estudos hidrogeológicos. Aos profissionais do CPRM, Éber José de Andrade Pinto, e do CDTN, Paulo César Horta Rodrigues, por disponibilizarem informações essenciais ao desenvolvimento dos trabalhos e a Otávio e sua família, por me acompanharem no levantamento de dados primário e acolherem sempre com a mesa farta em Mateus Leme.

Agradeço também aos amigos de sempre, Karina, Sabrina, Patrícia, Ed, Mari e Fet, onde sempre existiu companheirismo e motivação.

RESUMO

O estudo da circulação hídrica subterrânea é de fundamental importância na gestão integrada dos recursos hídricos e a inclusão das reservas subterrâneas nos sistemas de gestão representa um desafio nos dias atuais. O objetivo dos estudos aqui descritos foi a caracterização dos recursos hídricos subterrâneos na porção sudoeste da Bacia Representativa de Juatuba em termos de distribuição, ocorrência, hidrodinâmica, reservas e interação com as águas superficiais e com o uso e ocupação dos solos. Para tal foi realizada a identificação da geologia, do clima, da morfologia, dos tipos de solos e de cobertura vegetal da bacia. A determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos principais litotipos presentes na área, assim como o estabelecimento do modelo hidrogeológico conceitual também foram realizados. A bacia do ribeirão Mato Frio, sub-bacia da Bacia Representativa de Juatuba, está localizada a oeste do Quadrilátero Ferrífero, inserida no Complexo Granito-Gnaissico Belo Horizonte, onde os tipos de solo mais frequentes são os Latossolos e Argissolos. Os principais lineamentos de fratura que possibilitam a contribuição de águas mais profundas ao escoamento superficial estão presentes no córrego dos Caboclos (N-S) e no ribeirão Mato Frio (NW-SE). As taxas de recarga na bacia variam em torno de 18% da precipitação, infiltrando até o lençol freático por trechos não saturados que variam entre 5 m nas cotas inferiores e 20 m nas áreas mais altas da bacia, contribuindo às reservas dos aquíferos livres e seguindo ao meio fraturado. A espessura média dos aquíferos livres presentes no meio poroso varia entre 30 e 40 m. No trecho de transição do pacote poroso às rochas fraturadas, onde os espaços para circulação e armazenamento da água subterrânea encontram-se aumentados, os fluxos ocorrem de forma mista e a produtividade hidrogeológica é considerável. A partir da localização das estações limimétricas a bacia do ribeirão Mato Frio foi dividida em seis sub-bacias, sendo que a vazão específica de 15,03 L/s/km² varia nas sub-bacias com forte relação ao uso do solo. Os coeficientes de recessão encontrados para as sub-bacias 1, 2, 3 e 4 estão próximos a 0,01 1/dia, para a sub-bacia 5 em torno de 0,005 1/dia e para a sub-bacia 6 alcançou valor próximo a 0,02 1/dia. As faixas de variação da recarga e da restituição dos aquíferos ao escoamento base nos anos 2007 e 2008, representativas para avaliação prévia das reservas renováveis, estão entre 2.620.000 e 5.580.000 m³. A partir dos resultados alcançados foi proposta uma malha de monitoramento hidrogeológico composta por medidores de nível de água para o meio poroso e piezômetros para coleta de informações sobre o meio fraturado. Os dados coletados deverão ser de caráter quali-quantitativo. A rede de monitoramento proposta deverá ser implantada gradualmente, e com a avaliação dos dados obtidos, será possível melhorar o modelo conceitual e também o próprio monitoramento.

ABSTRACT

The study of underground water movement is of fundamental importance in the integrated management of water resources and nowadays, the inclusion of this kind of water resources in any water managements systems represents a considerable challenge. The characterization of groundwater resources in the southwestern segment of the Juatuba Representative basin is presented in this dissertation in terms of distribution, occurrence, hydrodynamics, reserves and interaction with surface water and soil use. It begins with the identification of geology, climate, morphology, types of soils and vegetation of the basin. Hydrodynamic parameters of the main rock types present in the study area, as well as the establishment of the conceptual model were also determinate. The Mato Frio basin is located west of the Iron Quadrangle, included in the granite-gneiss Belo Horizonte complex, where soil types are the most frequent are Oxisol soil and Ultisol soil. The major fracture lineaments that enable the contribution of deeper water to runoff are present in the stream of Caboclos (N-S) and in Mato Frio river (NW-SE). Recharge rates in the basin vary around 18% of the precipitation, descending to the ground water by unsaturated parts ranging from 5 m and 20 m in the higher areas of the basin, contributing to the reserves of unconfined and following fractures of bedrock. The average thickness of the free aquifers present in the pore space varies between 30 and 40 m. In the transitional section of the package fractured and porous rocks, where space for storage and movement of groundwater are increased, flows occur in mixed form and hydrogeological potential is considerable. The basin was separated into six sub-basins from the location of monitoring stations. The specific flow in the basin is 15,03 L/s/km², which varies in the sub-basins with strong relation to land use. The recession coefficients found for the sub-basins 1, 2, 3 and 4 are close to 0,01 1/day, around 0,005 1/day for sub-basin 5, and reached a value close to 0,02 1/day for sub-basin 6. Variation's rates of recharge and recovering from aquifers to baseflow, according to years 2007 and 2008, are between 2,62 million and 5,58 million cubic meters in the basin of river Mato Frio - preliminary evaluation to renewable ground water reserve. The hydrogeologic monitoring net was based this results achieved in study and composed for wells to porous medium and piezometers in fractured medium. The data of net must be obtained to qualitative and quantitative methods. The tracking network proposal should be implemented gradually, after analyze the data, both conceptual model and the monitoring can be improved.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 JUSTIFICATIVA.....	4
4 METODOLOGIA.....	7
4.1 <i>Caracterização física</i>	7
4.1.1 Geologia.....	7
4.1.2 Geomorfologia.....	8
4.1.3 Pedologia, uso do solo e cobertura vegetal.....	8
4.2 <i>Caracterização Hidroclimatológica</i>	10
4.2.1 Clima.....	11
4.2.2 Pluviometria	11
4.2.3 Fluviometria	12
4.3 <i>Caracterização Hidrológica</i>	12
4.3.1 Morfometria	12
4.3.2 Curva de Recessão da Hidrógrafa	14
4.3.3 Componentes do Balanço Hídrico.....	15
4.4 <i>Caracterização Hidrogeológica</i>	17
4.4.1 Condutividade Hidráulica	17
4.4.2 Descarga dos Aquíferos e Variação do Nível de Água Subterrânea.....	18
4.4.3 Compilação de Estudos Hidroquímicos e Isotópicos Anteriores.....	18
4.5 <i>Modelo Hidrogeológico Conceitual</i>	20
4.6 <i>Modelo Hidrogeológico Computacional</i>	21
5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA	23

5.1	<i>Localização</i>	23
5.2	<i>Geologia</i>	26
5.2.1	Geologia Regional	26
5.2.1.1	Litologia	29
5.2.1.2	Geologia Estrutural.....	30
5.2.2	Geologia Local	31
5.3	<i>Demais Aspectos do Meio Físico</i>	37
5.3.1	Geomorfologia.....	37
5.3.2	Pedologia.....	41
5.3.3	Uso do Solo e Cobertura Vegetal	55
5.4	<i>Aspectos Hidroclimatológicos</i>	58
5.4.1	Malha de Monitoramento Hidrometeorológico.....	58
5.4.2	Clima.....	65
5.4.3	Pluviometria	66
5.4.4	Fluviometria	73
5.5	<i>Características Hidrológicas</i>	76
5.5.1	Análise da Morfométrica da Bacia	76
5.5.2	Curva de Recessão da Hidrógrafa	78
5.5.3	Componentes do Balanço Hídrico.....	83
6	<i>Caracterização Hidrogeológica</i>	88
6.1	<i>Condutividade Hidráulica</i>	90
6.2	<i>Descarga dos Aquíferos e Variação do Nível de Água Subterrânea</i>	92
6.2.1	Nascentes Sub-Bacia 1.....	95
6.2.2	Nascentes Sub-Bacia 2.....	95
6.2.3	Nascentes Sub-Bacia 3.....	96
6.2.4	Nascentes Sub-Bacia 4.....	96
6.2.5	Nascentes Sub-Bacia 5.....	97

6.2.6	Nascentes Sub-Bacia 6.....	98
6.2.7	Nascentes Interbacia	98
6.3	<i>Compilação de Estudos Hidroquímicos e Isotópicos Anteriores</i>	99
7	MODELO HIDROGEOLOGICO	105
7.1	<i>Modelo Hidrogeológico Conceitual</i>	105
7.1.1	Regime de Descarga das Águas Subterrâneas.....	106
7.1.2	Recarga dos Aquíferos.....	111
7.2	<i>Modelo Hidrogeológico Computacional</i>	114
7.2.1	Domínio de Cálculo.....	114
7.2.2	Condições de Contorno.....	115
7.2.3	Parâmetros Hidrogeológicos	118
7.2.4	Calibração do Modelo.....	121
7.3	<i>Avaliação da Disponibilidade Hídrica Subterrânea</i>	125
8	PROGRAMA DE MONITORAMENTO – UMA PROPOSTA.....	129
8.1	<i>Definição dos Objetivos do Monitoramento</i>	131
8.2	<i>Distribuição Espacial dos Pontos de Monitoramento</i>	132
8.3	<i>Parâmetros a serem Monitorados</i>	137
8.4	<i>Frequência da Coleta de Dados no Monitoramento</i>	138
9	CONCLUSÕES	139
10	RECOMENDAÇÕES	143
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
	APÊNDICE I – REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	148
	APÊNDICE II – PERFIL CONSTRUTIVO – PIEZÔMETRO.....	166

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Guia para Grupamento de Classes de Textura (EMBRAPA, 2005).....	9
FIGURA 4.2 – Deslocamento da Curva de Recessão e Estimativa de Recarga ΔQ	14
FIGURA 5.1 – Localização da Bacia de Juatuba e da Bacia do Ribeirão Mato Frio.....	24
FIGURA 5.2 – Bacia do Ribeirão Mato Frio e Sub Bacias	25
FIGURA 5.3 – Mapa Regional do Cráton São Francisco Evidenciando o Quadrilátero Ferrífero	26
FIGURA 5.4 - Estereograma com Pontos Levantados em Campo	33
FIGURA 5.5 – Projeção Estereográfica dos Bandamentos, Juntas e Planos de Cisalhamento Observados nos Afloramentos	33
FIGURA 5.6 – Junta no Afloramento da Serra dos Caboclos.....	34
FIGURA 5.7 – Fraturas na Sub-Bacia 5	34
FIGURA 5.8 – Faixa de Quartzito Presente na Zona de Cisalhamento da Sub-Bacia 4.....	35
FIGURA 5.9 – Seções Geológicas na Bacia do Ribeirão Mato Frio.....	36
FIGURA 5.10 – Vales de Fundo Chato -Sub-Bacia 1 e Estruturas Dômicas -Serra dos Caboclos	38
FIGURA 5.11 – Mapa de Declividades	39
FIGURA 5.12 – Leitões Irregulares com Lajedos e Blocos na Sub-Bacia 2.....	40
FIGURA 5.13 – Localização dos Pontos Utilizados na Caracterização Pedológica.....	43
FIGURA 5.14 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J1.1	44
FIGURA 5.15 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J1.2.....	44
FIGURA 5.16 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J2.1	44
FIGURA 5.17 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J3.1	45
FIGURA 5.18 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J4.1	45
FIGURA 5.19 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J5.1	45
FIGURA 5.20 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J6.1	46
FIGURA 5.21 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J7.1	46
FIGURA 5.22 – Uso do Solo e Cobertura Vegetal da Bacia do Ribeirão Mato Frio.....	57
FIGURA 5.23 – Malha de Monitoramento na Bacia do Ribeirão Mato Frio	64
FIGURA 5.24 – Temperaturas Médias Mensais do Ar Registradas na Estação Climatológica de Serra Azul (2044054) – Período 1987 a 2008.....	65
FIGURA 5.25 – Temperaturas Médias Mensais do Ar Registradas na Estação Climatológica de Alto da Boa Vista (2044021) – Período 1972 a 2008.....	66
FIGURA 5.26 – Histograma de Dados de Precipitação Disponíveis nas Estações Pluviométricas na Bacia Representativa de Juatuba	67
FIGURA 5.27 – Distribuição das Precipitações Médias Mínimas e Máximas Mensais Registradas nas Estações Seleccionadas	68

FIGURA 5.28 – Média das Precipitações Médias Mensais Registradas nas Estações Seleccionadas e Precipitações Médias Mensais na Estação Fazenda Laranjeiras	69
FIGURA 5.29 – Precipitações Totais Médias Anuais Registradas nas Estações Seleccionadas...	69
FIGURA 5.30 – Totais Anuais de Precipitações Registradas nas Estações Seleccionadas	70
FIGURA 5.31 – Distribuição das Precipitações Médias Mensais Registradas nas Estações Localizadas no Ribeirão Mato Frio	71
FIGURA 5.32 – Totais Mensais e Precipitações Médias Registrados nas Estações Localizadas no Ribeirão Mato Frio	71
FIGURA 5.33 – Áreas de Influência Utilizadas no Cálculo da Média de Thiessen	72
FIGURA 5.34 – Histograma de Dados de Vazão Disponíveis nas Estações fluviométricas Instaladas na Bacia Representativa de Juatuba	73
FIGURA 5.35 – Série Histórica das Estações Fluviométricas Seleccionadas para Caracterização do Regime de Vazões na Bacia Representativa de Juatuba... ..	74
FIGURA 5.36 – Série Histórica das Estações Fluviométricas Instaladas na Bacia do Ribeirão Mato Frio	75
FIGURA 5.37 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 01	78
FIGURA 5.38 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 02	79
FIGURA 5.39 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 03	79
FIGURA 5.40 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 04	80
FIGURA 5.41 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 05	80
FIGURA 5.42 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 06	81
FIGURA 5.43 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Bacia Ribeirão Mato Frio.....	81
FIGURA 5.44 – Evolução da Nuvem de Trítio no Lote JT-4 – Cabeceira da Bacia do Ribeirão Mato Frio	84
FIGURA 5.45 – Evolução da Nuvem de Trítio no Lote JT-11 – Exutório da Bacia do Ribeirão Mato Frio	85
FIGURA 5.46 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 1 – J1.1	85
FIGURA 5.47 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 2 – J2.1	86
FIGURA 5.48 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 3 – J3.1	86
FIGURA 5.49 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 4 – J4.1	86
FIGURA 5.50 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 5 – J5.1	87
FIGURA 5.51 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 6 – J6.1	87

FIGURA 6.1 – Mobilidade das Nascentes Inventariadas na Bacia do Ribeirão Mato Frio	93
FIGURA 6.2 – Cotas das Nascentes na Bacia do Ribeirão Mato Frio	94
FIGURA 6.3 – Variação Piezométrica – PZ 4 – Fazenda Laranjeiras	94
FIGURA 6.4 – Variação Espacial do Potencial Hidrogeniônico Medidos <i>in situ</i> - pH	101
FIGURA 6.5 – Variação Espacial dos Íons de Na e Cl e sua Relação com a Condutividade Elétrica.....	102
FIGURA 6.6 – Variação Espacial dos Íons de Manganês e Ferro	103
FIGURA 6.7 – Variação Espacial dos Elementos Móveis e da Sílica	104
FIGURA 7.1 – Vazões Médias Mensais nas Estações Fluviográficas Monitoradas na Bacia do Ribeirão Mato Frio	107
FIGURA 7.2 – Áreas Preferenciais de Recarga – Relação com o Relevo e Cobertura Vegetal.....	113
FIGURA 7.3 – Configuração do Domínio de Cálculo no Plano Horizontal.....	116
FIGURA 7.4 – Configuração do Domínio de Cálculo no Plano Vertical – Corte na Coordenada UTM N7.778.350	116
FIGURA 7.5 – Distribuição das Recargas no Modelo Computacional	117
FIGURA 7.6 – Distribuição dos Valores Atribuídos de Condutividade Hidráulica	120
FIGURA 7.7 – Resultado da Calibração do Modelo Computacional.....	121
FIGURA 7.8 – Direção dos Vetores de Velocidade de Fluxo – Planta.....	123
FIGURA 7.9 – Direção dos Vetores de Velocidade de Fluxo (Exagero Vertical 1:2) – Corte na Coordenada UTM N 7.778.350.....	123
FIGURA 7.10 – Linhas Equipotenciais de Carga Hidráulica da Área em Estudo.....	124
FIGURA 8.1 – Malha de Monitoramento Hidrogeológica Proposta.....	136

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Classificação das Declividades Segundo a EMBRAPA (1999).....	8
TABELA 5.1 – Distribuição das Declividades na Área de Estudo	38
TABELA 5.2 – Variação da Altimetria em Cada Sub-Bacia.....	41
TABELA 5.3 – Classes de Textura e Grupo Textural nos Furos de Sondagem	47
TABELA 5.4 – Características Gerais e Morfológicas dos Perfis de Solo.....	49
TABELA 5.5 – Espécies do Cerrado.....	56
TABELA 5.6 – Distribuição dos Usos do Solo em Porcentagem das Áreas de Drenagem de Cada Sub-Bacia.....	58
TABELA 5.7 – Estações Pluviométricas e Meteorológicas na Bacia de Juatuba.....	60
TABELA 5.8 – Estações Fluviométricas na Bacia Representativa de Juatuba.....	61
TABELA 5.9 – Estações Linimétricas na Bacia do Ribeirão Mato Frio	62
TABELA 5.10 – Características dos Vertedores de Monitoramento Fluviométrico na Bacia do Ribeirão Mato Frio	62
TABELA 5.11 – Equação dos Vertedores das Seções de Monitoramento Fluviométrico na Bacia do Ribeirão Mato Frio	63
TABELA 5.12 – Estações Pluviográficas Localizadas na Bacia do Ribeirão Mato Frio.....	63
TABELA 5.13 – Totais Anuais Médios nos Anos Civil e Hidrológico das Sub-Bacias do Ribeirão Mato Frio	72
TABELA 5.14 – Vazões Específicas das Estações Fluviométricas Seleccionadas	73
TABELA 5.15 – Vazões Específicas das Estações Fluviométricas Seleccionadas	75
TABELA 5.16 – Características Morfométricas da Área em Estudo.....	77
TABELA 5.17 – Coeficientes de Recessão na Bacia do Ribeirão Mato Frio.....	82
TABELA 5.18 – Valores de Infiltração Pontual nas Seis Sub-Bacias do Ribeirão Mato Frio – Ano Hidrológico de 2006/ 2007.....	87
TABELA 6.1 – Valores Representativos de Condutividade Hidráulica.....	90
TABELA 6.2 – Relação Condutividade Hidráulica e Classes de Textura.....	91
TABELA 6.3 – Tempos de Renovação das Águas e Concentrações de ¹⁸ O	100
TABELA 7.1 – Distribuição Espacial dos Valores de Recarga na Bacia do Ribeirão Mato Frio (ano civil 2008).....	112
TABELA 7.2 – Distribuição Espacial dos Valores de Recarga na Bacia do Ribeirão Mato Frio (junho/07 a junho/08).....	117
TABELA 7.3 – Armazenamento Específico e Porosidade Total e Efetiva	118
TABELA 7.4 – Confronto entre Valores Medidos e Calculados de Carga Hidráulica.....	122
TABELA 7.5 – Confronto entre Valores Medidos e Calculados de Vazão.....	122
TABELA 7.6 – Volumes Aportados ao Aquífero pelas Recargas e Restituídos aos Cursos de Água nos Períodos de Estiagem	126

TABELA 8.1 – Localização dos Pontos de Monitoramento Propostos.....	133
TABELA 8.2 – Parâmetros de Monitoramento Propostos e Limites Legais por Usos Preponderantes da Água	137

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual do Brasil os investimentos em pesquisa e monitoramento dos recursos hídricos estão aquém do necessário para garantir um gerenciamento eficiente desse bem natural. Observa-se que, até mesmo em empreendimentos onde a água é considerada insumo nos processos produtivos, não existe ainda o conhecimento suficiente de sua variabilidade no tempo e no espaço.

De um modo geral, no ciclo hidrológico, a água subterrânea tem sua origem na superfície e está intimamente ligada à água superficial. Devido ao fato de a interligação hidrológica entre as duas parcelas ocorrer de forma complexa e de existir a tendência de compartimentação de sistemas complexos para estudar os fenômenos naturais, as pesquisas usualmente são direcionadas ou às águas superficiais ou às águas subterrâneas.

Cleary (1989) considera que o fato de o tempo de residência da água subterrânea no subsolo ser muitas vezes superior ao tempo de residência da água nos rios, aliado à existência de uma enorme capacidade de armazenamento de água nos aquíferos, torna a água subterrânea uma reserva confiável a longo prazo, essencialmente imune às flutuações anuais de precipitação. Tal conclusão significa também que um aquífero poluído pode levar séculos, ou mais tempo, para conseguir promover uma autodescontaminação através de mecanismos de fluxo natural.

O monitoramento sistemático em bacias hidrológicas representativas, como, por exemplo, o trabalho em curso na bacia de Juatuba (UFMG, 2008), é de grande valia quando se pretende quantificar as disponibilidades hídricas de uma região. Segundo Lanna (1983), citado em Goldenfum (2001), *“o objetivo da instrumentação de bacias representativas é a obtenção de dados típicos da região homogênea a que pertencem, permitindo a fundamentação de estudos que resultam em um melhor conhecimento dos processos hidrológicos atuantes. As observações em bacias representativas devem ser efetuadas durante períodos longos de tempo e em combinação com estudos climáticos, pedológicos, geológicos e hidrogeológicos, visando, entre outros, pesquisas básicas – estudos detalhados de processos físicos, químicos e/ou biológicos dentro do ciclo hidrológico; e a determinação dos efeitos de mudanças naturais (ou, eventualmente, mudanças nas práticas de cultivo e uso do solo) no regime hidrológico – mudanças no clima, na vegetação ou no solo”*.

A regionalização das informações obtidas em bacias representativas pode ser elaborada para funções estatísticas de variáveis hidrológicas, para parâmetros de modelos hidrológicos como características do hidrograma unitário, e para funções específicas que relacionam variáveis como curva de regularização, curva de infiltração e curva de permanência. Na regionalização de funções que relacionam variáveis hidrológicas, pode ser usada a regionalização dos parâmetros de uma função matemática ajustada aos dados de cada posto e ainda a regressão entre as características físicas e climáticas e a variável utilizada na adimensionalização da função dos diferentes postos (TUCCI, 1993).

As informações sobre a qualidade, usos da água, capacidade de armazenamento, exploração e recarga dos aquíferos são componentes essenciais para o entendimento, proteção e otimização do recurso hídrico subterrâneo. Apesar disto, a questão do monitoramento das águas subterrâneas no Brasil ainda é insipiente e o aprimoramento das redes existentes de monitoramento de águas subterrâneas (em termos de qualidade e quantidade) deve ser um trabalho contínuo e participativo, a fim de atender a novas demandas e aos objetivos propostos (DIAS *et al.*, 2008).

Ressalta-se que um monitoramento direcionado somente à hidrologia de superfície não é suficiente para a caracterização hídrica de uma determinada região, seja o foco dos estudos uma bacia representativa ou uma bacia com potencial de conflito de uso das águas. O monitoramento adequado para o gerenciamento integrado dos recursos hídricos deve incluir ainda o acompanhamento da variação dos níveis e da qualidade das águas nos aquíferos, possibilitando a determinação do fluxo das águas no subsolo, o armazenamento subterrâneo e ainda as áreas de recarga e os exutórios das águas subterrâneas.

Segundo Cabral (2006), o uso das águas subterrâneas tende a aumentar com o aumento das demandas de água, o comprometimento e poluição das águas de superfície, o melhor conhecimento dos aquíferos e o aprimoramento das empresas de perfuração de poços.

Um dos grandes problemas ambientais nos países desenvolvidos associado ao uso da agricultura irrigada é a contaminação de águas subterrâneas devido à percolação da água de rios poluídos para os aquíferos adjacentes (LIMA, 2007). Neste contexto, a caracterização dos fluxos subterrâneos e de sua interação com o uso do solo é importante para que tal contaminação seja evitada e, caso venha a ocorrer, as medidas de mitigação sejam implementadas prontamente e de maneira eficiente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral dos estudos aqui apresentados consistiu na caracterização dos recursos hídricos subterrâneos da porção sudoeste da Bacia Representativa de Juatuba, em termos de distribuição, ocorrência, hidrodinâmica, reservas e interação com as águas superficiais e com o uso e ocupação dos solos.

Os objetivos específicos estão relacionados a seguir:

- 1) Coletar, interpretar e disponibilizar informações básicas sobre o meio físico, integrando os estudos específicos já realizados para a área de interesse e executando estudos complementares de caráter multidisciplinar;
- 2) Definir um modelo hidrogeológico conceitual para o sistema em estudo, e ajustar uma ferramenta computacional de análise (modelo hidrogeológico computacional) para auxiliar na descrição detalhada do comportamento hidrodinâmico das águas subterrâneas, assim como na quantificação das reservas;
- 3) Avaliar a disponibilidade hídrica subterrânea; e,
- 4) Propor um programa de monitoramento hidrogeológico para a área em estudo.

3 JUSTIFICATIVA

Na conjuntura do Decênio Hidrológico Internacional (1966-1975) promovido pela UNESCO, o qual continua, até hoje, sob a denominação de “Programa Hidrológico Internacional – PHI”, o Governo Brasileiro, através do extinto Departamento de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, escolheu a bacia do rio Juatuba para representar, do ponto de vista hidrológico, a região central do estado de Minas Gerais.

A adoção de bacias representativas e a delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas permitem a identificação de áreas com comportamento similar, de forma que possibilitem a transferência de informações de um local para outro. Assim, a escassez de dados hidrológicos é combatida com a otimização das informações disponíveis, através de um conjunto de ferramentas que buscam explorar ao máximo estas informações, visando à estimativa de variáveis hidrológicas em locais sem dados (TUCCI, 1993).

A então denominada Bacia Representativa de Juatuba, escolhida pelo fato de ter características como formação geológica, cobertura vegetal, relevo e expressão ocupacional semelhantes à região central de Minas Gerais (DNAEE, 1981), recebeu os primeiros postos de monitoramento no início da década de 70, os quais foram complementados no decorrer dos diversos estudos e trabalhos acadêmicos já realizados. Os dados disponíveis na bacia de Juatuba constituem o melhor conjunto de informações hidrológicas de pequenas bacias atualmente disponíveis no estado (DRUMOND, 2004) e têm contribuído significativamente para o conhecimento dos recursos hídricos nesta região.

Dentre os diversos projetos desenvolvidos na bacia de Juatuba, para os quais o objetivo geral foi estudar o comportamento das águas superficiais na bacia, foram identificados trabalhos relacionados com a determinação de variáveis hidrológicas, vazões de enchentes e modelagem hidrológica de fluxo superficial (DNAEE, 1981; Drumond, 2004; CDTN, 2008; Maia *et al.*, 2006).

A malha de monitoramento em operação na Bacia Representativa de Juatuba contempla duas estações climatológicas, 14 estações pluviométricas, sendo seis delas equipadas com pluviógrafos, e 15 estações fluviométricas, das quais cinco estão equipadas com linígrafos. Recentemente dois projetos de pesquisa ampliaram e modernizaram a rede de monitoramento existente na bacia de Juatuba, os quais foram aprovados no âmbito do edital de Bacias

Representativas da FINEP e foram executados pelo CDTN/CNEN e pela parceria entre a UFMG e o sistema CPRM/ANA (UFMG, 2008). A partir desses projetos, foram incluídas leituras contínuas da variação do nível de água subterrâneas, além do refinamento do monitoramento na porção sudoeste da bacia de Juatuba, mais especificamente na bacia do ribeirão Mato Frio, onde foram realizados estudos de separação de escoamentos e quantificação das parcelas de infiltração no balanço hídrico.

Os dados de monitoramento disponíveis, assim como os resultados dos estudos de separação de escoamentos e de balanço hídrico de sua porção sudoeste, representam uma contribuição significativa ao conhecimento do comportamento hídrico subterrâneo da Bacia Representativa de Juatuba. A curva de recessão da hidrógrafa é de grande importância na hidrogeologia, permitindo a avaliação da magnitude do armazenamento de água subterrânea nos aquíferos superficiais que interagem com a drenagem superficial (CPRM, 2008) e os volumes escoados pelos exutórios dos aquíferos. Por sua vez, as alturas de infiltração que não são absorvidas pelas raízes das plantas e estão quantificadas nos estudos de balanço hídrico representam a recarga dos reservatórios subterrâneos.

O conhecimento da circulação hídrica subterrânea é de fundamental importância na gestão integrada dos recursos hídricos e a inclusão da reserva subterrânea como alternativa de suprimento total ou parcial das demandas de água representa um desafio nos dias atuais. As demandas crescentes dos diversos usos e as restrições de qualidade impostas por eles conferem uma maior necessidade de implementação da Lei Federal Nº 9.433, que estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

Dessa forma, para que os estudos voltados à hidrogeologia possam contribuir para a gestão integrada dos recursos hídricos é necessária a caracterização da ocorrência e da distribuição espacial e temporal do recurso hídrico subterrâneo, de suas fragilidades em termos de impactos negativos e de suas interações com as águas superficiais e com o uso e ocupação dos solos. Tais caracterizações devem focar as águas subterrâneas tanto como fonte potencial estratégica no atendimento integral ou parcial das demandas de água para os diversos usos, quanto como agente de manutenção das vazões naturais dos cursos de água, ou ainda como meio de dispersão de poluentes e contaminantes pelos reservatórios subterrâneos.

Nesse contexto, optou-se por realizar a integração, consistência e tratamento dos dados e estudos existentes, assim como a execução de estudos complementares de caráter multidisciplinar, que permitam promover um conhecimento mais amplo a respeito das águas subterrâneas e um avanço expressivo no conhecimento do comportamento hídrico da Bacia Representativa de Juatuba.

Considerando que os estudos anteriores de separação de escoamentos e detalhamento na quantificação das parcelas do balanço hídrico estão disponíveis para a porção sudoeste da bacia Representativa de Juatuba, e que a escala da bacia do ribeirão Mato Frio é mais adequada à realização dos estudos propostos, foi esta a porção selecionada para caracterização da hidrodinâmica subterrânea e de sua interação com as águas superficiais e com o uso e ocupação dos solos.

Além disso, a opção de se escolher uma área de ocorrência de aquíferos de comportamento não granular é justificada pelo fato de que cerca de 70% do território de Minas Gerais é coberto por rochas-reservatório desta natureza (CETEC, 1983a).

O aplicativo computacional *Visual-Modflow* (GUIGUER & FRANZ, 1998), elaborado pela Waterloo Hydrogeologic, foi selecionado para a simulação da hidrodinâmica subterrânea. Tal ferramenta possibilita a simulação do comportamento hidrodinâmico tridimensional dos aquíferos, admitindo a existência de unidades hidroestratigráficas distintas, e permite ainda apropriar os componentes hidrológicos e as condições de contorno do sistema (cursos de água, principais talvegues, poços, taxas de recarga e outros), possibilitando a representação mais aproximada dos elementos reais descritos no modelo hidrogeológico conceitual.

A ferramenta computacional *Visual-Modflow* foi escolhida para a aplicação do modelo matemático por se tratar de um aplicativo exhaustivamente utilizado em estudos de fluxo subterrâneo e de transporte de poluentes no solo, possibilitando sua aplicação como ferramenta de gerenciamento integrado dos recursos hídricos e dos riscos envolvidos com a super exploração e contaminação dos aquíferos.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para a condução deste estudo foi elaborada levando-se em conta as informações existentes e disponíveis. A revisão bibliográfica ocorreu ao longo de todas as etapas do trabalho, considerando os métodos aplicáveis à caracterização hidrogeológica em pequenas bacias e os estudos existentes da região de interesse. Detalhes da metodologia são citados na descrição dos resultados alcançados em cada item.

4.1 Caracterização física

4.1.1 Geologia

A princípio foram levantadas as imagens e fotos aéreas disponíveis para a fotointerpretação geológica, onde os principais lineamentos estruturais foram identificados. As bases geológicas e topográficas existentes também foram analisadas, assim como as informações sobre a litologia, geologia estrutural, os tipos de solo, cobertura vegetal e uso do solo. As atividades de campo focaram a confirmação e a complementação das características físicas da área em estudo descrita nos estudos anteriores.

A confirmação dos resultados da fotointerpretação efetivou-se a partir da observação da rede hidrográfica, as feições estruturais e os principais litotipos e seus contatos. Os principais aspectos estruturais foram identificados a partir do manto intemperizado exposto nos cortes das estradas, na Serra dos Caboclos e ao longo das drenagens.

As fraturas (falhas e juntas) foram tomadas em campo a partir da medição com bússola das atitudes, as quais referenciam espacialmente esses planos a partir dos ângulos de mergulho e orientação da direção. O ângulo de mergulho é aquele formado com o plano horizontal perpendicularmente a sua direção, que por sua vez é a orientação da linha de interseção do plano de fratura com o plano horizontal em relação ao norte.

As atitudes das principais estruturas levantadas em campo geraram os estereogramas. Nos estereogramas, onde o plano de referencia é o hemisfério inferior, os planos de mergulhos comuns são agrupados em famílias. Cada família de planos é representada por uma curva de interseção com o hemisfério de referência.

4.1.2 Geomorfologia

Os estudos sobre a gênese e a evolução das formas de relevo do Quadrilátero Ferrífero e o Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais serviram como base para a análise, numa escala regional, dos aspectos físicos da área de estudo. Tais referências possibilitaram que a escala regional adotada para a caracterização geomorfológica fosse o Embasamento Cristalino.

A topografia da bacia do ribeirão Mato Frio em formato digital e com curvas de nível de 20 em 20 metros foram disponibilizadas pelo CDTN/CNEN e utilizados para a formulação do modelo digital. O modelo digital foi utilizado como entrada para geração do mapa de declividade e mapa de altitude. A imagem de declividade gerada apresenta valores reais e é do tipo contínua. As classes de declividades foram separadas em seis intervalos distintos (Tabela 4.1), sugeridos pela EMBRAPA (1999).

TABELA 4.1 – Classificação das Declividades Segundo a EMBRAPA (1999)

Declividades	Discriminação
0 a 3	Relevo Plano
3 a 8	Relevo Suavemente Ondulado
8 a 20	Relevo Ondulado
20 a 45	Relevo Fortemente Ondulado
45 a 75	Relevo Montanhoso
> 75	Relevo Escarpado

4.1.3 Pedologia, uso do solo e cobertura vegetal

A síntese das informações sobre as características dos solos, realizada por Drumond (2004), e os levantamentos cartográficos sistemáticos realizados desde a década de 60 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA formam uma base de dados satisfatória para a caracterização regional da área em estudo. A classificação dos solos a nível regional, obtida na revisão bibliográfica, foi comprovada pela análise dos dados disponíveis de granulometria (DRUMOND, 2004 e CDTN, 2008) e pelos horizontes expostos em cortes de estrada e em leitos de drenagem. As informações referentes às formas de relevo e seus processos de formação também foram utilizadas na caracterização pedológica da bacia do ribeirão Mato Frio.

A análise dos dados de distribuição granulométrica e profundidade dos furos de sondagem permitiram identificar os grupamentos texturais, as classes de textura e de profundidade dos solos e ainda calcular atributos diagnósticos. A análise das diferentes combinações das frações de areia, silte e argila para determinação das classes de textura foi obtida com o auxílio do Triângulo Textural (Figura 4.1).

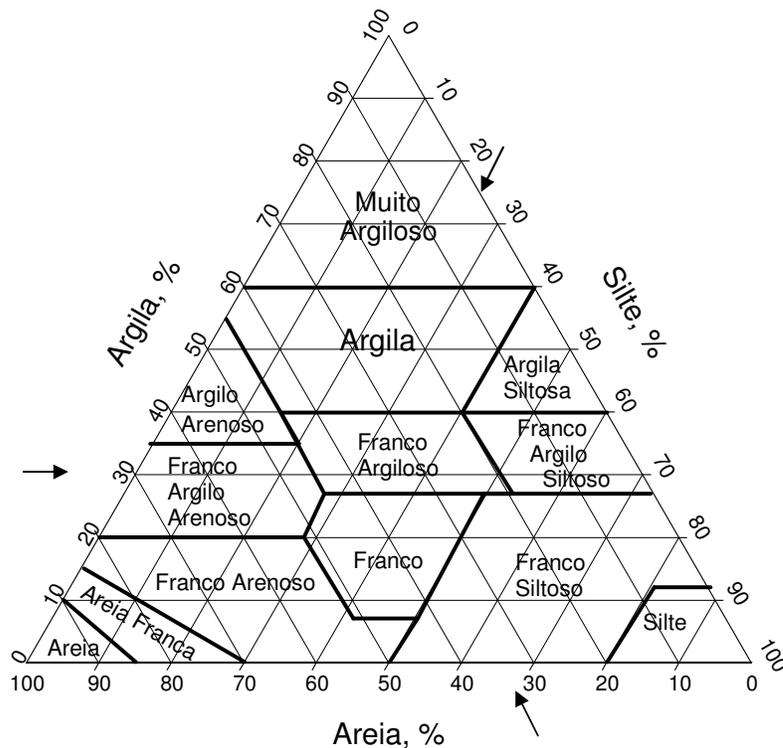


FIGURA 4.1 - Guia para Grupamento de Classes de Textura (EMBRAPA, 2005)

Os atributos diagnósticos de relação silte/ argila, relação textural e caráter argilúvico foram utilizados para separação de classes nos diversos níveis categóricos do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos e na definição de alguns horizontes diagnósticos.

A relação silte/argila é calculada dividindo-se os teores de silte pelos de argila em uma mesma amostra de solo. Tal relação é empregada em solos de textura franco arenosa ou mais fina e indica maiores índices de intemperismo (baixos teores de silte) quando apresenta, na maior parte do horizonte B, valor inferior a 0,7 nos solos de textura média ou inferior a 0,6 nos solos de textura argilosa ou muito argilosa. Essa característica é utilizada para diferenciar horizonte B Latossólico (solo mais intemperizado) de B Incipiente, principalmente para solos cujo

material de origem pertence ao cristalino, como as rochas gnáissicas da área em estudo (EMBRAPA, 1999).

Por sua vez, a relação textural representa a quantificação do incremento de argila do horizonte superficial (horizonte A) para o horizonte B dos solos. É calculada pela divisão do teor médio de argila total do B (excluído o BC) pelos teores médios de A. Considera-se no cálculo da média aritmética dos teores de argila em B uma espessura de até 30 cm se a espessura em A for menor que 15 cm ou o dobro da espessura de A se esta for igual ou maior que 15 cm. A relação textural é utilizada para diferenciar os horizontes sub-superficiais B Nítico e B Textural (maior incremento de argila em B) (IBGE, 2007).

O caráter argilúvico é empregado para possibilitar a separação de classes no 2º nível categórico e distinguir solos que têm concentração de argila no horizonte B, expressa por gradiente textural (B/A) igual ou maior que 1,4 (IBGE, 2007).

Quanto ao uso do solo e cobertura vegetal, a caracterização consultada na bibliografia foi comprovada nos trabalhos de campo e os arquivos georreferenciados disponibilizados pelo CDTN foram adequados para formulação de um mapa de distribuição dessas características na bacia em estudo.

4.2 Caracterização Hidroclimatológica

Quanto aos aspectos hidroclimatológicos foram identificadas sete estações de registro contínuo de nível de água e quatro estações pluviográficas na área em estudo. As estações linigráficas, dotadas de sondas (modelo Dipper-TEC, da SEBA) de registro de nível de água, condutividade e temperatura das águas, registram as vazões no exutório da bacia do ribeirão Mato Frio (estação Fazenda Laranjeiras) e em outros seis pontos localizados nos exutórios de seus principais afluentes, dividindo a bacia do ribeirão Mato Frio em seis sub-bacias com área de drenagem variando entre 0,8 e 2,4 km². A área localizada entre as sub-bacias foi nomeada como interbacias (1,6 km²).

Os dados das estações linigráficas e pluviográficas, assim como dados de temperatura e umidade relativa do ar das estações climatológicas instaladas na Bacia Representativa de Juatuba, foram compilados para a caracterização do clima, análise da distribuição temporal e espacial das precipitações e regime de vazões da área de interesse.

4.2.1 Clima

Para a caracterização regional do clima foi adotada a classificação segundo Köppen. Na caracterização da pluviometria em termos de distribuição espacial e temporal, tanto ao longo dos anos quanto nos meses do ano hidrológico, as estações com série de dados descontínuas e inferiores a 20 anos, ou com grande parte dos dados em período divergente ao de monitoramento das demais estações, foram excluídas da análise na escala da Bacia Representativa de Juatuba.

4.2.2 Pluviometria

Por sua vez, os dados das quatro estações pluviográficas localizadas na bacia do ribeirão Mato Frio foram organizados e compilados. Um método apropriado para preenchimento de falhas nas séries históricas é o de regressão linear (TUCCI *et al.*, 2001). As falhas dos dados diários de chuva foram preenchidas utilizando o método da regressão linear conforme a seguinte prioridade:

- preenchimento da série da estação PG-02 com os dados da estação PG-01 (fator de correlação igual a 0,96);
- preenchimento da série da estação PG-04 com os dados da estação PG-03 (fator de correlação igual a 0,89);
- preenchimento da série da estação PG-03 com os dados da estação PG-04 (fator de correlação igual a 0,85);
- preenchimento da série da estação PG-03 com os dados da estação PG-01 (fator de correlação igual a 0,83); e,
- preenchimento da série da estação PG-04 com os dados da estação PG-01 (fator de correlação igual a 0,93).

Analisando os dados de precipitação das estações pluviográficas instaladas na bacia do ribeirão Mato Frio observou-se que o comportamento das chuvas na bacia é homogêneo, podendo ser adotado o cálculo de média ponderada pela área de influência de cada estação de monitoramento. Dessa forma, o método de Thiessen (CHOW, *et al.*, 1988) foi utilizado na estimativa das precipitações totais dos anos hidrológicos de 2006/2007 e 2007/2008.

4.2.3 Fluviometria

Assim como para os dados de chuva, as informações disponíveis no banco de dados da ANA referentes às estações fluviométricas foram dispostos em um histograma para observação dos anos com falha de dados e dos anos completos de dados. As estações com séries de dados inferiores a 10 anos foram excluídas da análise. O regime de vazões na área em estudo foi caracterizado pela estação fluviométrica Fazenda Laranjeiras, localizada no exutório da área em estudo, e por outras seis estações fluviográficas em operação desde outubro de 2006. Foram calculadas as vazões médias de longo termo e as vazões específicas para cada estação fluviométrica considerada.

4.3 Caracterização Hidrológica

4.3.1 Morfometria

Na caracterização hidrológica foi realizada a análise morfométrica, considerando a base topográfica digitalizada e a unidade da bacia do ribeirão Mato Frio. Foram consideradas também as seis sub-bacias nas quais a bacia do ribeirão Mato Frio foi dividida, possibilitando a análise das relações entre as características físicas e as vazões específicas produzidas em cada uma delas.

A forma da bacia intervém de maneira importante no hidrograma de descarga, particularmente nos eventos extremos de cheias. De uma forma geral bacias com mesma área de drenagem, mas formas diferentes possuem hidrogramas diferentes. Os coeficientes aqui utilizados para descrever a forma das bacias são o coeficiente de compacidade, o índice de circularidade e o fator de forma.

O coeficiente de compacidade (K_c) relaciona a forma da bacia com um círculo, comparando o perímetro da bacia com o perímetro de um círculo de área igual a da bacia. O coeficiente de compacidade K_c pode ser estimado a partir da seguinte equação:

$$K_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.1)$$

Sendo P o perímetro [m] e A a área de drenagem [m²]. Quanto mais próximo da forma circular mais próximo da unidade será o K_c e quanto mais irregular, ou alongada, maior será o valor de K_c . Bacias de forma mais circular são mais suscetíveis a enchentes (CARDOSO,

2006). Segundo Delgado *et al.* (2005), quando o K_c aproxima-se de 1,128 a forma da bacia se aproxima da forma de um quadrado.

A aproximação da forma da bacia a de um círculo pode ser avaliada pelo coeficiente de circularidade I_c , para isso utilizou-se a seguinte equação:

$$I_c = 4\pi \frac{A}{P^2} \quad (4.2)$$

Assim como para K_c , no cálculo do índice de circularidade (I_c) P representa o perímetro [m] e A a área de drenagem [m²]. O coeficiente I_c tende para a unidade a medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui a medida que a forma torna alongada. Bacias de forma quadrada possuem I_c próximo de 0,785 (DELGADO *et al.*, 2005).

O fator de forma (F) relaciona a forma da bacia com a de um retângulo correspondendo à razão entre a largura média da bacia e o comprimento axial. A seguir apresenta-se a equação para estimativa do fator de forma F :

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (4.3)$$

Onde A é a área de drenagem em [m²], e L é o comprimento máximo da bacia, em [m]. As formas da bacia e do sistema de drenagem podem ser influenciadas pela geologia, podendo atuar também sobre alguns processos hidrológicos. Cardoso (2006) relaciona baixos valores de F com menores magnitudes de cheias que outras bacias de mesmo tamanho, porém com F maior.

Em complemento, foi estimada ainda a relação de alongamento (R_e), que por sua vez representa a relação do diâmetro de círculo com mesma área da bacia e o comprimento máximo de uma linha reta desde seu exutório até sua cabeceira. A equação da R_e é apresentada a seguir.

$$R_e = \frac{D}{L} \quad (4.4)$$

Onde D [m] é o diâmetro equivalente de um círculo com mesma área da bacia e L [m] é o comprimento de um segmento de reta traçada desde o exutório até o divisor de águas de forma paralela ao curso de água principal. Segundo Delgado *et al.* (2005), resultados de Re próximos de 1 representam bacias planas, enquanto valores entre 0,6 e 0,7, bacias de relevo mais pronunciado.

4.3.2 Curva de Recessão da Hidrógrafa

A curva de recessão da hidrógrafa representa a contribuição da água subterrânea na descarga de um rio durante o período de estiagem e ajusta-se de forma satisfatória a uma equação de decaimento do tipo exponencial decrescente (CPRM, 2008). A expressão do decaimento é dada por:

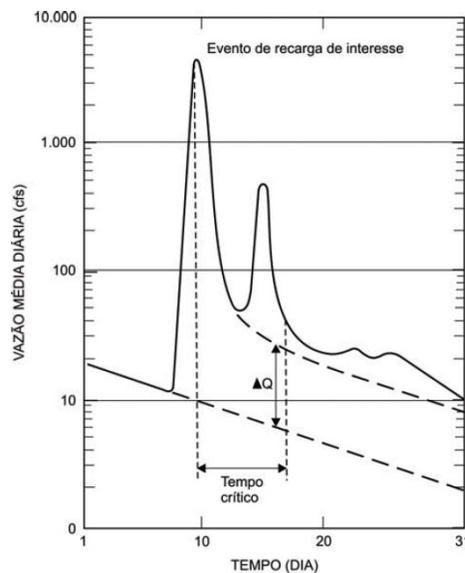
$$Q_{(t)} = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (4.5)$$

Onde:

Q_0 = vazão inicial do período de recessão da hidrógrafa em [m³/s];

t = tempo em [s]; e,

α = coeficiente de recessão, com dimensão de tempo⁻¹, dependente das características da bacia hidrográfica, em [s⁻¹].



Fonte: Mourão, 2007

FIGURA 4.2 – Deslocamento da Curva de Recessão e Estimativa de Recarga ΔQ

A curva de recessão, ou de esvaziamento, permite ainda avaliar a amplitude do armazenamento de água subterrânea nos aquíferos livres que interagem com a drenagem de superfície. Assim como para a vazão específica de cada bacia, a curva de recessão é uma função da topografia, do padrão de drenagem, dos solos, da geologia e da cobertura vegetal de uma bacia.

Para a obtenção da equação de decaimento das vazões, que marca a separação dos escoamentos superficiais e escoamento de base (contribuição das águas subterrâneas), devem ser plotadas as séries de vazão das sete estações fluviográficas localizadas na área em estudo e ajustadas curvas de tendência do tipo exponencial para os caudais de recessão.

A determinação do período no ano civil em que ocorre o esgotamento dos aquíferos é realizada a partir da identificação do ponto de inflexão da hidrógrafa plotada em gráficos com a variação da vazão em escala logarítmica de base 10 e tempo em dias. Como a recessão tende a seguir uma equação exponencial, na escala logarítmica a mesma tende para uma reta.

Por sua vez, para obter o volume de água restituído no escoamento base, o que representa os recursos renováveis de água subterrânea, a equação usada é a seguinte:

$$V = \frac{86.400 \times Q_0}{\alpha} \quad (4.6)$$

Onde:

V = volume restituído no escoamento base em [m³];

Q₀ = vazão inicial do período de recessão da hidrógrafa em [m³/s];

86.400 = fator de conversão de unidades em [s/dia]; e,

α = coeficiente de recessão, com dimensão de tempo⁻¹, em [dia⁻¹].

4.3.3 Componentes do Balanço Hídrico

É comum na quantificação dos componentes do balanço hídrico em uma bacia hidrográfica a determinação das variáveis de escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração em termos da precipitação. As parcelas de escoamento superficial e os totais precipitados na escala de tempo escolhida para o cálculo do balanço hídrico são obtidos com mais facilidade a partir de dados de monitoramento fluviométrico e pluviométrico. Por sua vez, os processos

envolvidos nos fenômenos de infiltração e evapotranspiração são complexos e mais difíceis de serem calculados por métodos diretos.

As taxas de infiltração são influenciadas por diversos fatores, entre eles estão a cobertura vegetal, as características do solo, o teor de umidade e as atividades bióticas. A evapotranspiração é a combinação dos processos de evaporação direta da água sobre a superfície e a transpiração das plantas. Os principais fatores que influenciam na evapotranspiração são as condições atmosféricas, como temperatura e pressão, e as características de cobertura vegetal, tipo e uso do solo. Por esta razão, as parcelas de infiltração e evapotranspiração têm sido quantificadas por métodos empíricos, como cálculos de balanço hídrico. A equação do balanço hídrico está apresentada a seguir.

$$P - Q - I - E_{tp} = \Delta S \quad (4.7)$$

Onde:

- P = precipitação atmosférica;
- Q = deflúvio ou escoamento superficial;
- I = infiltração no solo ou recarga dos aquíferos,
- E_{tp} = evapotranspiração real; e,
- ΔS = armazenamento da água na bacia hidrográfica.

No período compreendido entre 2001 e 2002, Drumond (2004) realizou experimentos utilizando trítio artificial como traçador em uma área de 110 km² na bacia do ribeirão Serra Azul. A metodologia desenvolvida foi utilizada para medir, de forma direta, as taxas de infiltração e consiste na injeção de trítio diluído em água em lotes de 18 m² e acompanhamento do deslocamento da nuvem de trítio em quatro campanhas de amostragem ao longo de um ano hidrológico. Além da identificação do fluxo vertical da nuvem do traçador foi observada também nas campanhas de amostragem a possibilidade de existência de fuga do traçador por fluxos horizontais. De forma simplificada, o cálculo da parcela das chuvas considerada como infiltração é referente à umidade acumulada na camada de solo superior ao pico da nuvem de trítio.

Em continuidade aos estudos de quantificação das parcelas do balanço hídrico na Bacia Representativa de Juatuba, dentro do escopo do projeto de separação de escoamentos (CDTN,

2008), foram realizados novos experimentos utilizando trítio artificial como traçador na porção superior da bacia do ribeirão Serra Azul, mais especificamente na bacia do ribeirão Mato Frio. A injeção de trítio para cálculo das parcelas de infiltração foi realizada conforme metodologia já aplicada por Drumond (2004) nas seis sub-bacias adotadas neste trabalho de dissertação.

4.4 Caracterização Hidrogeológica

Foram considerados, segundo definido em CPRM (2008), que os aquíferos são formações geológicas que contém água e permitem que quantidades significativas dessa água se movimentem em seu interior em condições naturais.

Segundo Anderson & Woessner (1992), as unidades hidroestratigráficas são formadas pelas unidades geológicas que possuem propriedades hidrogeológicas parecidas, tais como coeficiente de armazenamento, transmissividade e condutividade hidráulica. Assim, unidades geológicas que se comportam de forma similar podem ser agrupadas em uma única unidade hidroestratigráfica, aqui chamada unidade hidrogeológica, e de forma análoga, uma mesma formação geológica com propriedades hidrogeológicas distintas pode ser dividida em várias unidades hidroestratigráficas.

Na bacia do ribeirão Mato Frio, as investigações hidrogeológicas realizadas por CETEC (1983a), Drumond (2004), CDTN (2008) e UFMG (2008) produziram dados do nível d'água subterrâneo medidos em piezômetro (PZ 4 - FL), levantamento dos pontos de descarga dos aquíferos e campanhas de amostragem e análise química, física, isotópica e iônica da água das nascentes e dos cursos de água superficiais.

4.4.1 Condutividade Hidráulica

O critério de se adotar valores de condutividade hidráulica citados na literatura consultada se faz necessário devido à inexistência de dados de testes de bombeamento na bacia estudada. Um fator adicional de incerteza refere-se à pressuposição de que o perfil de solo no qual a infiltração se processa é homogêneo.

Além dos dados de distribuição granulométrica e a classificação dos solos, os resultados de ensaios de infiltração realizados por Drumond (2004) direcionaram a determinação de valores representativos dos parâmetros hidrogeológicos, em especial da condutividade hidráulica. Em dois dos oito pontos em que foram realizadas análises granulométricas foram aplicados

ensaios com permeâmetro Guelph. Para estimativa da condutividade hidráulica utilizando os resultados dos ensaios com permeâmetro Guelph, Drumond (2004) utilizou a expressão de Reynolds, apresentada a seguir.

$$K_s = \{[(0,0041) \times (35,18) \times (x_1)] - \{(0,0054) \times (35,18) \times (x_2)\}\} \quad (4.8)$$

Onde:

K_s = condutividade hidráulica saturada [cm/s];

x_1 = média das velocidades de infiltração medidas com 10 cm de coluna de água [cm/s]; e,

x_2 = média das velocidades de infiltração medidas com 5 cm de coluna de água [cm/s].

Associando os resultados de condutividade hidráulica medidos com o permeâmetro Guelph em cada profundidade às classes de textura do solo identificadas pelas análises granulométricas nestas mesmas profundidades, foram obtidas as faixas de condutividade hidráulica para os solos das seguintes classes de textura: argila, argilo arenoso e franco argilo arenoso. Além das referidas associações, em uma busca por associações entre os tipos de solo e os valores de condutividade hidráulica foram encontradas referências sobre as propriedades físicas do latossolo e do argissolo.

4.4.2 Descarga dos Aquíferos e Variação do Nível de Água Subterrânea

Entre os meses de junho de 2008 e fevereiro de 2009 foram realizados cinco levantamentos de campo para o acompanhamento da mobilidade das nascentes na área de interesse. Uma associação da variação das cotas das nascentes com a variação do nível de água no piezômetro instalado pelo CPRM na área foi realizada. Além disso, uma análise do tipo de solo, declividade do terreno e cobertura vegetal também foi atrelada às variações de nível das nascentes, possibilitando a associação das características físicas das sub-bacias com a hidrogeologia.

4.4.3 Compilação de Estudos Hidroquímicos e Isotópicos Anteriores

A compilação dos estudos anteriores onde foram analisados os parâmetros físico-químicos da água é de grande valia para a caracterização dos aquíferos locais, uma vez que a água é um solvente abundante e quimicamente muito ativo, incorporando as substâncias presentes nas rochas reservatório ou nos solos adjacentes, enquanto fluem a baixas velocidades por esses

meios. As formas iônicas ocorrem predominantemente nas águas subterrâneas e podem ser a confirmação quanto ao tipo de aquífero percolado pelas águas. O conteúdo dos isótopos da água subterrânea permite determinar o tempo de residência da água no aquífero e sua dinâmica de circulação, indicando se a água subterrânea que abastece os corpos de água durante as estiagens é proveniente de fluxos rasos ou dos meios fraturados do Embasamento Cristalino (CPRM, 2008).

Segundo Minard *et al.* (2008), as técnicas convencionais de investigação hidrológica, como a hidrogeoquímica, não devem ser substituídas pelos métodos isotópicos, mesmo considerando esta técnica como de investigação direta. Por sua vez, os fatores que determinam o rigor dos resultados dos métodos isotópicos são diferentes daqueles que influem nas técnicas convencionais, extraindo da comparação entre os resultados um conhecimento complementar aos estudos hidrológicos.

A revisão bibliográfica apontou dois estudos sobre o comportamento hidroquímico das águas na Bacia Representativa de Juatuba. São eles: 1) Determinação do funcionamento hidráulico dos aquíferos, através de parâmetros químicos (CETEC, 1983a); 2) Estudos da formação de escoamentos utilizando a técnica de traçadores na bacia representativa de Juatuba (CDTN, 2008).

As concentrações resultantes da análise do isótopo ^{18}O e os tempos de renovação calculados por CDTN (2008) a partir de séries históricas de concentração de trítio nas chuvas, das análises de trítio nas amostras coletadas e do modelo de renovação exponencial (FRITZ & FONTES, 1986 *apud* CDTN, 2008), foram considerados na determinação da origem das águas de escoamento base dos cursos de água da bacia do ribeirão Mato Frio. Considerou-se para tal que as águas com tempo de renovação superiores a 10 anos são provenientes do meio fraturado e as águas mais recentes provêm das camadas porosas de cobertura.

As análises iônicas e físico-químicas realizadas por CDTN (2008), por terem sido realizadas em apenas uma campanha (agosto de 2006), não são suficientes para classificar e comparar os distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes (cloretada, sódica, carbonatada etc.), porém a distribuição espacial desses resultados foram plotadas relacionando: pH e temperatura; íons de Na e Cl e sua relação com a condutividade elétrica; íons manganês e ferro; elementos móveis (Na, Ca e K) e a sílica.

4.5 Modelo Hidrogeológico Conceitual

Um modelo hidrogeológico conceitual se constitui em um conjunto integrado de informações de natureza geológica, hidrogeológica, geoquímica e de balanço hídrico, representando um entendimento atual sobre a constituição física e sobre o comportamento hidráulico e hidrogeoquímico do respectivo sistema hidrogeológico.

Portanto, neste presente estudo, o desenvolvimento do modelo conceitual foi feito através da compilação e interpretação de informações já existentes na bibliografia, acrescidas de dados obtidos nas campanhas de investigação e nos programas de monitoramento conduzidos especificamente no local.

O domínio espacial do modelo conceitual foi definido a partir do eixo da estação fluviográfica de Fazenda Laranjeiras e dos divisores topográficos delimitados para esta seção do ribeirão Mato Frio. Foi adotada no modelo conceitual a subdivisão da bacia do ribeirão Mato Frio em seis sub-bacias.

As condições de contorno tomadas para o domínio de interesse hidrogeológico estabelecem as fronteiras para avaliação da dinâmica de fluxo das águas subterrâneas e são associadas aos tipos de limites físicos e hidráulicos presentes. As condições de contorno estão agrupadas em condições de primeiro e segundo tipo (ANDERSON & WOESSNER, 1992), conforme relacionado a seguir.

- carga constante associada à distribuição da rede de drenagem superficial (condição de primeiro tipo);
- fluxo nulo associado aos contornos hidráulicos representados pelo limite inferior do modelo (gnaisse) e pelos divisores topográficos de água (condição de segundo tipo); e,
- recarga direta na parte superior do modelo pela precipitação pluviométrica representando uma situação de fluxo conhecido (condição de segundo tipo).

Para a delimitação da região aquífera com interação entre o fluxo subsuperficial e de zonas fraturadas focou-se nos resultados da caracterização da geologia estrutural, hidrológica, isotópica e hidroquímica. A delimitação das áreas de recarga, exutórios, espessuras, profundidades, posição e extensão dos aquíferos foram definidas a partir dos mapeamentos geológicos, geomorfológicos, de solos e de cobertura vegetal. Além da geometria e dos

parâmetros hidrogeológicos também foram considerados no modelo conceitual as entradas e saídas do sistema. O fluxo da água subterrânea foi identificado a partir das diferenças de carga hidráulica do aquífero e da localização das drenagens.

Na avaliação do regime de descarga dos aquíferos foi considerado o tempo de renovação das águas, a característica das surgências cadastradas, o tipo de solo e cobertura vegetal e ainda a geologia de cada sub-bacia. Para a quantificação da recarga, além das características do solo, cobertura vegetal e o relevo, também foram observados os regimes de precipitação e as parcelas do balanço hídrico definidas em estudos anteriores e monitoramentos existentes.

4.6 Modelo Hidrogeológico Computacional

Um modelo hidrogeológico computacional se constitui em uma ferramenta prática de análise de um sistema hidrogeológico específico, e é desenvolvido através da implementação e adaptação dos dados, informações e interpretações estabelecidas no respectivo modelo hidrogeológico conceitual, utilizando-se para isso de um determinado aplicativo computacional. No presente trabalho, foi utilizado o aplicativo computacional denominado *Visual-Modflow* elaborado, elaborado pela *Waterloo Hydrogeologic* (GUIGUER & FRANZ, 1998).

O *Visual ModFlow* é um aplicativo computacional que permite simular o escoamento da água subterrânea em um domínio espacial tridimensional, através de um modelo numérico de diferenças finitas, onde a região em estudo é dividida em células tridimensionais dispostas em camadas, linhas e colunas. A equação diferencial, baseada na lei de Darcy, representando o escoamento da água no meio aquífero saturado, tridimensional, é a seguinte:

$$\frac{\sigma}{\sigma x} \left(K_x \frac{\sigma h}{\sigma x} \right) + \frac{\sigma}{\sigma y} \left(K_y \frac{\sigma h}{\sigma y} \right) + \frac{\sigma}{\sigma z} \left(K_z \frac{\sigma h}{\sigma z} \right) = S_s \frac{\sigma h}{\sigma t} - R^* \quad (4.9)$$

em que:

K_x , K_y e K_z são os componentes do tensor de condutividade hidráulica nas dimensões x , y e z [LT^{-1}]; h é a carga hidráulica [L]; t é o tempo [T]; S_s representa o armazenamento específico no meio poroso, em [L^{-1}]; e, R^* representa um ponto onde a água é retirada (sumidouro) ou introduzida (fonte) ao sistema por unidade de volume do meio, com valor positivo se for referente à introdução e negativo se for referente à retirada, em [T^{-1}].

A localização dos principais drenos da área em estudo e atribuição dos valores de condutância para seus leitos foi possível a partir da topografia digitalizada e das campanhas de campo, onde foram observados a largura dos principais cursos de água e tipo de material presente em seus leitos. O cálculo da condutância é possível a partir da seguinte equação:

$$c = \frac{K \times L \times W}{M} \quad (4.10)$$

em que,

c = condutância entre o leito de drenagem e o aquífero [L^2T^{-1}];

K = é a condutividade hidráulica no leito do curso de água [LT^{-1}];

L = largura da célula em que o dreno foi alocado [L];

W = largura do curso de água [L]; e,

M = espessura da camada drenante [L].

Considerando que as cargas hidráulicas são calculadas no módulo de saída do modelo computacional e a recarga foi inserida como condição de contorno, a variação do parâmetro condutividade hidráulica possibilitou a calibração do modelo computacional. Os dados utilizados para a calibração do modelo foram os dados de níveis de água subterrânea obtidos nas campanhas de acompanhamento da mobilidade das nascentes em diversas épocas do ciclo hidrológico.

Ao completar a calibração foi elaborada uma discussão sobre as limitações do modelo computacional quanto à confiabilidade da calibração e a sensibilidade do modelo à variação dos parâmetros utilizados na calibração. As cargas hidráulicas e dinâmica do fluxo subterrâneo detalhado na modelagem computacional foram utilizados para a elaboração dos mapas de contorno estrutural, piezométricos e de fluxo e para a verificação do favorecimento ou não da produtividade hídrica da região a partir do conhecimento dos aquíferos.

Finalmente, a partir dos mapas gerados foi proposta uma malha de monitoramento hidrogeológico contínuo para a bacia do Mato Frio.

5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

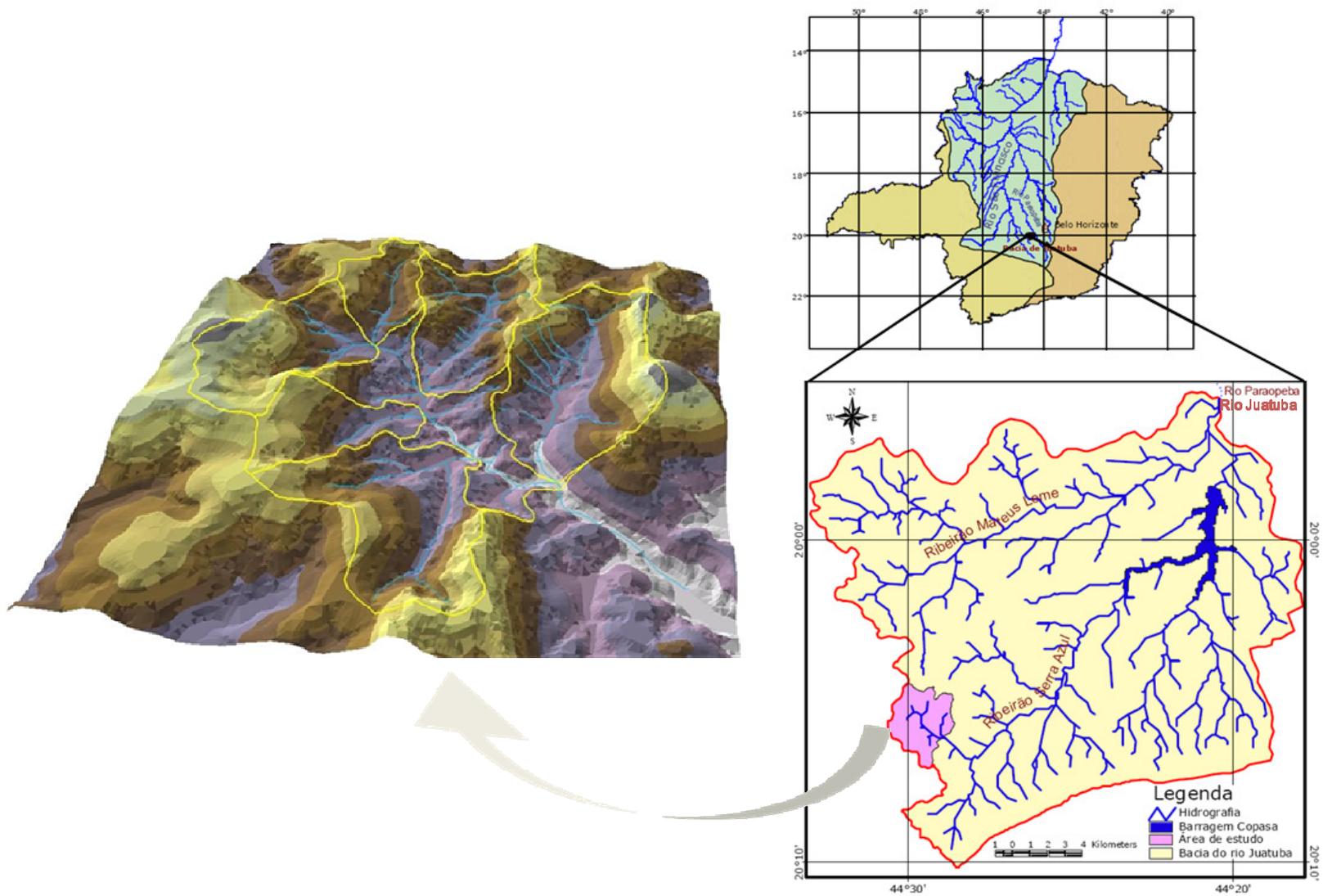
5.1 Localização

A área selecionada para o desenvolvimento dos estudos localiza-se na bacia do ribeirão Mato Frio, mais a montante da Bacia Representativa de Juatuba, entre os paralelos 20°04'00" e 20°08'00" sul e entre os meridianos 44°28'00" e 44°31'00" oeste, estando quase totalmente inserida no município de Itaúna, com exceção de uma pequena faixa no extremo norte localizada no município de Mateus Leme, abrangendo uma área total de 10,6 km².

O ribeirão Mato Frio é afluente da margem esquerda do ribeirão Serra Azul, o qual juntamente ao ribeirão Mateus Leme, forma o rio Juatuba. O rio Juatuba é um afluente da margem esquerda do rio Paraopeba na sub-bacia 40 (Alto São Francisco), cuja bacia está localizada na região central de Minas Gerais, distante aproximadamente 50 km a oeste de Belo Horizonte (MAIA *et al.*, 2006).

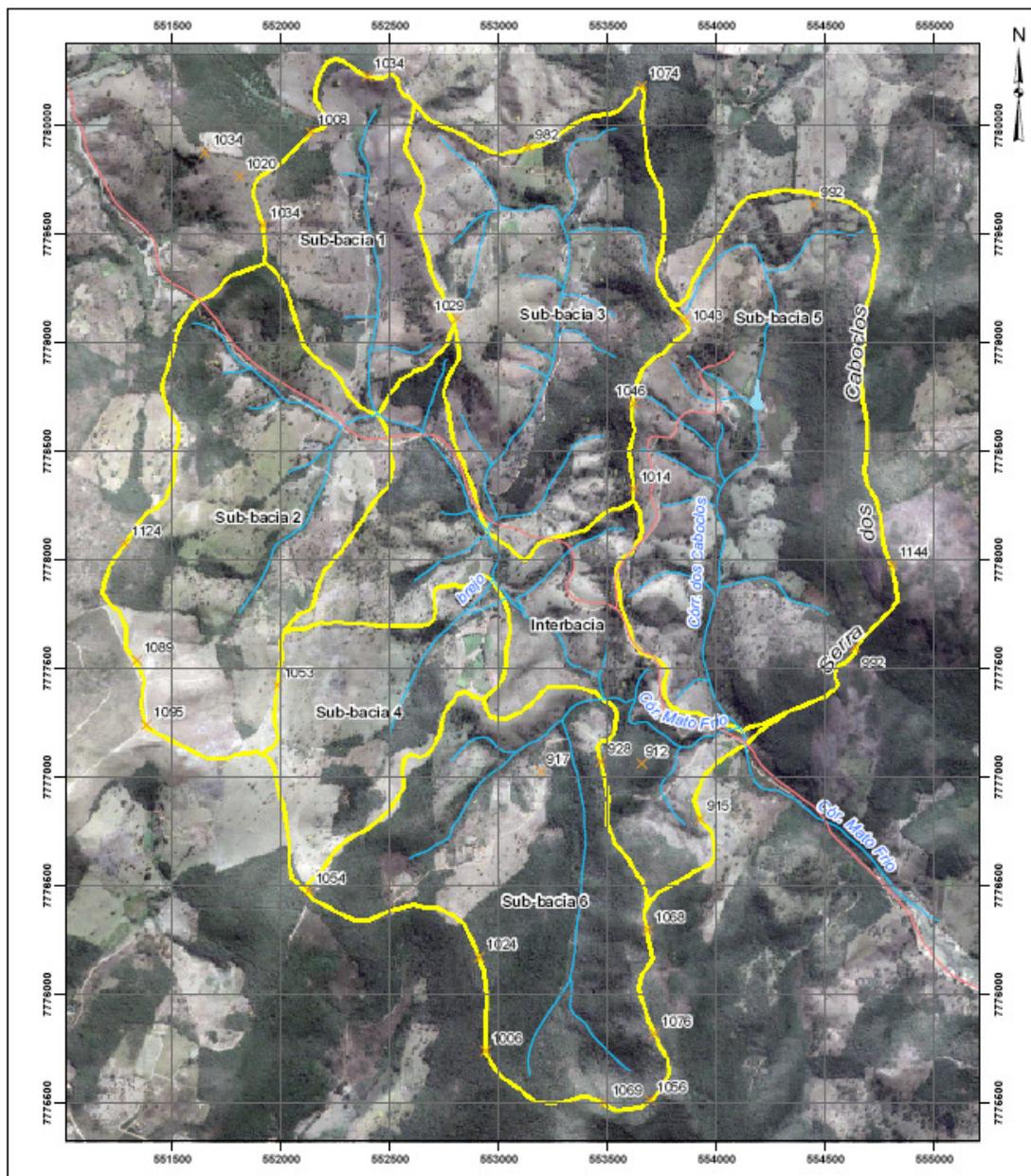
No exutório da área de interesse estão implantadas uma estação linigráfica e uma estação pluviográfica, ambas operadas pela Companhia de Recursos Minerais e Agência Nacional de Águas CPRM/ANA há cerca de 25 anos. Outras seis estações fluviográficas instaladas na bacia do ribeirão Mato Frio, as quais são operadas pelo CDTN, foram empregadas na delimitação das seis sub-bacias utilizadas nos estudos de separação de escoamentos e balanço hídrico (CDTN, 2008) e estão sendo consagradas na caracterização da área em estudo e na calibração do modelo computacional.

As Figuras 5.1 e 5.2 ilustram respectivamente a localização da bacia de Juatuba e a bacia do ribeirão Mato Frio.



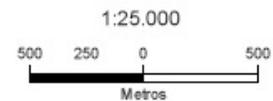
Fonte: Adaptado de CDTN (2008)

FIGURA 5.1 – Localização da Bacia de Juatuba e da Bacia do Ribeirão Mato Frio



Legenda

- x Ponto cotado
- Lagoa
- Estrada
- Limite de sub-bacia
- Curso d'água



REFERÊNCIA: Folha Azulita, SF-23-X-A-II-14-N, Escala 1/25.000, DSG, 1981.

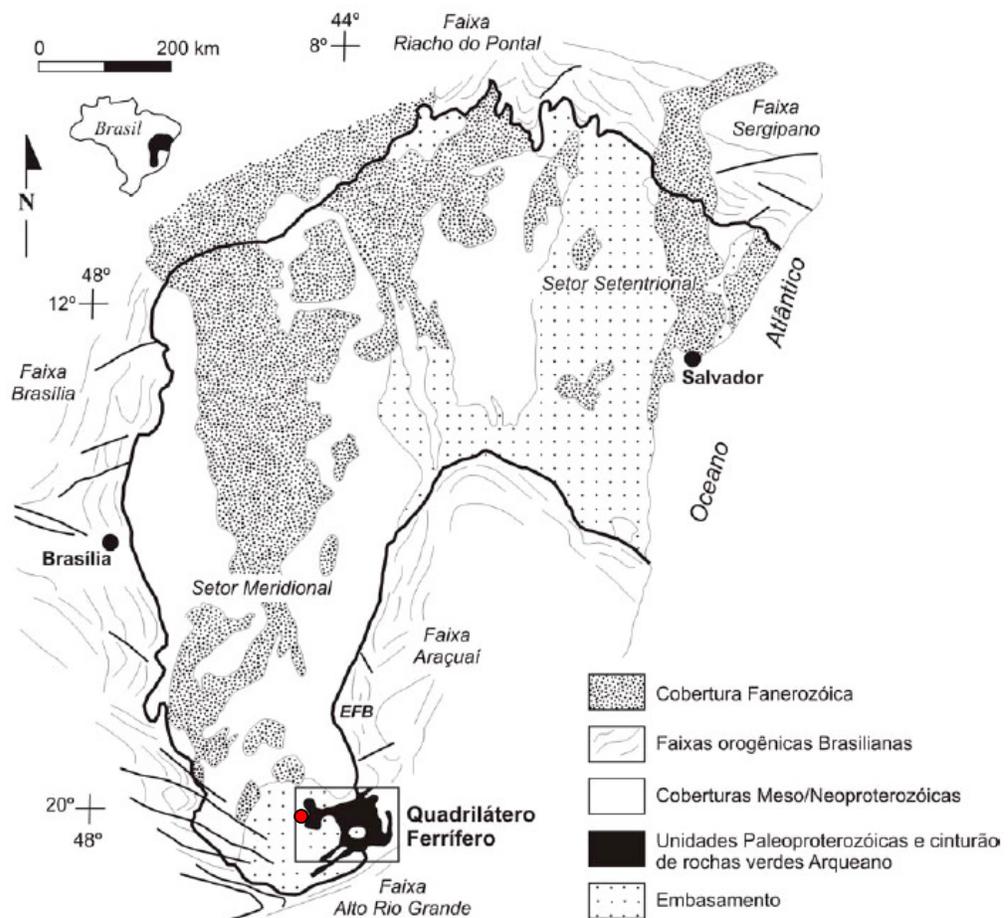
Sistema de Projeção UTM
 Origem da quilometragem UTM Equador e Meridiano 48° W G.
 Acrescidas as constantes 10.000 e 500km, respectivamente.
 DATUM HORIZONTAL: SAD 65

FIGURA 5.2 – Bacia do Ribeirão Mato Frio e Sub Bacias

5.2 Geologia

5.2.1 Geologia Regional

Numa escala regional, a sub-bacia do ribeirão Mato Frio está localizada no segmento meridional do cráton do São Francisco (Figura 5.3), o qual corresponde a uma unidade tectônica de idade arqueana, que foi retrabalhada durante o Ciclo Brasileiro (ALMEIDA, 1977). Em relação ao Quadrilátero Ferrífero a área de estudo está localizada a oeste, inserida no Embasamento, caracterizado por rochas de baixa permeabilidade hidráulica.



Fonte: ALKMIM e MARSHAK, 1998

FIGURA 5.3 – Mapa Regional do Cráton São Francisco Evidenciando o Quadrilátero Ferrífero.

Com o desenvolvimento da cartografia geológica focada nas rochas gnáissicas foi possível a subdivisão em complexos com designações locais, como o Complexo Belo Horizonte, situado

na região adjacente ao Quadrilátero Ferrífero, onde está inserida a bacia do ribeirão Mato Frio.

O Programa Levantamentos Básicos Geológicos do Brasil – PLGB, executado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil, engloba levantamentos geológicos e metalogenéticos sistemáticos, como o da Folha Belo Horizonte – SE.23-Z-C-VI. Ao relacionar os trabalhos anteriores sobre a área da Folha Belo Horizonte, Brandalise (1999) cita como primeira referência as rochas constituintes de grande parte do Complexo Belo Horizonte os trabalhos de Harder e Chamberlin, os quais ocorreram em 1915. Nessa época Harder e Chamberlin consideraram os gnaisses como sendo o embasamento de todas as seqüências do Quadrilátero Ferrífero.

A atribuição do nome Complexo Belo Horizonte à maior parte do complexo gnáissico-migmatítico da Folha Belo Horizonte deve-se a Noce *et al.* (1994), sendo esse constituído por gnaisses cinzentos, freqüentemente com um bandamento composicional e feições de migmatização (BRANDALISE, 1999).

Na década de 60, Dorr II e seus colaboradores (1969) estudaram as rochas gnáissicas e graníticas nessa mesma região em escala 1:25.000, e posteriormente, na década de 70, foram realizados pela CPRM, em convênio com o DNPM, levantamentos geológicos sistemáticos em escala 1:250.000, sendo para a Folha Belo Horizonte considerada a escala de 1: 100.000.

Na década de 80, no âmbito do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento de Métodos e Técnicas de Recursos Naturais – Bacia do Alto São Francisco e Parte Central da Área Mineira da SUDENE (CETEC, 1983a), foram realizados levantamentos na escala 1:50.000. O mapa geológico gerado no referido projeto abrange toda a Bacia Representativa de Juatuba e foi compilado e modificado dos mapas geológicos do Quadrilátero Ferrífero (Convênio DNPM/USGS, escala 1:25.000, 1961) e do mapeamento geológico na Região Metropolitana de Belo Horizonte (IGA, escala 1:50.000, 1984).

Em referência aos aspectos geológicos gerais, o CETEC (1983a) descreve as rochas gnáissicas e graníticas do embasamento como sendo rochas do Complexo Basal Indiferenciado, Arqueozóico. Segundo CETEC (1983a), tal complexo estende-se pela faixa oeste da Bacia Representativa de Juatuba, limitando-se a leste pela Serra da Saudade, e seguindo até o sul, no vale do ribeirão Serra Azul.

A referência geológica mais recente em escala 1:50.000 foi encontrada no Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG (BALTAZAR & ZUCCHETTI, 2005), onde os mapeamentos geológicos produzidos a partir da década de 60 para a região do Quadrilátero Ferrífero foram georreferenciados, resultando a integração das informações geológicas e cartográficas das unidades litoestruturais sem que as mesmas fossem modificadas.

A integração das informações no Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero foi possível a partir de trabalhos de campo e de interpretação de imagem de satélite Landsat 7. Durante a integração dos diversos mapeamentos até então disponíveis, as inconsistências cronoestratigráficas foram resolvidas usando os melhores controles estratigráficos disponíveis (BALTAZAR & ZUCCHETTI, 2005). O resultado foi um projeto em Sistema de Informações Geográficas-SIG, no software Arcview® 9.1 - formato shape (shp), e ainda quatorze mapas geológicos na escala 1:50.000, em formato Adobe® pdf. Parte da área de estudo, aproximadamente 80%, pode ser visualizada no extremo oeste do Mapa Geológico Igarapé, folha parcial de SF.23-X-A-II-1.

Os gnaisses do Complexo Belo Horizonte geralmente apresentam-se bastante intemperizados, resultando num manto de rocha decomposta, onde ainda se podem observar os principais aspectos estruturais e o fluxo subterrâneo se desenvolve em meio poroso. Normalmente todo o complexo encontra-se perturbado, localmente podendo apresentar até cinco fases de dobramentos, com pelo menos três sistemas de falhas de direções distintas (CETEC, 1983b).

O processo de lixiviação dos minerais instáveis no manto de decomposição normalmente promovem a concentração de óxido de ferro e de quartzo. O solo é arenoso a argilo-arenoso róseo e nos estágios iniciais de meteorização nota-se a presença de saibro esbranquiçado (BRANDALISE, 1999).

Faixas quartzíticas são encontradas formando cristas, as quais se aprofundam interrompendo o fluxo subterrâneo. Em outros lineamentos de divisão de águas a rocha gnáissica não decomposta é aflorante, formando cúpulas ou pães-de-açúcar. Além de seu esporádico afloramento nas cristas, outro local onde se pode observar a rocha gnáissica não decomposta é ao longo dos drenos. Na superfície desenvolve-se um manto regolito, misturado à matéria orgânica. Os minerais que compõem esses tipos petrográficos são: quartzo, feldspato, muscovita, biotita, anfibólios, granadas, sillimanita, zircão e apatita.

5.2.1.1 Litologia

Os gnaisses-graníticos são caracterizados por uma granulação fina a média, observadas nos maciços que constituem a Serra dos Caboclos (CETEC, 1983a). Tais corpos rochosos podem estar às vezes migmatizados, passando a biotita gnaisses, ou ainda apresentar núcleos de rocha granitóide. Foi observada ainda nos estudos de CETEC (1983a) a ocorrência isolada de corpos alongados na direção NW constituídos por rocha quartzosa milonitizada, e mais raramente alguns corpos de steatito.

As referências mais completas da litologia das rochas presentes no Complexo Belo Horizonte foram encontradas no Relatório Folha Belo Horizonte, onde os tipos são descritos como sendo, em geral, de cor cinza, granulação média, ocorrendo faixas mais grosseiras, às vezes com tipos porfiroblásticos. A estrutura bandada está presente em quase todos os casos, ocorrendo também tipos mais homogêneos foliados. O bandamento, em sua maior parte sendo do tipo lenticular, não apresenta continuidade estabelecida, às vezes persistindo por alguns metros. As bandas de cor cinza, em geral, de 10 a 15cm de espessura, alternam-se à bandas mais esbranquiçadas, quartzo-feldspáticas. O bandamento também pode ocorrer com espessuras mais finas nos tipos transpostos, alcançando espessuras milimétricas. Outras estruturas quase milimétricas podem estar presentes em tipos mais homogêneos, enquanto os granito-gnaisses podem exibir somente uma foliação dada pelo alinhamento de finos filmes de biotita. Faixas porfiroblásticas também podem ocorrer, e veios quartzo-feldspáticos brancos acentuam a estrutura dobrada ou transposta da rocha, já que as rochas possuem pouca biotita (BRANDALISE, 1999).

A migmatização é um fenômeno comum nessas rochas, desenvolvendo partes mais grosseiras quartzo-feldspáticas, brancas, concordantes ou discordantes. Essas rochas, via de regra, são bastante fraturadas, ocorrendo epidoto verde e/ou clorita nas superfícies de fratura. As fraturas e suas conexões desempenham papel importante no fluxo da água subterrânea. Também são comuns lentes elípticas métricas (1 a 3m) de anfibolitos percolados por veios de quartzo e/ou quartzo-feldspáticos e revelando uma estrutura pretérita interna discordante dos gnaisses, os quais são afetados por veios quartzo-feldspáticos (BRANDALISE, 1999).

5.2.1.2 Geologia Estrutural

O evento tectônico extensional Transamazônico (2,1 a 1,7 Ga), de direção presumida WNW-ESE, pode ter sido responsável pela ascensão dos domos graníticos e formação dos sinclinais regionais, gerando a arquitetura de domos e bacias característica do Quadrilátero Ferrífero (CHEMALE Jr. *et al.*, 1994), no qual os domos são nucleados pelos complexos gnáissicos arqueanos (Baçã, Bonfim, Caeté, Santa Rita, Belo Horizonte, Florestal e Itaúna) e as quilhas (grandes sinformes cônicos; e.g. Moeda, Dom Bosco, Mateus Leme), envolvem rochas dos Supergrupos Rio das Velhas, Minas e Itacolomi (MOURÃO, 2007).

Extensas zonas de cisalhamento de direção meridiana cortam os gnaisses do Complexo Belo Horizonte, no qual porções de rochas granitóides também podem ser identificadas. Segundo Brandalise (1999), os gnaisses apresentam uma foliação/ bandamento de médio a alto ângulo, em grande parte resultante da transposição imposta a essas rochas e marcada principalmente pela presença de veios quartzo-feldspáticos brancos de composição granítica. A transposição desses veios produziu dobras intrafoliais, com raiz ou sem raiz, e no rompimento dos mesmos passou a constituir um bandamento lenticular milimétrico a centimétrico, dependendo da intensidade da deformação nos diversos níveis.

No Relatório da Folha Belo Horizonte essas feições são descritas pela direção regional N50°-60°E e mergulhos ora para NW, ora para SE. Dobras maiores, não tão evidentes devido à ação da erosão, apresentam-se com flancos aflorantes empinados, ondulados e do tipo “em cascata”, que representam dobras isoclinais amplas, preservadas devido à sua posição em relação às zonas de maior intensidade de deformação.

A maior parte dos contatos do Complexo Belo Horizonte deve-se aos movimentos tectônicos e relacionam-se a zonas de cisalhamento contracional de médio a alto ângulo.

Segundo Brandalise (1999) as Zonas de Cisalhamento de Alto Ângulo (ZCAA) constituem faixas filoníticas verticalizadas, estreitas (2 a 30m, com variações abruptas de espessura), com *trend* N-S e que são preenchidas por veios de quartzo de várias gerações, atingindo extensões de 3 a 15km e largura de 2 até 30m. As maiores são visíveis em imagens de satélite ou aerofotos, e encontram-se ressaltadas na topografia devido aos veios de quartzo. As menores são difíceis de serem traçadas, pela inexistência de contraste topográfico e afinam abruptamente.

5.2.2 Geologia Local

5.2.2.1. Litologia

Conforme descrito anteriormente, a área de estudo está contida no Complexo Belo Horizonte, onde estão presentes gnaisses, rocha granítica cinza, equigranular a ligeiramente porfirítica, composta de plagioclásio, quartzo, ortoclásio, moscovita, biotita e epidoto; minerais máficos, concentrados em faixas pouco visíveis, e ainda camadas de quartzito (BALTAZAR & ZUCCHETTI, 2005).

O manto resultante do gnaisses intemperizado recobre a maior parte da área de estudo, caracterizando o meio de fluxo de água subterrânea em meio poroso. Fragmentos de quartzo são encontrados nas estradas de acesso e nas pastagens, onde a camada superior do solo foi removida. Próximo a alguns afloramentos de gnaisses, como na Serra dos Caboclos, encontram-se áreas de depósito de talos, associadas às principais surgências de água. A rocha gnáissica alterada rolada está presente nas meias vertentes, ao longo das quais também podem ser encontrados afloramentos da rocha gnáissica não decomposta.

Próximo às vertentes, o solo encontra-se misturado à matéria orgânica. Apesar de os cursos de água da área de estudo estarem localizados acima do nível de base regional, as áreas alagadas são preenchidas por solo aluvionar recente, de pequeno porte e descontínuas, com contribuição de solos coluvionares provenientes das vertentes. Tal camada de solo regolito estende-se por aproximadamente até 5 metros.

Os gnaisses e migmatitos formam grandes estruturas dômicas, facilmente visíveis nas imagens de satélite, onde se desenvolve um relevo ondulado, constituídos de colinas em forma de meia laranja, com alguns corpos semi encobertos. Esta cobertura é formada pelo intemperismo e cresce em importância à medida que se desce a encosta, e é onde se localizam as principais surgências de água subterrânea nos domínios destas litologias (CETEC, 1983a). O manto de solo resultante da decomposição dos gnaisses aprofunda-se por aproximadamente 10 metros, após o qual pode ser verificada a rocha alterada, com espessura também similar.

Nas cristas das sub-bacias da margem direita do ribeirão Mato Frio foram identificadas faixas quartzíticas, que funcionam como diques subterrâneos interrompendo o fluxo de água. A ocorrência do quartzito está associada as zonas de cisalhamento. Os veios de quartzo, normalmente produtos de segregação metamórfica, são muitas vezes retrabalhados por cataclase e metamorfismo dando origem a quartzitos semelhantes aos de origem sedimentar.

5.2.2.2 Geologia Estrutural

A partir de consulta a base topográfica, mapas geológicos e imagens de satélite, a interpretação fotogeológica evidenciou três principais lineamentos estruturais na área de estudo. São eles: lineamentos de direção NS, NW a WNW e NE.

Ao realizar a fotointerpretação focada nos afluentes da margem direita do ribeirão Mato Frio observam-se lineamentos estruturais de direção NE, o qual também é observado no ribeirão Serra Azul. Esses lineamentos estão evidentes nas sub-bacias 2 e 4, em drenagens da área interbacias e na drenagem esquerda da sub-bacia 6. A drenagem principal da sub-bacia 6 possui lineamento estrutural de direção NS. Apesar de estar mais evidente na margem direita do ribeirão Mato Frio, o lineamento de direção NE também pode ser observado na drenagem esquerda da sub-bacia 3.

Na margem esquerda do ribeirão Mato Frio observam-se lineamentos nas direções NS e WNW. Os lineamentos de direção NS são comprovados pelos cursos de água principais das sub-bacias 1, 3 e 5, e seus divisores, incluindo o Córrego dos Caboclos e a Serra dos Caboclos. Os lineamentos de direção WNW são condicionados pelos afluentes dos cursos de água principais das sub-bacias 1, 2 e 3 e ainda pelo ribeirão Mato Frio.

A confirmação dos resultados da fotointerpretação efetivou-se em atividades de campo, onde foram observados a rede hidrográfica, as feições estruturais e os principais litotipos e seus contatos.

Os principais aspectos estruturais foram identificados a partir do manto intemperizado exposto nos cortes das estradas. Algumas exposições de rocha gnáissica não decomposta puderam ser alcançadas na Serra dos Caboclos e ao longo das drenagens. Os estereogramas das Figuras 5.4 e 5.5 mostram a orientação das principais estruturas levantadas em campo.

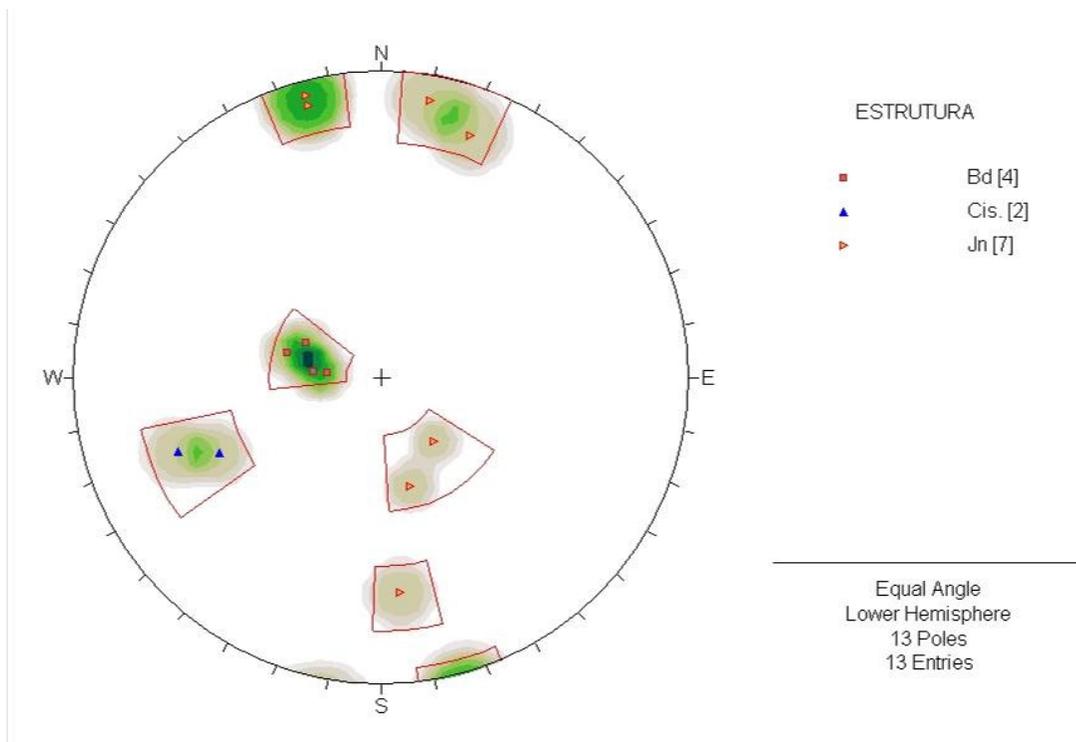


FIGURA 5.4 - Estereograma com Pontos Levantados em Campo

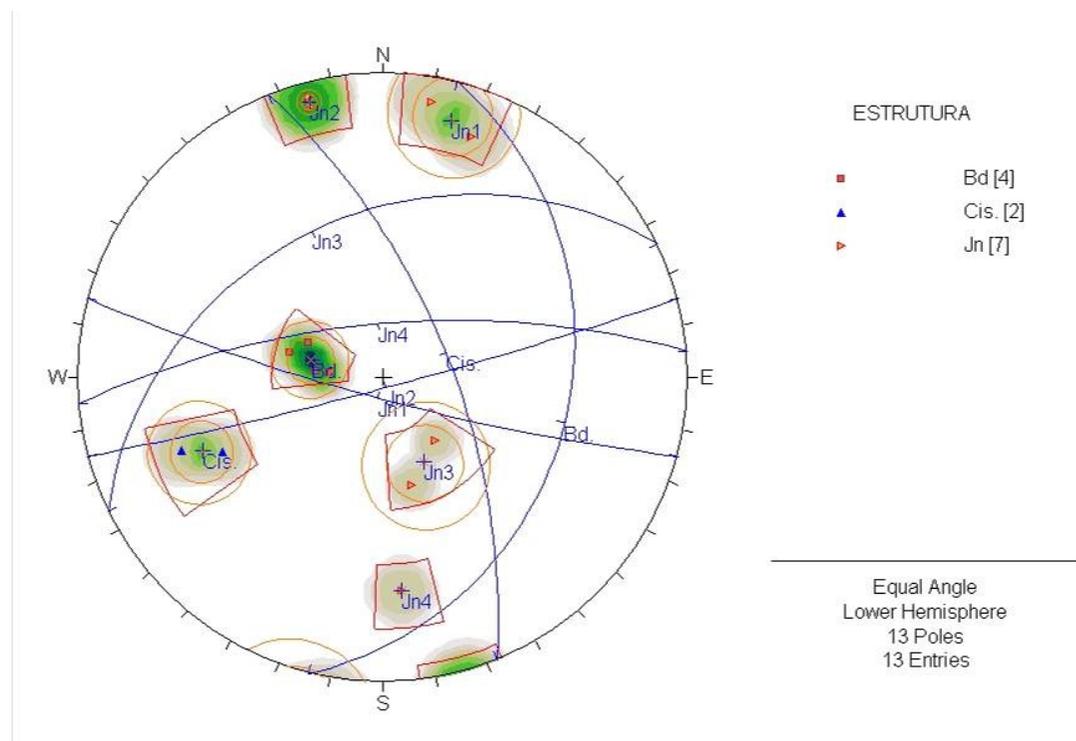


FIGURA 5.5 - Projeção Estereográfica dos Bandamentos, Juntas e Planos de Cisalhamento Observados nos Afloramentos

O bandamento composicional (Bd), caracterizado pela alternância de algumas poucas bandas de minerais máficos em meio aos minerais mais félsicos, possui atitude média de $104^{\circ}/27^{\circ}$ (direção /mergulho) e está presente em todos os afloramentos rochosos descritos.

As principais juntas (Jn1 e Jn2) possuem atitude média $195^{\circ}/82^{\circ}$ e $165^{\circ}/86^{\circ}$, respectivamente. Em escala de afloramento elas se apresentam, na maior parte, fechadas, com persistência de até 1m, possuem forma plana e superfície plana a rugosa (Figura 5.6). Quando mais próximas da superfície, em regiões de menor declividade, estas fraturas se encontram abertas (Figura 5.7).



FIGURA 5.6 - Junta no Afloramento da Serra dos Caboclos

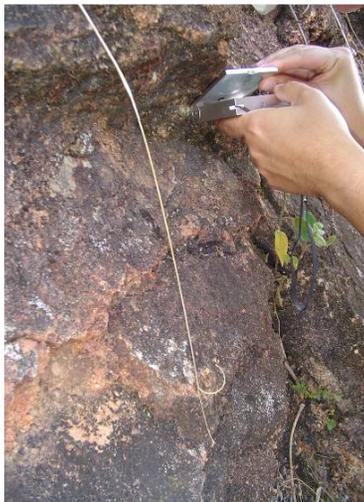


FIGURA 5.7 - Fraturas na Sub-Bacia 5

As juntas 3 e 4 (Jn3 e Jn4), que possuem atitude média $334^{\circ}/34^{\circ}$ e $355^{\circ}/70^{\circ}$, foram identificadas a sudoeste, associadas à zona de cisalhamento (Cis.) de atitude $068^{\circ}/65^{\circ}$ (Figura 5.8).



FIGURA 5.8 - Faixa de Quartzito Presente na Zona de Cisalhamento da Sub-Bacia 4

Os dados estruturais levantados em campo, apesar de quantitativamente serem poucos, associados à fotointerpretação e os mapas geológicos encontrados na literatura, foram suficientes para definir as principais estruturas ocorrentes na área de estudo.

Ao relacionar os resultados da fotointerpretação e dos levantamentos geológicos realizado por CETEC (1983a) com os dados levantados em campo, observa-se que os lineamentos estruturais de direção NS e a junta de direção WNW são coincidentes, respectivamente, ao bandamento e à junta Jn1 medidos na Serra dos Caboclos.

Outro lineamento evidente, localizado ao sul da sub-bacia 6, o qual pode ser identificado tanto na fotointerpretação quanto no mapa geológico Igarapé (SF.23-X-A-II-1), refere-se ao cisalhamento de direção NNW, coincidente ao corpo de quartzito mapeado na Folha Igarapé.

Os lineamentos estruturais, fraturas e contatos litológicos podem ser observados na figura que segue (Figura 5.9), onde foram traçados os perfis transversais e longitudinais da bacia do ribeirão Mato Frio. Os principais aspectos estruturais da bacia em estudo foram considerados no modelo computacional a partir da variação dos valores de condutividade hidráulica.

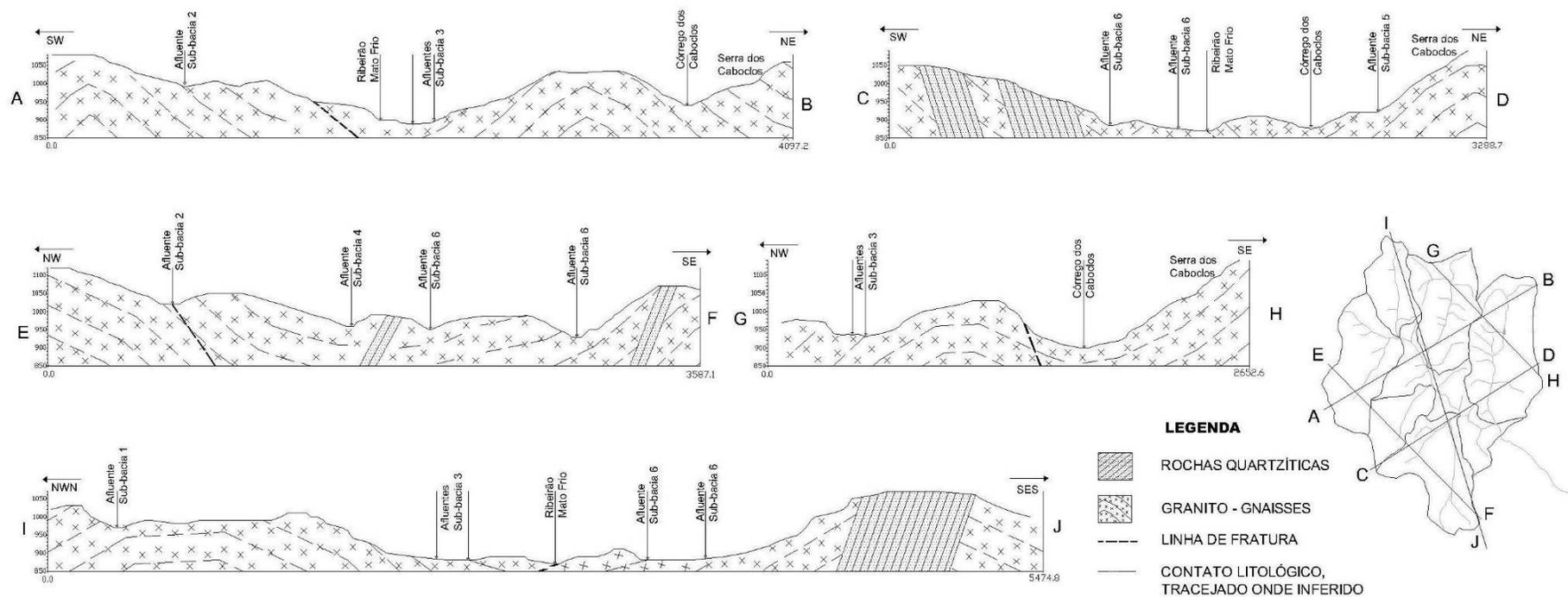


FIGURA 5.9 – Seções Geológicas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

5.3 Demais Aspectos do Meio Físico

5.3.1 Geomorfologia

A dissecação fluvial atuante nas rochas predominantemente granito-gnáissicas do embasamento Pré-Cambriano resultou em formas de colinas e cristas com vales encaixados e/ou de fundo chato de maneira generalizada em toda a extensão dos Planaltos Dissecados do Centro Sul e do Leste de Minas (CETEC, 1983b).

É comum observar nas formações granito-gnáissicas os processos de aplainamento característicos de climas com regimes torrenciais, essencialmente do tipo pedimentação e que atuaram principalmente no Terciário e no Pleistoceno, e ainda os condicionamentos tectônicos na conformação do relevo, onde a drenagem acompanha parcialmente o alinhamento das cristas segundo as direções preferenciais do Pré-Cambriano (CETEC, 1983b). As formas de relevo esculpidas nestas rochas variam de colinas de topo aplainado ou não, colinas de vales encaixados e cristas esparsas, e colinas com vertentes ravinadas e vales encaixados. A conformação do relevo nas sub-bacias do ribeirão Mato Frio refletem diretamente na resposta dessas áreas aos eventos de precipitação, facilitando ou não a infiltração e reduzindo o escoamento superficial.

A região que compreende a bacia de Juatuba é bastante acidentada, apresentando uma topografia baixa e ondulada, com morros em forma de semi-esféricos, com encostas suaves (FRANZ, 1981). Focalizando a conformação morfológica da área de interesse, observa-se na formação do relevo a predominância de vertentes dissecadas por eventos erosivos e o aplainamento do relevo devido à erosão e a dissecação fluvial. Podem-se visualizar colinas com rampas de colúvio e vales de fundo chato na sub-bacia 1 (Figura 5.10). A crista da Serra dos Caboclos possui formato mais ou menos arredondado característico das estruturas dômicas (Figura 5.10), o qual está evidenciado no Mapa de Declividades pela configuração de formas circulares na Serra dos Caboclos (Figura 5.11). Frequentemente são visualizados depósitos de tálus assentados sobre camadas de solo alterado no pé da Serra dos Caboclos.

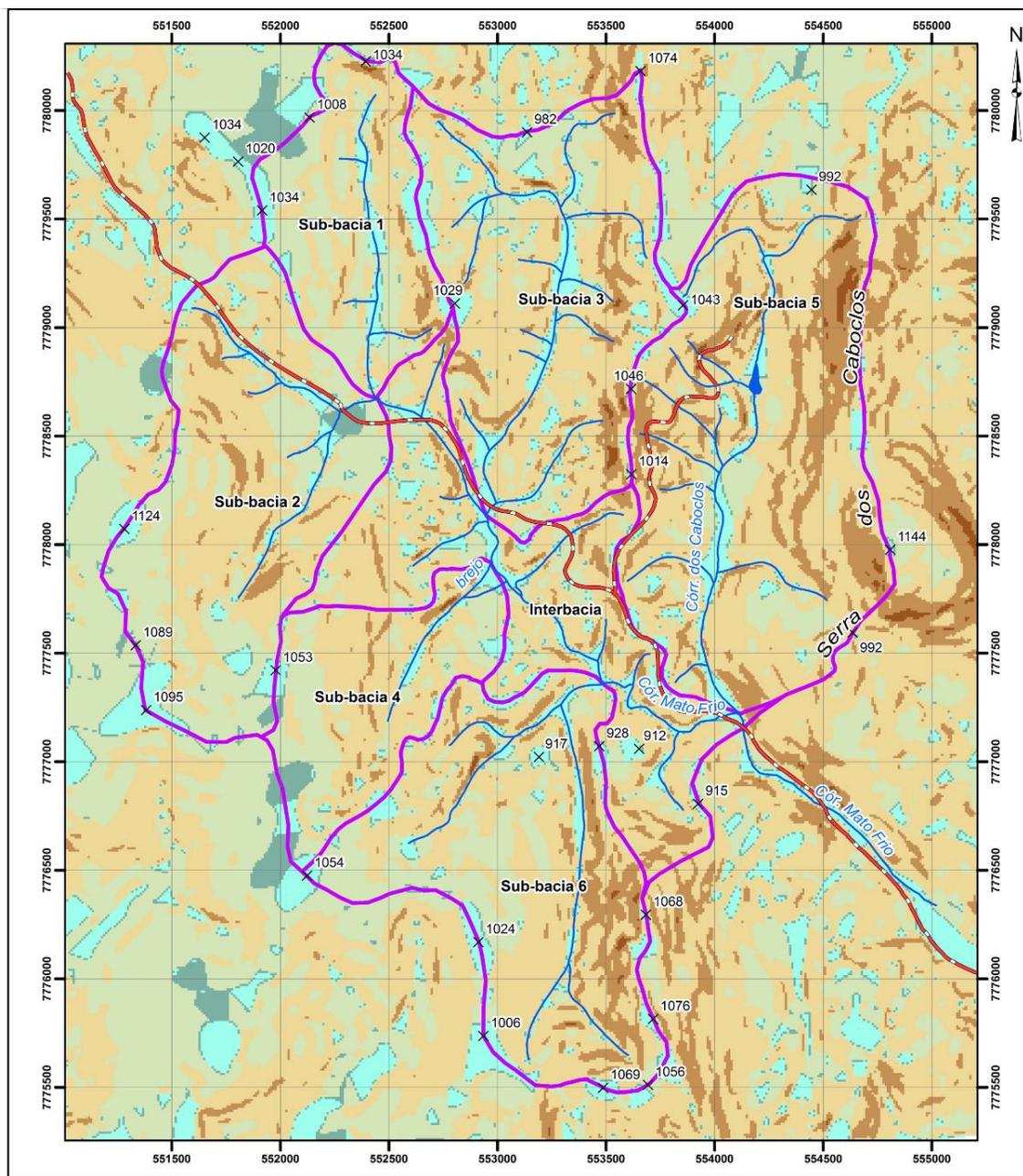


FIGURA 5.10 – Vales de Fundo Chato -Sub-Bacia 1 e Estruturas Dômicas -Serra dos Caboclos

A partir da imagem de declividade gerada a distribuição do relevo na área de estudo foi transferida para a Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Distribuição das Declividades na Área de Estudo

Bacia	Plano	Suave Ondulado	Ondulado	Forte Ondulado	Montanhoso	Escarpado
Sub-bacia 1	12,6%	5,4%	37%	44%	5,3%	0,17%
Sub-bacia 2	7,0%	3,7%	38%	52%	3,9%	0,00%
Sub-bacia 3	12%	3,0%	21%	65%	8,4%	0,45%
Sub-bacia 4	7,6%	4,9%	31%	56%	3,8%	0,10%
Sub-bacia 5	6,5%	1,2%	13%	78%	19%	0,98%
Sub-bacia 6	9,2%	2,6%	23%	65%	11%	0,20%
Inter-bacias	12%	2,7%	20%	65%	7,6%	0,03%
Total	9,2%	2,9%	24%	63%	10%	0,34%

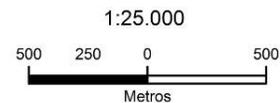


Legenda

- × Ponto cotado
- Lagoa
- Estrada
- Curso d'água
- Limite de sub-bacia

Classe / Faixa(%) - (EMBRAPA, 1999)

- Relevo Plano - 0 a 3%
- Relevo Suave Ondulado - 3 a 8%
- Relevo Ondulado - 8 a 20%
- Relevo Forte Ondulado - 20 a 45%
- Relevo Montanhoso - 45 a 75%
- Relevo Escarpado - >75%



REFERÊNCIA: Folha Azurita, SF-23-X-A-II-1-NO, Escala 1/25.000, DSG, 1981.

FIGURA 5.11 – Mapa de Declividades

A drenagem do Córrego dos Caboclos e do ribeirão Mato Frio são comandados pela estratigrafia. Grande parte desses cursos de água e de seus afluentes encontra-se sobre o substrato rochoso e pequenos trechos com formas de relevo originadas em ambientes fluviais estão presentes nos leitos irregulares com lajedos e blocos esparsos (Figura 5.12). Os leitos irregulares são caracterizados pela divisão da superfície do curso de água por lajedos rochosos juncados por grandes blocos. Os blocos que se desprendem da rocha matriz não sofrem abrasão, nem são polidos, mas sofrem ação corrosiva dos processos químicos, diaclasando-se ao longo de fissuras, facilitadas pela alternância de umidificação e dessecação (CHRISTOFOLETTI, 1987).



FIGURA 5.12 – Leitos Irregulares com Lajedos e Blocos na Sub-Bacia 2

Algumas feições geomorfológicas distintas estão presentes na bacia do ribeirão Mato Frio, como cristas de até 1140 m de altitude sustentadas pelo embasamento e com declividades em torno de 100%. O contato de diferentes litologias na zona de cisalhamento de direção NNW, como as rochas de quartzito e os granito-gnáisses localizados no divisor de águas sudeste da sub-bacia 6, atribuem uma conformação diferenciada ao relevo. As escarpas do sul da bacia são comandadas pela litologia de quartzitos, mais resistentes que as rochas granito-gnáissicas.

Na Tabela 5.2 estão apresentadas as variações de altitude em cada sub-bacia.

TABELA 5.2 – Variação da Altimetria em Cada Sub-Bacia

Bacia	Cota (m)			
	Mínima	Máxima	Média	Desnível Máximo
Sub-bacia 1	912	1030	982	118
Sub-bacia 2	910	1120	1015	210
Sub-bacia 3	880	1070	962	190
Sub-bacia 4	877	1070	980	193
Sub-bacia 5	860	1140	964	280
Sub-bacia 6	870	1070	967	200
Interbacia	860	1070	917	210
Total	860	1140	970	280

Em síntese, a distribuição das declividades na área em estudo é de 60% de relevo forte ondulado, 25% de relevo ondulado e 10% de relevo montanhoso. Não são observadas variações significantes de distribuição de declividades entre as sub-bacias. A sub-bacia 6 é a mais acidentada, onde os desníveis máximos alcançam 280m. As cotas mínimas e máximas nas sub-bacias são respectivamente 860m e 1140m e a altitude média está em torno de 970m.

5.3.2 Pedologia

Associando informações obtidas em diversos organismos públicos do Estado de Minas Gerais, entre eles CETEC (1983a), IGA (1984) e RURALMINAS (2002), Drumond (2004) sintetiza as informações referentes aos solos da área em estudo e os relaciona às características geológicas. As principais classes de solos que ocorrem na bacia são: Latossolos, Argissolos (Podzólicos), Cambissolos e Neossolos (Solos Litólicos), em geral, de caráter álico ou distrófico. Ocorrem também Solos Aluviais eutróficos e hidromórficos indiscriminados, em áreas de várzeas e baixadas, geralmente, próximos às margens dos principais cursos de água (DRUMOND, 2004; CETEC, 1983a e RURALMINAS, 2002).

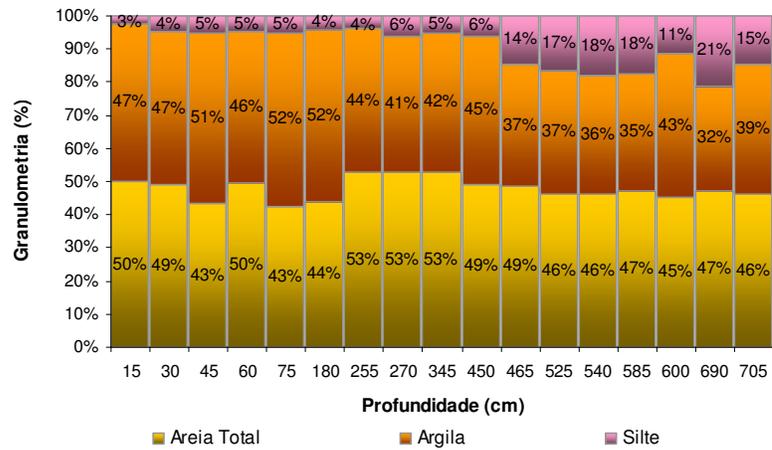
A partir das informações contidas no boletim publicado pelo DNAEE, “*Bacia Representativa de Juatuba - dados atualizados até 1975*” (FRANZ, 1981), os solos da bacia são descritos como sendo, na sua maioria, profundos, bem drenados, ácidos e de baixa fertilidade natural. Nos platôs mais elevados, caracterizados por uma superfície mais antiga, encontram-se solos do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo. A vegetação desses platôs são via de regra, de gramíneas e subarbustos. À medida que se desce rumo aos drenos naturais, onde estão as matas ciliares sobre Solos Hidromórficos, encontram-se, nas encostas suaves, sobre os

Neossolos (Litossólicos), os cerrados propriamente ditos, caracterizados por árvores baixas e retorcidas. Em trechos da bacia onde os solos são do tipo Latossolo Vermelho, mais férteis, encontra-se uma vegetação mais densa e desenvolvida.

A estabilidade estrutural do embasamento aliado aos fatores climáticos e a topografia são os principais responsáveis pelo processo de formação do solo na região, estando comumente associados aos Argissolos (DRUMOND, 2004; IGA, 1984; CETEC, 1983a e RURALMINAS, 2002). A infiltração de parte da precipitação no solo e saturação das camadas adjacentes à rocha são responsáveis pelos processos de deposição de argila nestas camadas, ficando sobrepostas por texturas mais grossas de solo arenoso. Tal configuração é característica dos Argissolos.

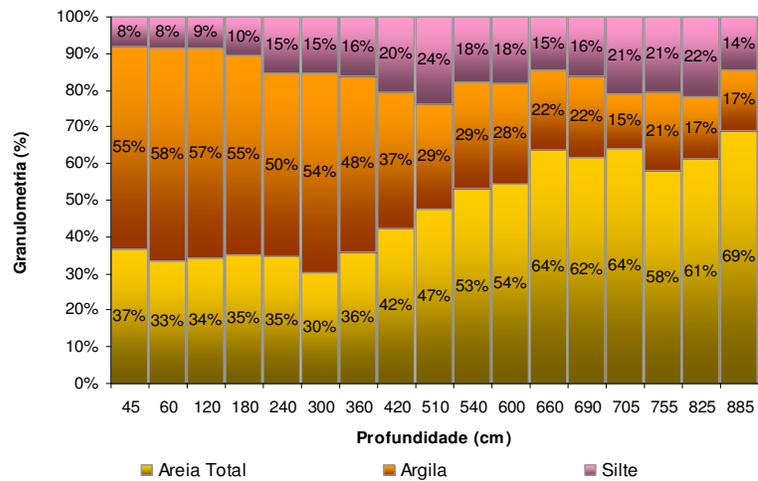
O intemperismo físico se expressa em diversos pontos sob forma de juntas de alívio, a qual forma-se em consequência da expansão do corpo rochoso que ao ascender a níveis crustais mais superficiais pela erosão do material sobreposto sofre alívio de pressão (TEIXEIRA *et al.*, 2008). A fragmentação das rochas e alargamento das fissuras também ocorre devido ao crescimento de raízes. Esta transformação da rocha inalterada em material descontínuo e friável acelera o intemperismo químico multiplicando a área de exposição da rocha em alteração e compondo um cenário de afloramentos recorrente na área em estudo.

Durante os levantamentos de dados primários nos estudos realizados por Drumond em 2004 e CDTN em 2008, as amostras de solo coletadas a cada 15 cm de profundidade foram analisadas quanto às composições granulométricas. Na Figura 5.13 está apresentada a localização dos furos de sondagem de onde foram extraídas as amostras de solo. Nas Figuras 5.14 a 5.21 podem ser visualizadas as distribuições resultantes das análises granulométricas. Ressalta-se que nestes gráficos a distribuição granulométrica permanece constante entre a profundidade em que são apresentadas e a superfície imediatamente superior da próxima profundidade associada à nova distribuição granulométrica.



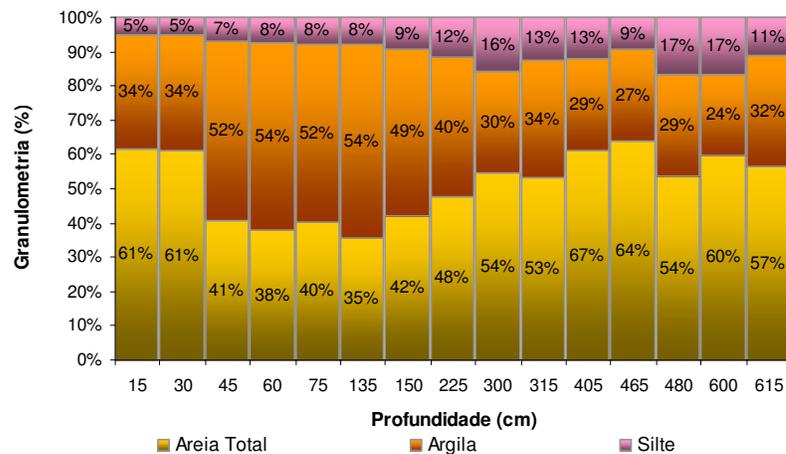
Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.14 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J1.1



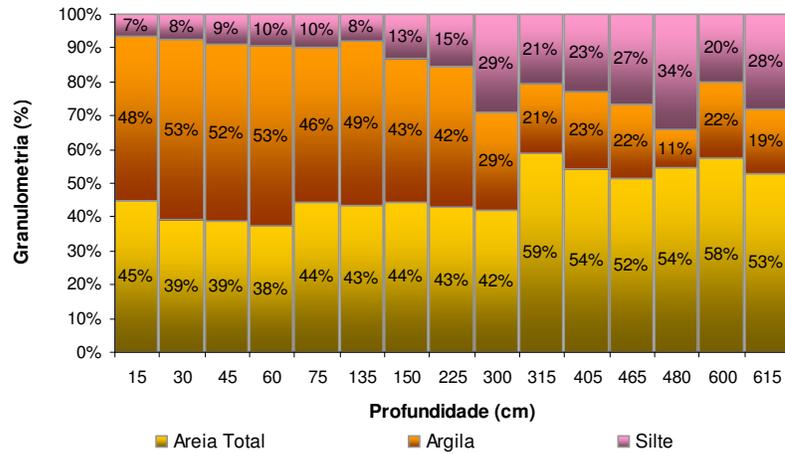
Fonte: Drumond, 2004

FIGURA 5.15 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J1.2



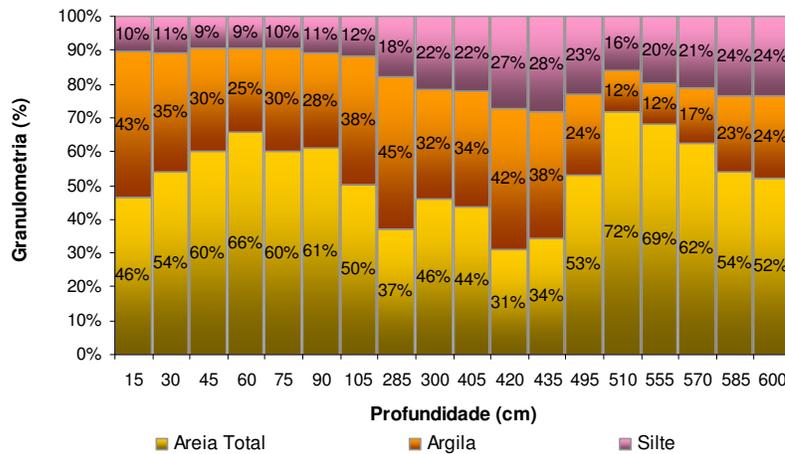
Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.16 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J2.1



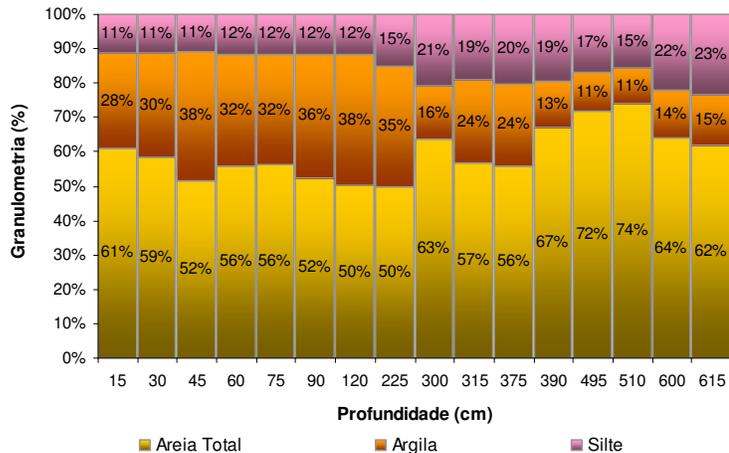
Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.17 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J3.1



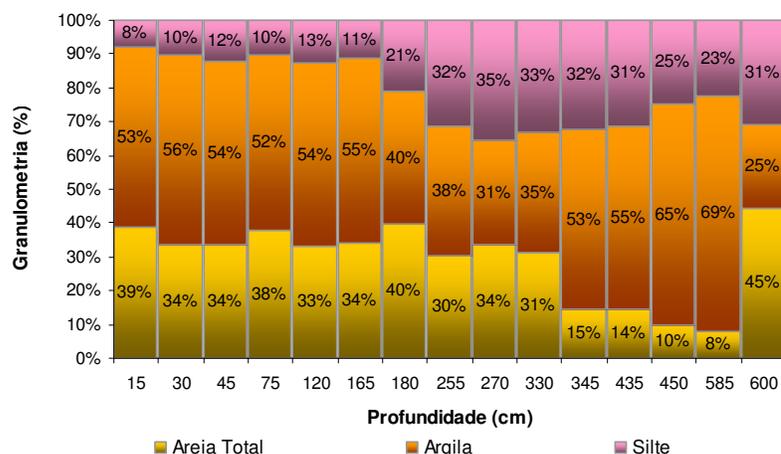
Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.18 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J4.1



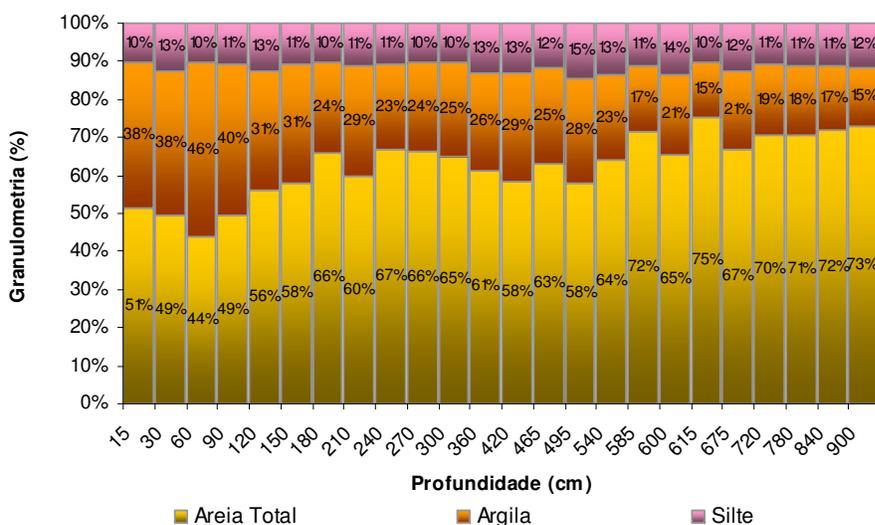
Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.19 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J5.1



Fonte: CDTN, 2008

FIGURA 5.20 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J6.1



Fonte: Drumond, 2004

FIGURA 5.21 – Distribuição Granulométrica das Amostras de Solo do Ponto J7.1

Segundo os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2005), a análise dos dados de distribuição granulométrica e profundidade dos furos de sondagem nos permitem identificar os grupamentos texturais, as classes de textura e de profundidade dos solos e ainda calcular os atributos diagnósticos relacionados à relação textural da argila, à relação silte /argila e ao caráter argilúvico. Os resultados obtidos na determinação das classes de textura podem ser visualizados na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 – Classes de Textura e Grupo Textural nos Furos de Sondagem

Sub-Bacia	1		2	3	4	5	6	Inter Bacias							
Ponto Prof. (cm)	J1.1	J1.2	J2.1	J3.1	J4.1	J5.1	J6.1	J7.1							
0 a 30	Argilo Arenoso	Argila	Franco Argilo Arenoso	Argilo Arenoso	Argilo Arenoso	Franco Argilo Arenoso	Argila	Argilo Arenoso							
30 a 45															
45 a 60	Argila		Argila	Argila	Franco Argilo Arenoso	Franco Argilo Arenoso		Argila	Argila						
60 a 75	Argilo Arenoso														
75 a 90	Argila				Argila	Argila		Argilo Arenoso	Argilo Arenoso	Franco Argiloso	Argilo Arenoso				
90 a 105															
105 a 120															
120 a 165															
165 a 180															
180 a 225															
225 a 255															
255 a 270															
270 a 285															
285 a 300															
300 a 315	Argilo Arenoso	Argila	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso							
315 a 330															
330 a 345															
345 a 375															
375 a 390															
390 a 405															
405 a 420															
420 a 435															
435 a 450															
450 a 465															
465 a 480	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso								
480 a 495															
495 a 510	Argilo Arenoso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso	Franco Argiloso							
510 a 570															
570 a 585															
585 a 600															
600 a 615															
615 a 675															
675 a 690															
690 a 705									Franco Argiloso						
705 a 720															
720 a 755									-	Franco Argiloso	-	-	-	-	-
755 a 780															
780 a 825															
825 a 900															

■ Textura Média; ■ Textura Argilosa e ■ Textura Muito Argilosa

Considerando que os oito furos de sondagem, acompanhados de análise granulométrica, alcançaram profundidades superiores a 2 m, os solos nesses pontos foram classificados como muito profundos. Ressalta-se, porém que a ocorrência de afloramentos de rocha, tanto em vertentes quanto em divisores de água, sugerem a presença de solos rasos a profundos nos trechos de transição entre esses afloramentos e os pontos identificados como sendo muito profundos.

Os grupamentos texturais observados na área em estudo variam de média a muito argilosa. Camadas de texturas médias intercaladas com faixas de textura argilosa foram identificadas nos pontos J2.1 (sub-bacia 2), J4.1 (sub-bacia 4) e J5.1 (sub-bacia 5). As amostras de solo retiradas nos pontos J1.2, J3.1 e J7.1 (respectivamente sub-bacia 1, sub-bacia 3 e interbacias) indicam a presença de camada argilosa sobreposta à camada de textura média. Por sua vez, as amostras de solo dos pontos J1.1 e J6.1 (sub-bacias 1 e 6) indicaram em quase toda a sua profundidade a textura argilosa, ocorrendo nesse último uma faixa de textura muito argilosa de aproximadamente 1,3 m de espessura a uma profundidade de 4,5 m.

Na Tabela 5.4 estão apresentadas as características morfológicas dos pontos levantados em campo e os horizontes diagnósticos identificados, os quais foram utilizados para separação em classes e níveis categóricos, conforme Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. As fotos citadas neste item podem ser visualizadas no Apêndice I.

TABELA 5.4 - Características Gerais e Morfológicas dos Perfis de Solo

Sub-Bacia	Ponto	Coordenadas UTM		Altitude (m)	Relevo	Horizonte Diagnóstico Associado	Registro Fotográfico/ Perfil
		Leste	Norte				
1	J1.1**	552.179	7.779.989	1005	Ondulado	BW	Figura 5.14
	J1.2**	552.511	7.780.095	1000	Forte Ondulado	BW	Figura 5.15
	J1.3*	552.293	7.779.953	980	Forte Ondulado	BW	Foto 01
	J1.4*	552.450	7.780.079	975	Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 02
2	J2.1**	552.453	7.778.276	955	Ondulado	B Textural	Figura 5.16
	J2.2*	552.185	7.778.186	960	Forte Ondulado	B Textural	Foto 04
	J2.3*	552.101	7.778.165	950	Plano	B Incipiente	Foto 05
	J2.4*	552.035	7.778.030	980	Forte Ondulado	B Incipiente	Foto 06
	J2.5*	551.825	7.777.786	1005	Forte Ondulado	B Incipiente	Foto 07 e Foto 08
	J2.6*	551.764	7.778.993	945	Plano	Horizonte Gleii	Foto 09
3	J3.1**	553.517	7.778.877	990	Forte Ondulado	BW	Figura 5.17
	J3.2*	552.976	7.778.321	885	Forte Ondulado	BW	Foto 10
	J3.3*	553.145	7.778.488	930	Ondulado	BW	Foto 11
	J3.4*	552.950	7.779.724	950	Suave Ondulado	BW	Foto 12
	J3.5*	552.859	7.779.510	950	Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 13
4	J4.1**	552.964	7.777.848	880	Plano	B Textural	Figura 5.18
	J4.2*	552.252	7.776.707	1035	Ondulado	Contato Lítico Quartzitos	Foto 15 e Foto 16
	J4.3*	552.316	7.776.947	1015	Forte Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 17
	J4.4*	552.561	7.777.352	910	Suave Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 18
5	J5.1**	553.701	7.777.977	915	Forte Ondulado	BW	Figura 5.19
	J5.2*	554.116	7.779.053	970	Montanhoso	BW	Foto 20
	J5.3*	554.163	7.779.335	955	Forte Ondulado	BW	Foto 21
	J5.4*	554.081	7.777.275	860	Plano	BW	Piezômetro
	J5.5*	554.052	7.779.389	985	Ondulado	Pedregosidade	Foto 22
	J5.6*	554.370	7.779.406	960	Suave Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 23
	J5.7*	554.119	7.777.889	900	Forte Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 24
	J5.8*	553.762	7.777.968	900	Plano	Horizonte Gleii	Foto 25
6	J6.1**	553.481	7.776.931	920	Ondulado	BW	Foto 28 e Figura 5.20
	J6.2*	553.007	7.777.007	895	Ondulado	Horizonte Gleii	Foto 29 e Foto 30
Inter Bacias	J7.1**	553.894	7.777.011	895	Forte Ondulado	BW	Figura 5.21
	J7.2*	553.917	7.777.062	890	Forte Ondulado	BW	Foto 32

(*) Perfis de solo em cortes de estrada e drenagens

(**) Perfis com distribuição granulométrica

Em um primeiro nível categórico, existem duas classes de solo dominantes na bacia: na margem esquerda do ribeirão Mato Frio o Latossolo ocupa grandes áreas, e na margem direita o Argissolo é predominante.

O Latossolo Vermelho-Amarelo está presente na sub-bacia 06 e na porção sudoeste da área em estudo, na extensão situada entre o ribeirão Mato Frio e o Córrego dos Caboclos (sub-bacias 1, 3 e parte da sub-bacia 5). Na margem esquerda do Córrego dos Caboclos o solo foi classificado como Latossolo Vermelho. Nas demais áreas compreendidas entre as sub-bacias 2 e 4, incluindo estas, o solo pode ser classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo.

Em grande parte das drenagens, onde não existe afloramento de rocha, o solo é classificado como Gleissolo. Na sub-bacia 3, nas áreas de transição entre o Gleissolo e o Latossolo, são identificados Plintossolo Háptico com presença de mosqueados vermelho-amarelo e amarelo (Foto 14). Nas demais áreas, a transição entre o Latossolo ou o Argissolo e os solos hidromórficos, presentes nas vertentes e brejos, é predominantemente preenchida pelos Cambissolos. O contraste entre o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Cambissolo na sub-bacia 1 pode ser observado na Foto 03.

Em alguns cortes de estrada, como na sub-bacia 2 (Foto 04), sub-bacia 3 (Foto 11) e interbacias (Foto 33), foram identificadas a ocorrência de linhas de pedras (*stone lines*) angulosas. As linhas de pedras de formato arredondado ou subarredondado (seixos), geralmente são indícios de descontinuidade entre os solos e as rochas locais. Porém não é uma regra geral, visto que linhas de pedras angulosas em perfis de solos ocorrem devido a outros condicionantes (IBGE, 2007).

Os depósitos aluvionares não são muito comuns no Quadrilátero Ferrífero em virtude dos cursos d'água encontrarem-se acima do nível de base regional e da intensidade do intemperismo que reduziu as rochas às frações de silte e argila. As acumulações mais expressivas ocorrem onde rios de primeira ordem atravessam rochas mais resistentes em que há diminuição abrupta do gradiente (DORR, 1969 *apud* MOURÃO, 2007), como acontece na sub-bacia 2 e na Serra dos Caboclos. As drenagens de menor expressão apresentam depósitos aluvionares de pequeno porte e descontínuos (MOURÃO, 2007).

A seguir estão esplanadas as principais características dos solos identificados na área em estudo.

5.3.2.1 Latossolos

Segundo estudos realizados pela RURALMINAS (2002), os Latossolos são bem a fortemente drenados, muito porosos, profundos ou muito profundos, resistentes à erosão e muito permeáveis. Apresentam seqüência de horizontes A - Bw - Cr, com transição entre sub horizontes do tipo difusa ou gradual.

O horizonte A predominante é do tipo moderado, ocorrendo ainda em razoáveis proporções, o A franco. A espessura do horizonte A varia desde valores um pouco superiores a 10 cm até valores em torno de 50 cm e a textura engloba desde areia franca até muito argilosa. O horizonte Bw em geral, é bastante espesso, alcançando profundidades superiores a 200 cm. A estrutura é maciça porosa e a textura varia de franca arenosa a muito argilosa. O horizonte Cr é encontrado abaixo do Bw, situado a maiores profundidades, sendo observado em áreas erodidas e em cortes de estradas (RURALMINAS, 2002).

Em geral, o pH destes solos varia em torno de 4,5 a 5,0 além de apresentarem baixa fertilidade natural, saturação com alumínio elevada nos Latossolos Álicos, e teores de matéria orgânica decrescendo com a profundidade. As formas de relevo predominantes são o plano e o suave ondulado, em superfícies de aplainamento ou tabulares, com erosão ligeira. Em menor grau, esta ordem de solos ocorre em áreas mais acidentadas, associadas com Argissolos, Cambissolos e Solos Litólicos, apresentando, também, processos erosivos mais acentuados (RURALMINAS, 2002).

A ocorrência de Latossolo em áreas elevadas de relevo fortemente ondulado a montanhoso, como identificado na Serra dos Caboclos e na sub-bacia 6, está associada a processos de dissecação da paisagem posteriores à formação do solo. Nestes casos, os solos mantiveram suas características preservadas mesmo com a nova conformação da paisagem (FERREIRA, 2009).

Por sua vez, os Latossolos Vermelho-Amarelos, além das características comuns aos solos com horizonte B latossólico, possuem teores de ferro menos elevados do que o Latossolo Vermelho, além de cores vermelho-amareladas. Estes solos apresentam caráter álico, distrófico e eutrófico (RURALMINAS, 2002). A variação entre as tonalidades vermelhas e amarelas estão associadas à capacidade de drenagem dos solos e às altitudes, estando os Latossolos Vermelhos em áreas mais bem drenadas e mais elevadas do que os Latossolos Vermelho-Amarelos.

Tanto para o Latossolo Vermelho-Amarelo quanto para o Latossolo Vermelho, os solos com teores mais elevados de argila apresentam melhores condições ao uso agrícola e naqueles solos designados como álicos e distróficos, a fertilidade natural é baixa, assim como também a capacidade de troca catiônica (RURALMINAS, 2002). O perfil exposto em um corte de estrada na sub-bacia 3 (Foto 10) ilustra o Latossolo Vermelho-Amarelo encontrado na área em estudo.

O Latossolo Vermelho-Amarelo Álico ocupa as mais altas superfícies (superfícies tabulares) com relevo plano e vegetação de cerrado. Por sua vez, Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos ocorrem em relevo forte ondulado e montanhoso e sob vegetação de floresta (CETEC, 1983a). O Latossolo Vermelho segue esta mesma base para separação das classes álico e distrófico.

5.3.2.2 Argissolos

Esta classe caracteriza-se por solos não hidromórficos e com baixa atividade de argilas. São normalmente profundos ou moderadamente profundos, com perfis bem diferenciados, possuindo seqüência de horizontes A, Bt e C, com nítido destaque no horizonte Bt, através de estrutura mais desenvolvida e presença de cerosidade (CETEC, 1983a).

Nos Argissolos Vermelho-Amarelos, regularmente associados às formações geológicas de gnaisses graníticos e granitos (granitóides) (DRUMOND, 2004 e RURALMINAS, 2002), ocorrem variações no horizonte Bt, cujas espessuras alcançam desde 50 até cerca de 200 cm. O horizonte A é predominantemente do tipo moderado. A textura de maior ocorrência é argila, ou muito argilosa havendo variações para texturas mais grosseiras. A espessura varia desde valores em torno de 15 cm até cerca de 45 cm. A transição entre o horizonte A e Bt, é do tipo clara. Em geral, para o horizonte Bt a textura é argilosa ou muito argilosa. A espessura é maior nos solos com teores mais elevados de argila.

Onde predominam florestas subperenifólias e relevo forte ondulado a montanhoso são característicos solos distróficos e álicos (CETEC, 1983a). A vegetação associada ao relevo e perfis de corte de estrada pode ser observada na sub-bacia 4 (Foto 19).

São solos bem a moderadamente drenados. As formas de relevo onde ocorrem estes solos variam de suave ondulado a montanhoso, com predominância do tipo ondulado. Apresentam problemas relacionados com processos erosivos de maior intensidade. Nos solos álicos e

distróficos, o pH situa-se em torno de 4,5 com algumas variações, onde predominam relevo forte ondulado a montanhoso (CETEC, 1983a e RURALMINAS, 2002).

Os Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos e Álicos apresentam como principais limitações a baixa fertilidade natural e a acidez elevada, além das limitações decorrentes dos relevos forte ondulado e montanhoso, propícios à erosão, e que impedem ou dificultam a mecanização (CETEC, 1983a). Grande parte da bacia do ribeirão Mato Frio ocupada por estes solos é utilizada como pastagens.

Nos solos de caráter álico ocorrem formas vegetativas do tipo cerrado, campo cerrado, floresta subperenifólia (transição com cerrado e vice-versa), floresta subcaducifólia e campestre. Nos solos distróficos verifica-se a presença de áreas de transição do cerrado/floresta subperenifólia, floresta subperenifólia e cerrado (RURALMINAS, 2002).

5.3.2.3 Cambissolos

Estes solos são distinguidos por serem pouco profundos ou rasos, susceptíveis à erosão, seqüência de horizontes A, Bi e Cr, horizonte Bi com menor grau de evolução e teores mais elevados de silte em comparação com as classes descritas anteriormente. Apresentam caráter álico e distrófico. Nestes solos, há grandes variações de suas propriedades, tais como as cores, textura, profundidade, estrutura, dentre outras. São bem a moderadamente drenados, de textura arenosa a argilosa, incluindo-se a siltosa (RURALMINAS, 2002).

A transição entre os horizontes vai desde difusa até abrupta. A espessura do horizonte A varia de 5 a 60 cm. A profundidade do horizonte Bi chega a cerca de 120 cm podendo apresentar fragmentos de rocha intemperizada na massa do solo, cascalhos de quartzo (Foto 31) e concreções (RURALMINAS, 2002). Os cascalhos de quartzo são constantemente encontrados soltos sobre esses solos, como exemplificado nas Fotos 26 e 27 (sub-bacia 5) e 31 (sub-bacia 6).

O horizonte Cr está situado em um nível de menor profundidade apresentando valores até 140 cm. Por algumas vezes verifica-se presença de substrato rochoso, normalmente, a pequenas profundidades (RURALMINAS, 2002), como pode ser observado nas Fotos 05 a 08 (sub-bacia 2).

As fases de relevo destes solos são variáveis, com predominância do tipo ondulado naqueles de caráter álico e distrófico. Nesta classe de solos verifica-se a ocorrência de substratos de

rochas, com maior incidência quartzitos (sub-bacia 4 - Fotos 15 e 16) (RURALMINAS, 2002).

5.3.2.5 Gleissolos

São caracterizados por sua formação sob condições de encharcamento permanente ou por certo período do ano. Ocorrem em várzeas, veredas e áreas abaciadas, onde o lençol freático está próximo e até mesmo aflorando à superfície do terreno (RURALMINAS, 2002).

É freqüente a ocorrência de mosqueado no perfil e características de gleização, em decorrência do regime de umidade redutor associado à demanda de oxigênio pela atividade biológica. O processo de gleização implica na manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, devido à redução e solubilização do ferro, permitindo a expressão das cores neutras dos minerais de argila, ou ainda precipitação de compostos ferrosos (EMBRAPA, 2005 e IBGE, 2007).

Os óxidos de ferro hidratados (ferridrita) podem ser visualizados nas nascentes das sub-bacias 3 e 4, conforme observado respectivamente nas Fotos 13 e 17. Solos acinzentados, com afloramento do lençol freático pode ser observado nas nascentes da sub-bacia 1 (Foto 02).

São solos mal ou muito mal drenados, em condições naturais, que apresentam seqüência de horizontes A-Cg, A-Big-Cg, A-Btg-Cg, A-E-Btg-Cg, A-Eg-Bt-Cg, Ag-Cg, H-Cg, tendo o horizonte superficial cores desde cinzentas até pretas, espessura normalmente entre 10 e 50cm e teores médios a altos de carbono orgânico. São solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte Glei de textura franco arenosa ou mais fina. (EMBRAPA, 2005).

5.3.2.6 Plintossolo Háptico

O horizonte plíntico se forma em terrenos com lençol freático alto ou que pelo menos apresente restrição temporária à percolação da água. Regiões de clima quente e úmido, com relevo plano a suave ondulado, de áreas baixas como depressões, baixadas, terços inferiores de encostas e áreas de surgente favorecem o desenvolvimento de horizonte plíntico, por permitir que o terreno permaneça saturado com água, pelo menos, uma parte do ano e sujeito a flutuações do lençol freático (EMBRAPA, 1999).

A mescla de cores nos horizontes, a qual recebe o nome de mosqueado ou variegado, ocorre especialmente pela presença de partes do material de origem do solo não ou pouco

intemperizado, podendo também ser decorrente da drenagem imperfeita do perfil de solo ou da presença de acumulações de materiais orgânicos ou minerais (EMBRAPA, 2005).

5.3.3 Uso do Solo e Cobertura Vegetal

Franz (1981) estudou a botânica dos campos naturais da Bacia Representativa de Juatuba com base numa estimativa visual e fitogeográfica, e a caracterizou como sendo tipicamente de cerrados.

Os cerrados, segundo Franz (1981), são apresentados segundo um gradiente crescente de biomassa, variando de campos sujos de cerrado, campo cerrado e cerrado, enquadrados no grupo de formações campestres, e ainda o cerradão, com maior biomassa e enquadrado no grupo de formações florestais.

A presença desses tipos esta associada à fertilidade e umidade dos solos. Nos platôs mais elevados, onde o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, a vegetação é composta por gramíneas e subarbustos, consideradas plantas rústicas e resistentes a grande variação de temperatura e aos períodos de estiagem graças às túnicas, elementos especiais de proteção presente nas gramíneas.

Como exemplares de gramíneas e subarbustos presentes nos mais altos platôs, Franz (1981) elenca a **Aristida pallens Cav** (vulgar Barba de bode), a **Tristachya leiostachya Ness** e a **T. Chrysothrix Ness** (Capim flecha), a **Imperata brasiliensis Trin** (Sapé), **Echinolaena inflexa Chase** (Capim flechinha), **Eragrostris lugens Ness**, **E. Perennis Doll**, **Panicum olyroides H. B. K.**, **Paspalum carinatum Flueggi**, **Paspalum anceps** e o **Paspalum eriathum Ness**, entre outras espécies do gênero **Paspalum**.

Por sua vez, nas encostas suaves localizadas entre os platôs mais elevados e as drenagens, onde são encontradas as matas ciliares, encontram-se os cerrados propriamente ditos, formados por árvores baixas e retorcidas geralmente com casca grossa e suberosa. Sob tais árvores podem ser observado um tapete de gramíneas com subarbustos de folhas grandes e densas. Na Tabela 5.5 estão apresentadas as espécies mais importantes do cerrado.

TABELA 5.5 – Espécies do Cerrado

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR	FAMÍLIA
<i>Qualea grandiflora</i> Mart	Pau-Terra	Vorichysiaceae
<i>Caryocar brasiliense</i> St. Hil	Piquizeiro	Caryocaraceae
<i>Byrsonima verbacifolia</i> Rich <i>curatella</i> ame	Murici	Malpighiaceae
<i>Curatella americana</i> Linn	Lixeira, Caimbé	Dilleniaceae
<i>Dimorphandra mollis</i> Benth	Barbatimão-de-Folha-Miúda	Leguminosae
<i>Dalbergia violácea</i> Malme	Caviúna	Leguminosae
<i>Salvertia convallariodora</i>	Pau de Colher ou Folha Larga	Vochuiaceae
<i>Cocas comosa</i>	Guariroba	
<i>Cocas petracea</i>	Acumã	
<i>Attalea exígua</i> Drude	Indaiá Rasteiro	Palmae
<i>Anacardium pumilum</i> St. Hil	Cajueiro-do-Campo	Anacardiaceae
<i>Annona coriácea</i> Mart	Cabeça-de-Negro	Annonaceae
<i>Aspidosperma tomentosum</i> Mart	Peroba-do-Campo	Apocynaceae
<i>Butiá leiosptha</i> Bece	Butiá	Palmae
<i>Tabebuia ochracea</i> Standley	Ipê-Amarelo	Rubiaceae

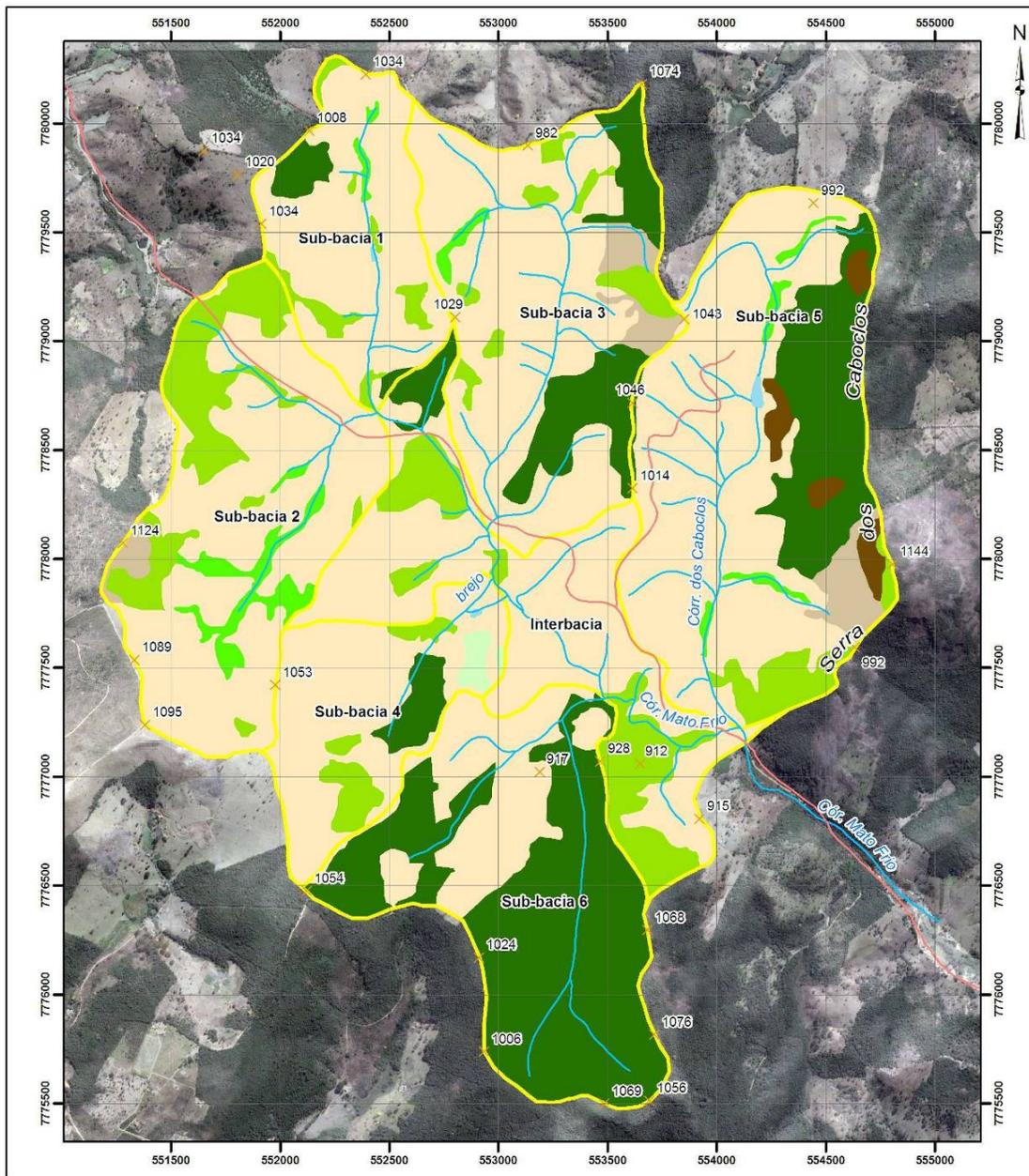
Fonte: Franz, 1981.

Onde o solo possui maior fertilidade, a vegetação ocorre de forma mais densa e desenvolvida (cerradão). Franz (1981) descreve a flora do cerradão como sendo uma flora clímax e relaciona os tipos mais marcantes: **Leguminosas, Annonáceas, Vorichysiáceas (Qualea, Vochysia, Salvertia, Calystrema)**. As árvores mais comuns dos cerradões são: **Hirtella grandulosa, Magonia pubecens, Emmotum nitens, Sclerolobium paniculatum, Phisocallyma scaberimmum, Pseudobombax tomentosa e Callisthene fasciculata**.

Ultimamente, sobretudo nas regiões mais planas, grandes áreas de cerrado vêm sendo substituídas por pastagens e áreas de cultivo mecanizado (pastos, pastos sujos e campineiras). Nas regiões de relevo mais acidentado, entretanto, o cerrado encontra-se mais preservado, como nas encostas e nos topos dos morros (NEVES *et al.*, 2004).

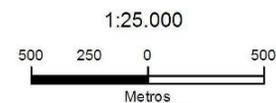
As formas de relevo forte ondulado a montanhoso e a variação das classes de solo entre latossolos e argissolos, quase sempre com baixa fertilidade natural, estão associados à necessidade de correções químicas para aproveitamento agrícola e a um nível de manejo pouco desenvolvido, caracterizado pela adoção de práticas agrícolas que refletem um nível tecnológico intermediário.

Os usos do solo na área em estudo são plantações (cana, campineira, eucalipto e hortaliças), pastos e massas de água em pequenos barramentos. Além das variações do cerrado na cobertura vegetal são também encontradas mata ciliar, remanescente de Mata Atlântica e vegetação típica de brejo. Na Figura 5.22 e na Tabela 5.6 são apresentadas a distribuição dos usos do solo na bacia do ribeirão Mato Frio e suas porcentagens em cada sub-bacia.



Legenda

- | | | | |
|----------------|---------------------|--|------------|
| ✕ Ponto cotado | Lagoa | Cobertura Vegetal e Uso do Solo | Lagoa |
| — Estrada | Limite de sub-bacia | Remanescente de Mata Atlântica | Campineira |
| — Curso d'água | | Mata Alterada | Pasto |
| | | Mata Ciliar | Pasto Sujo |
| | | Afloramento Rochoso | |



REFERÊNCIA: Folha Azurita, SF-23-X-A-II-1-NO, Escala 1/25.000, DSG, 1981.

FIGURA 5.22 – Uso do Solo e Cobertura Vegetal da Bacia do Ribeirão Mato Frio

TABELA 5.6 – Distribuição dos Usos do Solo em Porcentagem das Áreas de Drenagem de Cada Sub-Bacia

	Sub-Bacia 01	Sub-Bacia 02	Sub-Bacia 03	Sub-Bacia 04	Sub-Bacia 05	Sub-Bacia 06	Interbacias
Pasto	82%	70%	69%	75%	63%	28%	71%
Pasto Sujo	-	2.2%	5.1%	-	4.0%	-	-
Remanescente de Mata Atlântica	7.0%	-	18%	9.5%	21%	72%	4.4%
Mata Alterada	9.5%	20%	6.4%	11%	5.8%	-	25%
Lagoa	0.13%	-	-	0.20%	0.22%	-	-
Mata Ciliar	1.7%	7.4%	1.2%	-	2.0%	-	-
Campineira	-	-	-	4.4%	-	-	-
Afloramento Rochoso	-	-	-	-	4.1%	-	-

5.4 Aspectos Hidroclimatológicos

5.4.1 Malha de Monitoramento Hidrometeorológico

O plano de monitoramento da Bacia de Juatuba contemplou a implantação progressiva da rede hidrometeorológica. Até o ano de 1975 iniciaram-se as operações de 11 estações fluviométricas, três delas equipadas com linígrafo (Estações Cândido, Fazenda Sobradinho e Mateus Leme), e 16 estações pluviométricas, quatro delas equipadas com pluviógrafos (Estações Alto da Boa Vista, Juatuba, Mateus Leme e Queiroz). Entre os anos de 1975 e 1981 foram extintas nove estações fluviométricas, incluindo as três linigráficas, e quatro pluviométricas, entre elas a estação pluviográfica de Queiroz. Neste mesmo período foram instaladas outras sete estações fluviométricas, uma das quais com linígrafo (Estação Fazenda Laranjeiras, instalada em julho de 1979) e cinco novas estações pluviométricas, sendo que a estação de Bocaina, instalada em dezembro de 1976 foi extinta em novembro de 1980. Em 1981, quando da publicação do boletim pelo DNAEE, “*Bacia Representativa de Juatuba - dados atualizados até 1975*” (FRANZ, 1981) a Bacia de Juatuba contava com nove estações fluviométricas (uma linigráfica) e 16 estações pluviométricas (três pluviográficas).

No início da década de 80 foi construída pela COPASA uma barragem para captação de água no ribeirão Serra Azul. Os postos de monitoramento fluviométricos localizados na área de influência do reservatório foram desativados, entre eles dois equipados com linígrafos

(Cândido e Fazenda Sobradinho) e dois com linímetros (Fazenda Curralinho e Vargem Grande). De forma compensatória e com o intuito de melhorar o nível de detalhamento das informações hidrológicas na bacia do ribeirão Serra Azul, a COPASA implantou dez estações fluviométricas (sete linimétricas e três linigráficas), instalou um linígrafo e um pluviógrafo na estação Jardim e uma estação climatológica, a qual entrou em operação em janeiro de 1985 (DRUMOND, 2004).

A partir de meados da década de 90, o Centro de Desenvolvimento Nuclear – CDTN, em parceria com a UFMG, e o sistema CPRM/ANA vêm desenvolvendo uma série de projetos de pesquisa na Bacia Representativa de Juatuba. No ano de 2005, o Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT e a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP realizaram uma chamada pública para pesquisa, desenvolvimento e inovação em áreas técnicas objetivando o desenvolvimento de projetos de pesquisa em Bacias Representativas e Experimentais do Brasil. Para a Bacia Representativa de Juatuba, dois projetos foram contratados. São eles: “*Estudo da Formação de Escoamentos Utilizando a Técnica de Traçadores, na Bacia Representativa de Juatuba - Alto São Francisco*”, o qual foi executado pelo CDTN e já se encontra encerrado, e “*Estudo dos Processos Hidrológicos em Bacias Representativas do Cerrado e do Semi-Árido Mineiro*”, em desenvolvimento pela UFMG e CPRM. Ambos os projetos contribuíram significativamente para o refinamento e modernização da malha de monitoramento hidrometeorológico da bacia.

Uma síntese das informações sobre o monitoramento pode ser visualizada nas Tabelas 5.7 e 5.8.

TABELA 5.7 – Estações Pluviométricas e Meteorológicas na Bacia de Juatuba

Estação	Data de Instalação	Data de Extinção	Órgão Responsável	Observações
1. Alto da Boa Vista	01/10/1972		DNAEE/ANA	Estação Climatológica
2. Barro Preto	20/05/1970		DNAEE/ANA	
3. Calambau	20/05/1970		DNAEE/ANA	
4. Faz. Água Limpa	21/05/1970	29/02/1988	DNAEE	
5. Faz. Coqueiros	09/04/1974		DNAEE/ANA	
6. Faz. Curralinho	08/12/1972		DNAEE/ANA	
7. Faz. do Mosquito	08/09/1972	28/02/1986	DNAEE	
7ª. Escola Veterinária	01/03/1986		DNAEE/ANA	
8. Faz. Sesmaria	05/09/1972	30/04/1979	DNAEE	
9. Faz. Vista Alegre	21/05/1970		DNAEE/ANA	
10. Juatuba	17/06/1970		DNAEE/ANA	c/ Pluviógrafo
11. Jusante Carrapato	08/12/1970	26/06/1978	DNAEE	
12. Mateus Leme I	24/03/1941	31/12/1976	DNAEE	
13. Mateus Leme II	13/09/1972		DNAEE/ANA	c/ Pluviógrafo
14. Queiroz	16/06/1970	13/08/1979	DNAEE	c/ Pluviógrafo até 1979
15. Pedreira	30/05/1970	19/02/1987	DNAEE	c/ Pluviógr. entre 1979 e 82
16. Serra Azul	07/12/1972		DNAEE/ANA	Est. Climat. a partir de 1887
17. Bocaina	21/12/1976	04/11/1980	DNAEE	
18. Estiva	29/12/1976		DNAEE/ANA	
19. Faz. Laranjeiras	25/03/1978		DNAEE/ANA	c/ Pluviógr. a partir de 1991
20. Serra da Saudade	24/01/1978		DNAEE/ANA	
21. Tijuco	23/12/1976	25/07/1982	DNAEE	
22. Jardim	27/12/1982		DNAEE/ANA	c/ Pluviógr. a partir de 1983
23. Faz. dos Cavalos	Janeiro de 1985		COPASA	c/ Pluviógrafo
24. Faz. Santa Rita	15/02/1988		DNAEE/ANA	c/ Pluviógrafo

Fonte: Drumond (2004)

TABELA 5.8 – Estações Fluviométricas na Bacia Representativa de Juatuba

Estação	Curso d'água	Data de Instalação	Data de Extinção	Órgão Responsável	Observações
1. Azurita	Rib. Sesmaria	04/09/1972	12/07/1982	DNAEE	
2. Azurita	Rib. Soledade	05/09/1972	10/07/1982	DNAEE	
3. Cândidos	Rib. Serra Azul	01/11/1972	31/08/1980	DNAEE	c/ Linígrafo
4. Faz. Curralinho	Cor. Curralinho	12/09/1972	17/08/1979	DNAEE	
5. Faz. do Mosquito	Cor. Brumado	06/10/1972	31/12/1977	DNAEE	
6. Faz. do Roque	Rib. Diogo	02/09/1972	31/12/1977	DNAEE	
7. Faz. Sesmaria	Cor. Arrudas	05/09/1972	30/04/1979	DNAEE	
8. Faz. Sobradinho	Rib. Serra Azul	01/11/1972	20/07/1981	DNAEE	c/ Linígrafo
9. Jusante Carrapato	Rib. Serra Azul	02/09/1972	26/06/1978	DNAEE	
10. Mateus Leme	Rib. Mateus Leme	02/11/1972	09/08/1979	DNAEE	c/ Linígrafo
11. Vargem Grande	Rib. Diogo	13/09/1972	22/07/1981	DNAEE	
12. Faz. Laranjeiras	Rib. Mato Frio	25/08/1976		DNAEE/ANA	c/ Linígrafo
13. Faz. Pasto Grande	Rib. Serra Azul	24/05/1978		DNAEE/ANA	
14. Jardim	Rib. Serra Azul	30/09/1978		DNAEE/ANA / COPASA	c/ Linígrafo
15. Varginha	Cór. Contendas	10/12/1977	08/07/1982	DNAEE	
16. Azurita	Rib. Cachoeira	22/09/1979	01/07/1988	DNAEE	
17. Mateus Leme Mont.	Rib. Mateus Leme	09/08/1979	09/07/1982	DNAEE	
18. Suzana	Rib. Mateus Leme	19/01/1980		DNAEE/ANA	
19. Sítio do Nazário	Cor. Curralinho	Out. 1983		COPASA	
20. Vicente Nunes	Rib. Jacu	Out. 1983		COPASA	
21. Vertedouro	Rib. Jacu	Out. 1983		COPASA	
22. Meio Fio	Cor. Brejo	Out. 1983		COPASA	
23. Nelson Pimenta	Cor. Pedreiras	Out. 1983		COPASA	
24. Hélio	Rib. Diogo	Out. 1983		COPASA	c/ Linígrafo
25. Estância Serra Azul	Rib. Diogo	Out. 1983	Mai. 1988	COPASA	c/ Linígrafo
26. Faz. Solar	Rib. Estiva	Out. 1983		COPASA	c/ Linígrafo
27. Zenon	Cor. Potreiro	Out. 1983		COPASA	
28. Tomada d'água	Barrag. Serra Azul	Nov. 1983		COPASA	c/ Linígrafo
29. Bom Jardim	Rib. Sesmaria	1/307/1982		DNAEE/ANA	
30. Mateus Leme Aldeia	Rib. Mateus Leme	09/07/1982		DNAEE/ANA	

Fonte: Drumond (2004)

Focando a área em estudo, as estações linigráficas dotadas de sondas foram instaladas especificamente para o atendimento ao projeto de separação de escoamentos realizado pelo CDTN (Estudo da Formação de Escoamentos Utilizando a Técnica de Traçadores, na Bacia Representativa de Juatuba - Alto São Francisco) e iniciaram a operação em outubro de 2006.

Com o intuito de permitir a realização de estudos futuros sobre o comportamento hidrológico de uma área com vegetação ainda preservada, o CDTN definiu a localização da estação fluviométrica da sub-bacia 6 a montante do exutório de sua delimitação nos estudos de separação de escoamentos. No escopo dos referidos estudos foram instalados ainda mais três estações com leituras contínuas de temperatura e condutividade elétrica das águas escoadas superficialmente nos eventos de chuva. Essas estações foram denominadas estações de monitoramento de enxurradas.

Os tipos de vertedores para instalação das sondas foram escolhidos de acordo com as características de cada local, sendo construídos vertedores retangulares de madeira nas estações das sub-bacias 1, 3, 4 e 5, na sub-bacia 2 construiu-se um vertedor de concreto na saída de um bueiro e na sub-bacia 6 foi instalada uma calha Parshall de 6 polegadas.

Nas Tabelas 5.9 a 5.11 estão apresentadas as principais características das estações linigráficas instaladas na área em estudo e na Figura 5.23 pode ser visualizada a malha de monitoramento implantada na bacia do ribeirão Mato Frio.

TABELA 5.9 – Estações Linimétricas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Estação	Coordenadas UTM		Área de Drenagem (km ²)	Início de Operação
	L	N		
Sub-Bacia 01	552.431	7.778.731	0,89	10/10/2006
Sub-Bacia 02	552.300	7.778.630	1,71	11/10/2006
Sub-Bacia 03A*	553.150	7.778.680	1,34	11/10/2006
Sub-Bacia 03B**	553.006	7.778.476	1,32	14/02/2007
Sub-Bacia 03C	552.950	7.778.300	1,76	20/08/2008
Sub-Bacia 04	553.000	7.777.800	0,84	10/10/2006
Sub-Bacia 05	554.100	7.777.240	2,32	10/10/2006
Sub-Bacia 06	553.389	7.776.640	1,73	12/10/2006
Fazenda Laranjeiras	554.130	7.777.165	10,7	12/10/2006

* Estação destruída em um evento de cheia em 25/12/2006;

** Estação destruída em um evento de cheia em 24/03/2008.

Fonte: CDTN (2008)

TABELA 5.10 – Características dos Vertedores de Monitoramento Fluviométrico na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Estação	Tipo	Dimensões			H _{máx} (m)
		Largura da soleira (m)	Comprimento do Canal (m)	Altura Interna da Soleira (m)	
Sub-Bacia 01	Retangular de madeira, sem canal, com 2 contrações laterais	1,0	-	0,40	0,59
Sub-Bacia 02	Concreto retangular, com canal, s/ contrações laterais	0,78	-	0,19	0,76
Sub-Bacia 03A	Retangular de madeira, sem canal, com 2 contrações laterais	0,84	-	0,15	0,57
Sub-Bacia 03B	Retangular de madeira, sem canal, com 2 contrações laterais	0,83	-	0,05	0,90
Sub-Bacia 03C	Retangular de madeira com canal e sem contrações laterais	0,80	2,50	0,15	0,70
Sub-Bacia 04		0,80	3,00	0,10	0,73
Sub-Bacia 05		0,80	3,00	0,20	0,48
Sub-Bacia 06	Calha Parshall	W = 6 polegadas (15,24cm)			
Fazenda Laranjeiras	Calha natural	-	-	-	-

Fonte: CDTN (2008)

TABELA 5.11 – Equação dos Vertedores das Seções de Monitoramento Fluviométrico na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Estação	Equação*
Sub-Bacia 01	$Q = 1,838 (L-0,2H)H^{3/2}$
Sub-Bacia 02	$Q = 1,838 LH^{3/2}$
Sub-Bacia 03A	$Q = 1,838 (L-0,2H)H^{3/2}$
Sub-Bacia 03B	
Sub-Bacia 03C	$Q = 1,838 LH^{3/2}$
Sub-Bacia 04	
Sub-Bacia 05	
Sub-Bacia 06	$Q = 0,266 H^{1,5773}$
Fazenda Laranjeiras	$Q = 2,6039 (H - 0,08)^{1,7268}$ para $0 < H < 1,00\text{m}$; $Q = 4,9157 (H - 0,64)^{0,7617}$ para $1,00 < H < 2,82\text{m}$; $Q = 0,2409 H^{3,4859}$ para $2,82 < H < 2,96\text{m}$; $Q = 4,58 \times 10^{-8} (H + 1,9)^{12,1807}$ para $H > 2,96\text{m}$.

*Onde Q é a vazão em m³/s, L é a largura da soleira em m e H a lâmina d'água sobre a soleira em m.

Fonte: CDTN (2008)

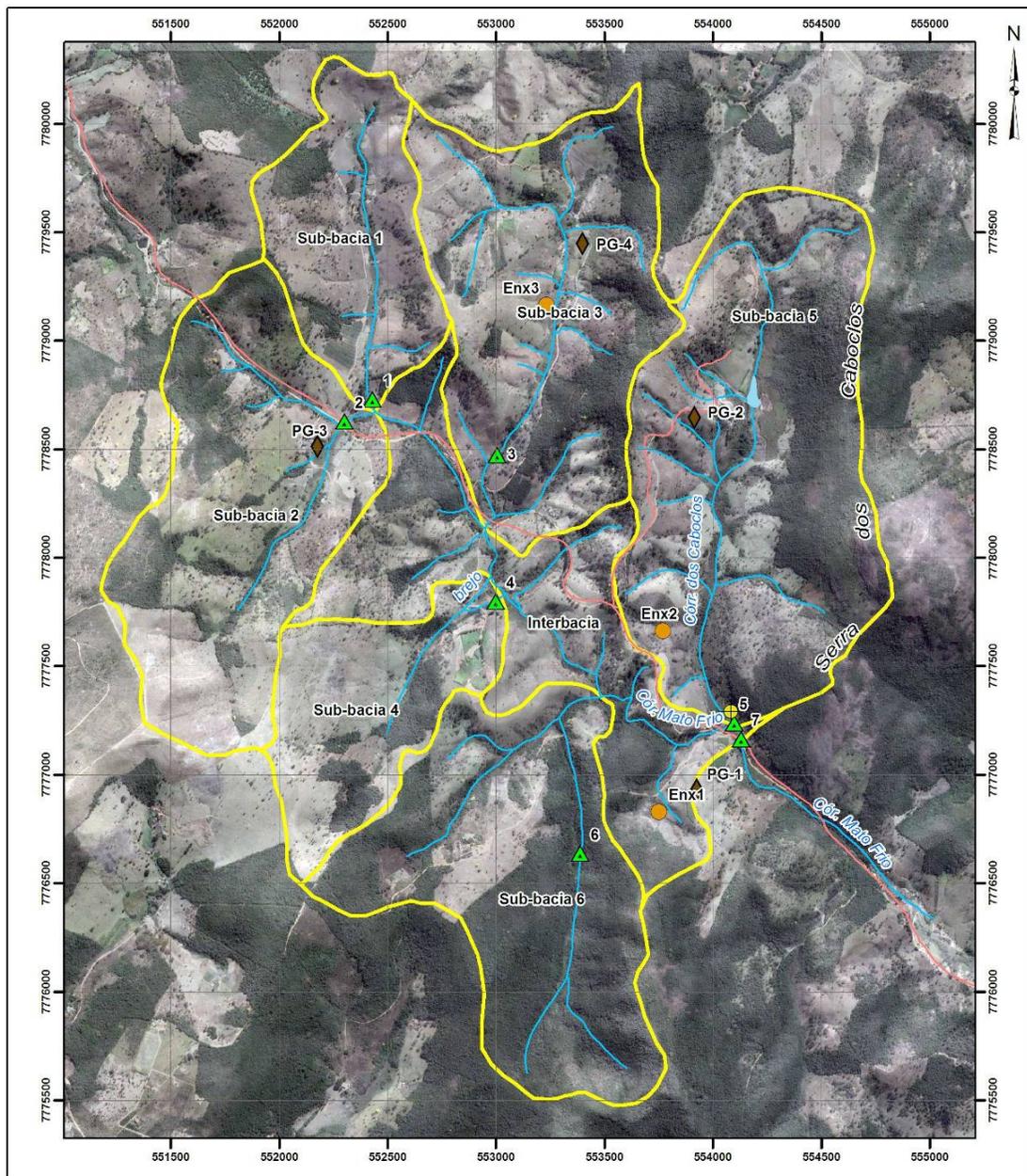
Quanto às estações pluviográficas localizadas na área em estudo, uma delas é operada pela ANA e possui registro contínuo de alturas de chuva desde o ano de 1991. As demais estações pluviográficas foram instaladas no contexto do Estudo da Formação de Escoamentos (CDTN, 2008). As características das estações instaladas pelo CDTN podem ser visualizadas na Tabela 5.12.

TABELA 5.12 – Estações Pluviográficas Localizadas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Estação	Coordenadas UTM		Início de Operação
	L	N	
PG-1 - Fazenda Laranjeiras	553.857	7.777.038	1991
PG-2 - Fazenda Dengo	553.915	7.778.647	07/11/2006*
PG-3 - Fazenda Chico	552.176	7.778.514	12/10/2006
PG-4 - Fazenda Deputado	553.459	7.779.469	12/10/2006

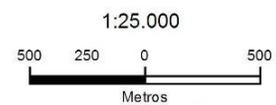
*OBS: O *datalogger* do pluviógrafo foi retirado e recolhido ao CDTN, em 23/11/2006, porque apresentava problemas e não registrava os dados.

Fonte: CDTN (2008)



Legenda

- | | | | |
|--|----------------------------|--|---------------------|
| | Piezômetro | | Estrada |
| | Monitoramento de enxurrada | | Curso d'água |
| | Monitoramento de vazão | | Lagoa |
| | Estação Pluviográfica | | Limite de sub-bacia |



Sistema de Projeção UTM
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 45° W Gr.
 Acrescidas as constantes 10.000 e 500 km, respectivamente.
 DATUM HORIZONTAL: SAD 69

REFERÊNCIA: Folha Azurita, SF-23-X-A-II-1-NO, Escala 1/25.000, DSG, 1981.

FIGURA 5.23 – Malha de Monitoramento na Bacia do Ribeirão Mato Frio

5.4.2 Clima

O clima da região é caracterizado por uma estação quente e chuvosa, entre os meses de novembro e março, e época seca predominante entre junho e agosto (NEVES *et al.*, 2004). Conforme a série de dados climatológicos das estações Serra Azul (código 2044054) e Alto da Boa Vista (código 2044021), as temperaturas médias mensais variam entre 16°C e 23°C e os extremos valores de temperatura do ar são de 4°C e 34°C. Os meses mais frios são junho, julho e agosto e os meses mais quentes são janeiro, fevereiro e março. A partir dos dados de temperatura do ar e de precipitação o clima foi classificado segundo Köppen como sendo Clima Tropical de Altitude (Cwa), também caracterizado por ser um clima temperado úmido com inverno seco e verão quente.

Os dados de temperatura do ar das estações climatológicas localizadas na bacia Representativa de Juatuba foram compilados e podem ser visualizados nas Figuras 5.24 e 5.25.

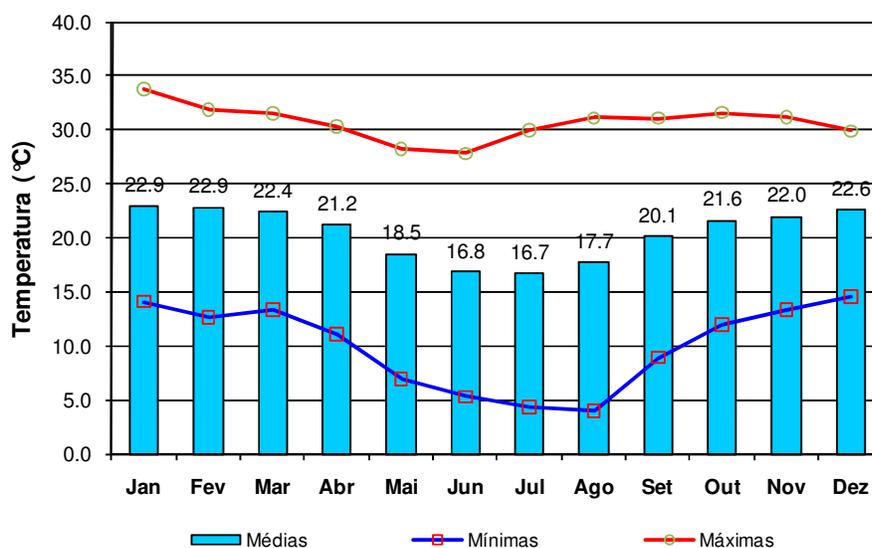


FIGURA 5.24 – Temperaturas Médias Mensais do Ar Registradas na Estação Climatológica de Serra Azul (2044054) – Período 1987 a 2008

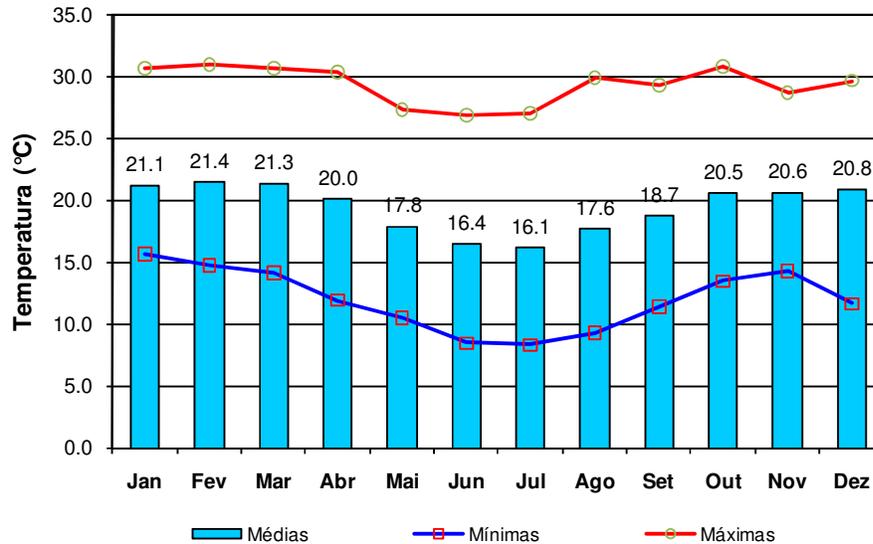


FIGURA 5.25 - Temperaturas Médias Mensais do Ar Registradas na Estação Climatológica de Alto da Boa Vista (2044021) – Período 1972 a 2008

A série de dados de umidade relativa do ar gerada na estação climatológica de Serra Azul aponta para o mês mais seco (setembro) a umidade média de 68,7% e para o mês mais úmido (fevereiro) a umidade média de 86,7%.

Ao compilar os resultados alcançados nos estudos de separação de escoamentos (CDTN, 2008), onde foram realizados balanço hídrico e ensaios de infiltração com traçador radioativo (trítio) em campo, observa-se que as taxas de escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração na bacia do ribeirão Mato Frio correspondem respectivamente a 7%, 18% e 75% dos totais precipitados nos anos em que os experimentos foram realizados (2006 e 2007), equivalentes a 88 mm, 243 mm e 1.010 mm.

5.4.3 Pluviometria

Conforme descrito anteriormente, a rede pluviométrica existente na Bacia Representativa de Juatuba é composta de estações operadas pela ANA e estações operadas pelo CDTN. Na rede pertencente à ANA os dados diários de precipitação são coletados, armazenados em banco de dados, consistidos e disponibilizados para consulta no portal de internet www.ana.gov.br.

O histórico de dados pluviométricos é apresentado na Figura 5.26, onde pode ser observado o número de meses sem dados de chuva nos anos com monitoramento incompleto (campo em

atribuídas ao relevo mais acidentado da Serra dos Caboclos, Serra Azul e Itatiaia. As estações localizadas mais ao norte da Bacia Representativa de Juatuba, como Calambau (2044020), Serra da Saudade (2044047) e Serra Azul (2044054), destacam-se por apresentar os menores valores de total anual médio, inferiores a 1450 mm, e as estações localizadas próximo aos divisores de água da porção sul e sudoeste, como Fazenda Laranjeiras (2044041) e Jardim (2044052), possuem valores de totais anuais médios mais elevados, superando 1500 mm. A distribuição dos totais anuais precipitados ao longo dos anos pode ser observada na Figura 5.30.

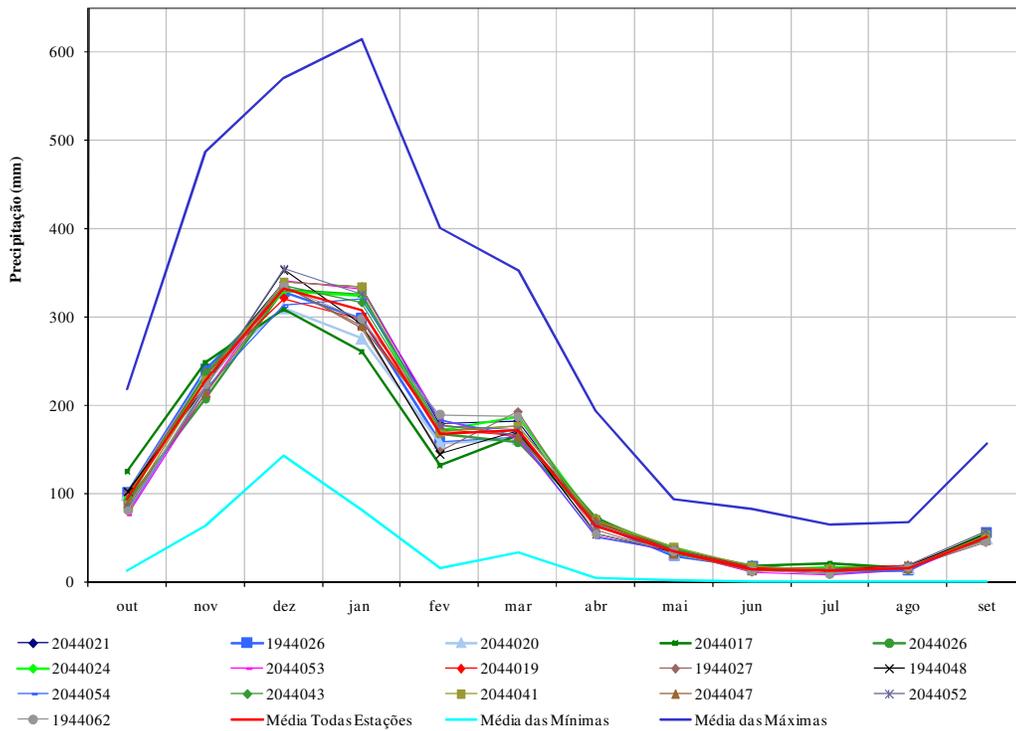


FIGURA 5.27 – Distribuição das Precipitações Médias Mínimas e Máximas Mensais Registradas nas Estações Selecionadas

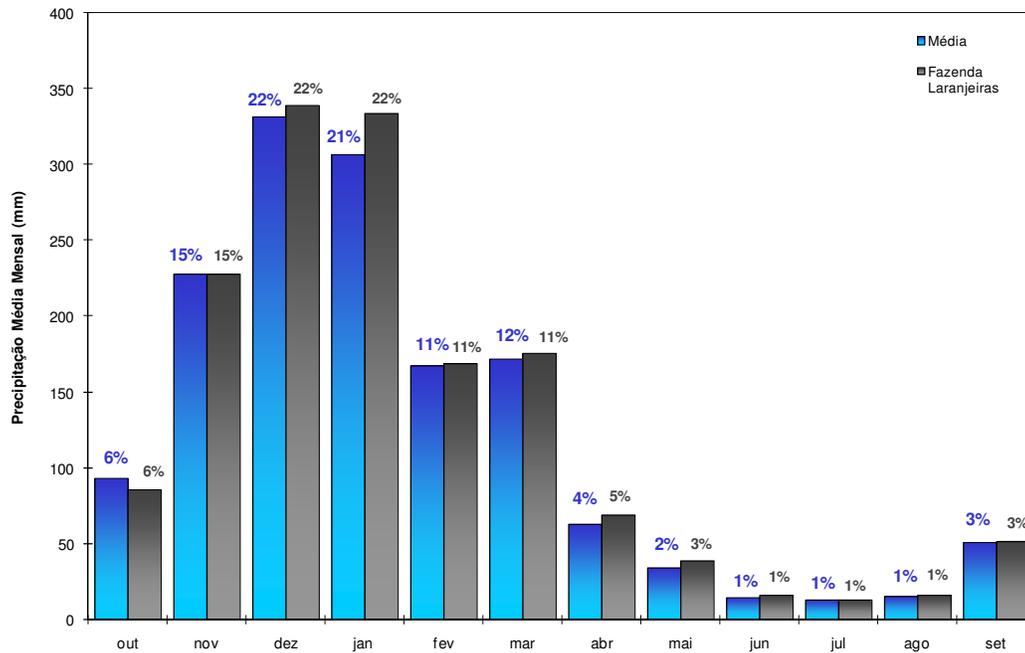


FIGURA 5.28 – Média das Precipitações Médias Mensais Registradas nas Estações Seleccionadas e Precipitações Médias Mensais na Estação Fazenda Laranjeiras

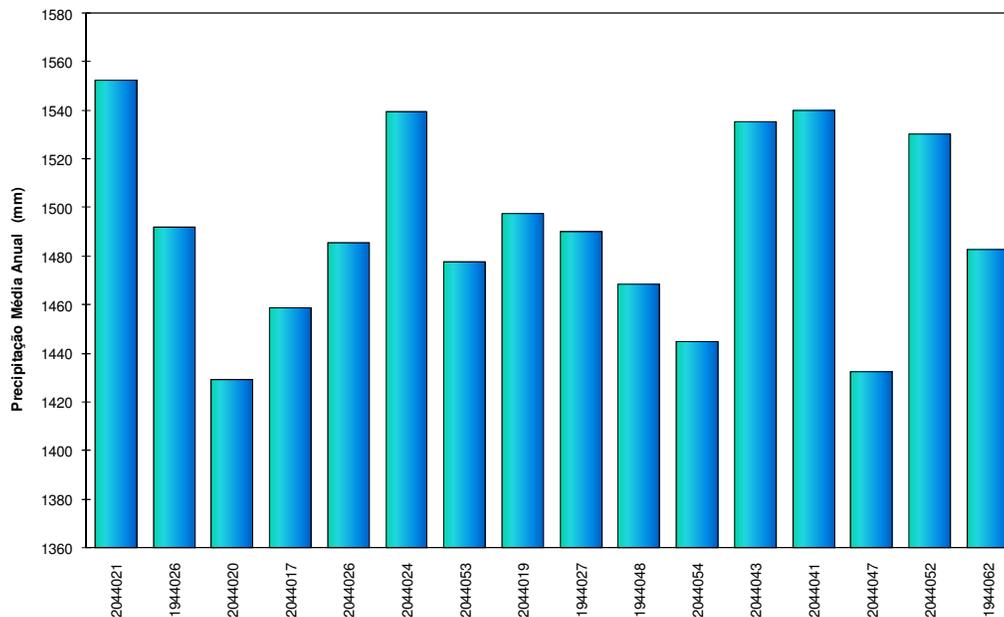


FIGURA 5.29 – Precipitações Totais Médias Anuais Registradas nas Estações Seleccionadas

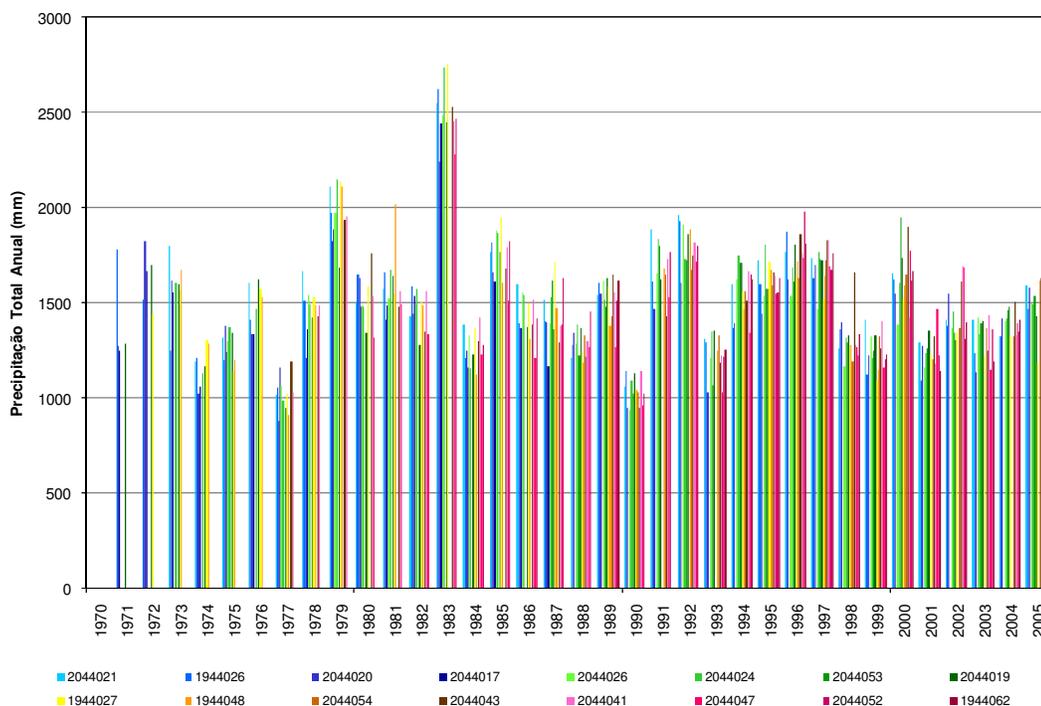


FIGURA 5.30 – Totais Anuais de Precipitações Registradas nas Estações Seleccionadas

Apesar das séries de dados preenchidos de precipitação das estações localizadas na área em estudo possuírem apenas dois anos completos, o comportamento das chuvas na bacia do ribeirão Mato Frio nestes anos não diferiu de forma significativa do comportamento geral da Bacia Representativa de Juatuba. Nas Figuras 5.31 e 5.32 pode ser visualizada a distribuição das precipitações médias mensais e os totais mensais registrados.

A média dos totais anuais no ribeirão Mato Frio varia de 1.103 mm na estação PG-04 a 2.155 mm na estação PG-03. No ano hidrológico 2006/2007 as precipitações no trimestre mais úmido superaram as médias e nos demais meses os totais mensais foram inferiores. No ano hidrológico posterior a relação entre os totais mensais e as médias foi inversa.

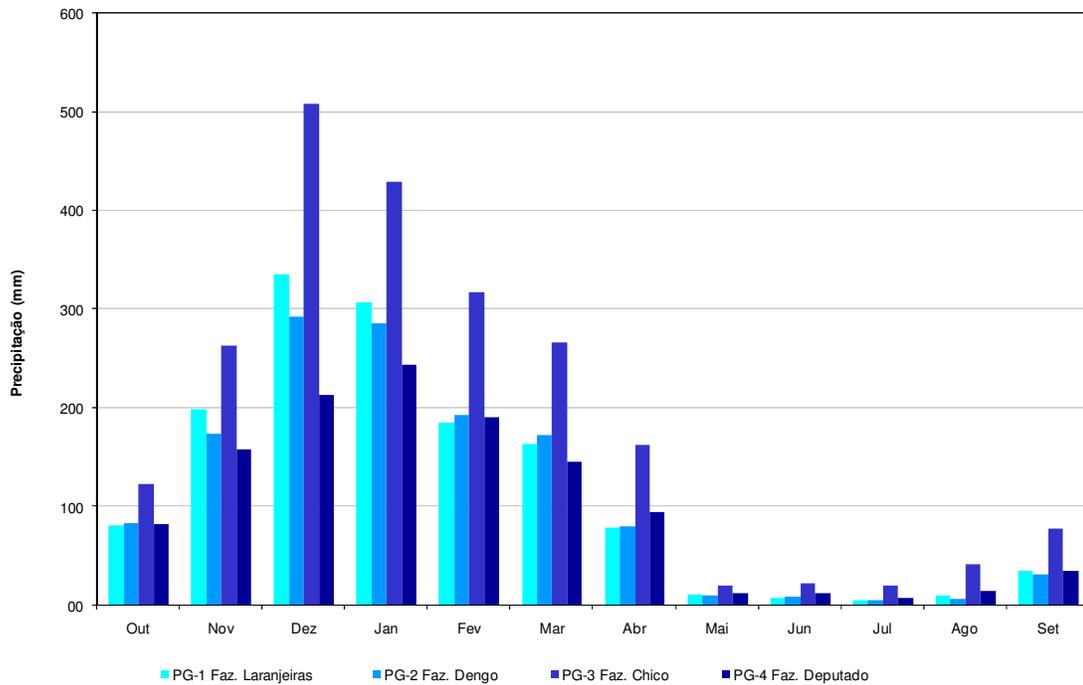


FIGURA 5.31 – Distribuição das Precipitações Médias Mensais Registradas nas Estações Localizadas no Ribeirão Mato Frio

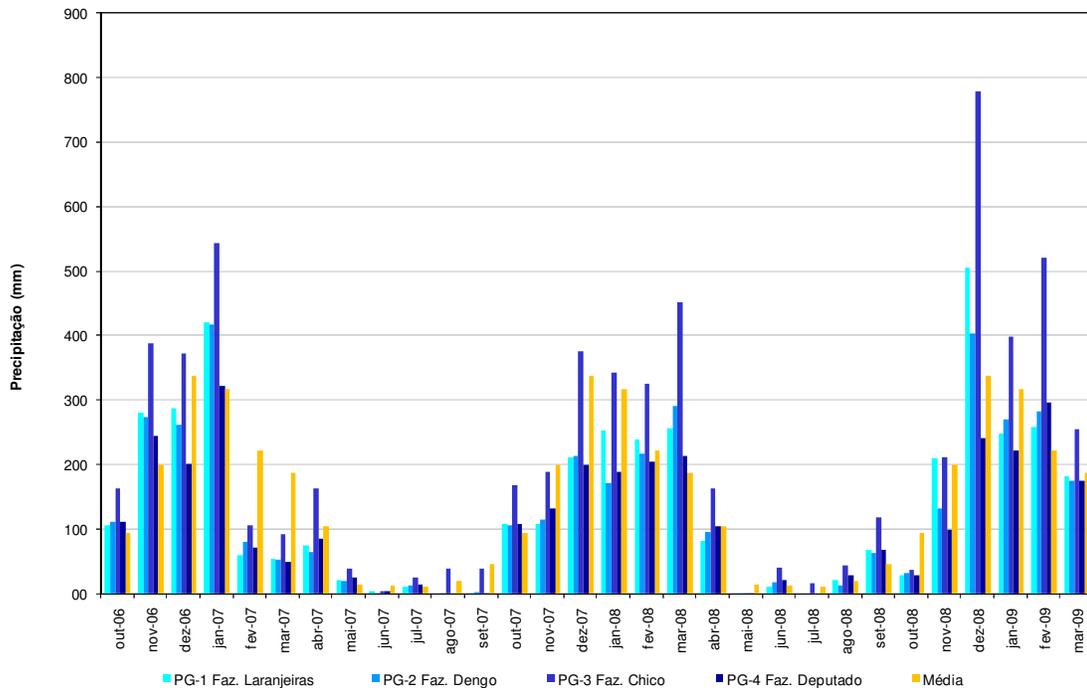
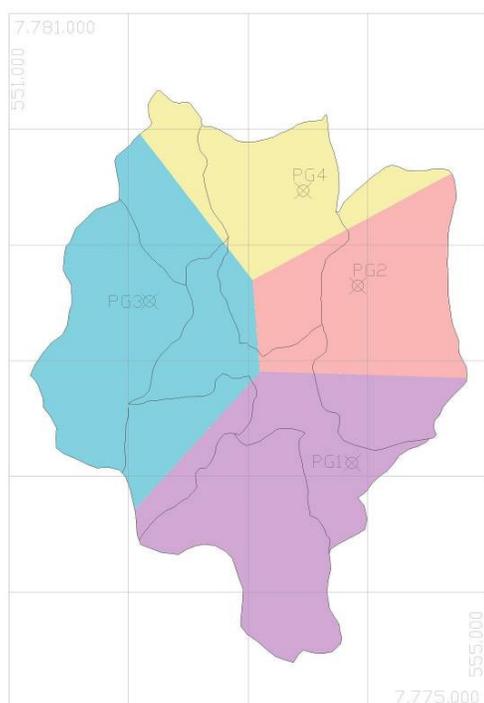


FIGURA 5.32 – Totais Mensais e Precipitações Médias Registrados nas Estações Localizadas no Ribeirão Mato Frio

A partir da observação da homogeneidade do comportamento das chuvas na bacia do ribeirão Mato Frio e cálculo de média ponderada pelo método de Thiessen (CHOW, *et al.*, 1988) foi tomado na estimativa das precipitações totais dos anos hidrológicos de 2006/2007 e 2007/2008. A localização das estações e as respectivas áreas de influência podem ser observadas na Figura 5.33.



	PG1	PG2	PG3	PG4
Sub-Bacia 01	0,0%	0,0%	62,2%	37,8%
Sub-Bacia 02	0,0%	0,0%	100%	0,0%
Sub-Bacia 03	0,0%	24,7%	9,21%	66,1%
Sub-Bacia 04	37,3%	0,0%	62,7%	0,0%
Sub-Bacia 05	24,6%	66,2%	0,0%	9,19%
Sub-Bacia 06	100%	0,0%	0,0%	0,0%
Interbacias	53,0%	8,38%	38,5%	0,091%
Bacia Rib. Mato Frio	31,7%	19,6%	32,9%	15,8%

FIGURA 5.33 – Áreas de Influência Utilizadas no Cálculo da Média de Thiessen

As médias dos totais anuais de precipitação, após a ponderação das áreas de influência de cada estação pelo método de Thiessen (CHOW, *et al.*, 1988), podem ser consultadas na Tabela 5.13.

TABELA 5.13 – Totais Anuais Médios nos Anos Civil e Hidrológico das Sub-Bacias do Ribeirão Mato Frio

	Sub-Bacia 01	Sub-Bacia 02	Sub-Bacia 03	Sub-Bacia 04	Sub-Bacia 05	Sub-Bacia 06	Bacia Rib. Mato Frio
TOTAL 2007	1491,6	1783,8	1099,8	1519,0	1073,3	1074,3	1299,5
TOTAL 2008	2022,4	2525,7	1376,4	2208,0	1470,8	1674,6	1832,0
Média Anual	1757,0	2154,7	1238,1	1863,5	1272,1	1374,5	1565,7
TOTAL 2006/2007	1654,4	1974,3	1247,4	1730,0	1285,6	1319,9	1500,3
TOTAL 2007/2008	1867,4	2233,5	1363,3	1907,6	1311,7	1360,3	1621,1
Média Ano Hidrológico	1760,9	2103,9	1305,3	1818,8	1298,6	1340,1	1560,7

Pelas estações selecionadas estão representados os dois principais cursos de água da Bacia Representativa de Juatuba. São eles o ribeirão Serra Azul e o ribeirão Mateus Leme. As estações de Fazenda Laranjeiras, Fazenda Pasto Grande e Jardim estão localizadas na bacia do ribeirão Serra Azul, enquanto as estações Bom Jardim, Mateus Leme – Aldeia e Suzana estão na bacia do ribeirão Mateus Leme.

As séries históricas das vazões específicas estão representadas na Figura 5.35. Pode-se observar que a Bacia Representativa de Juatuba possui um comportamento hidrológico bastante semelhante em termos de vazão específica.

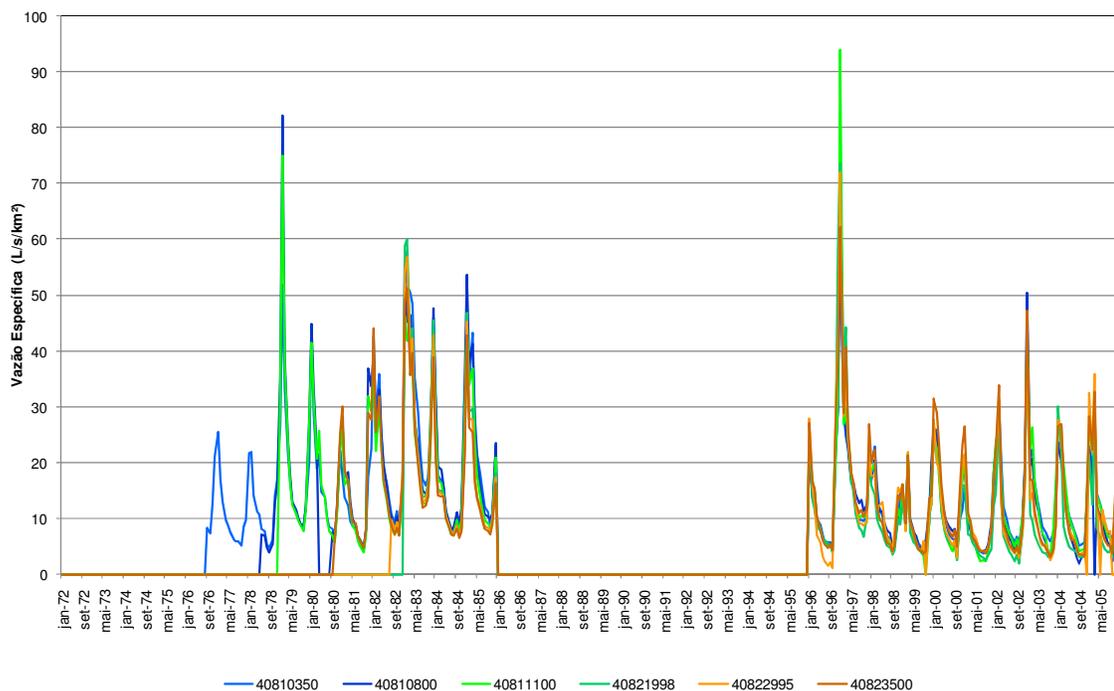


FIGURA 5.35 – Série Histórica das Estações Fluviométricas Selecionadas para Caracterização do Regime de Vazões na Bacia Representativa de Juatuba

O regime de vazões na área em estudo pode ser caracterizado pela estação fluviométrica Fazenda Laranjeiras, localizada no exutório da área em estudo, e por outras seis estações fluviográficas em operação desde outubro de 2006. As séries históricas das estações operadas pelo CDTN estão apresentadas na Figura 5.36.

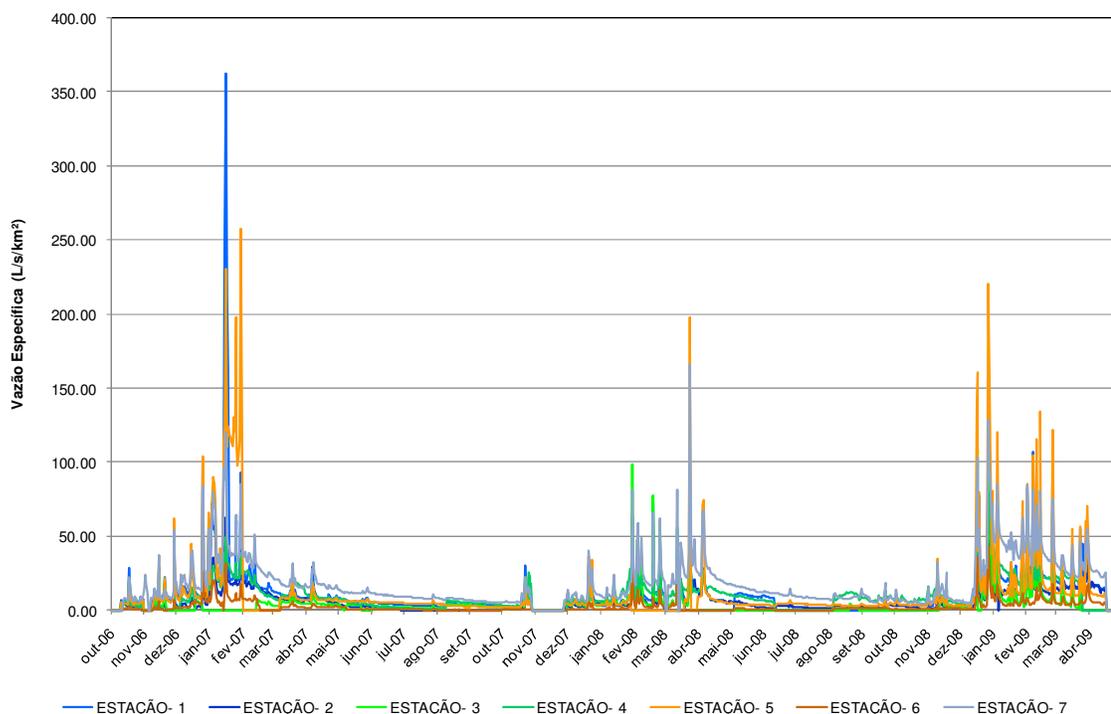


FIGURA 5.36 – Série Histórica das Estações Fluviométricas Instaladas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Na Tabela 5.15 estão apresentadas as vazões específicas para as estações instaladas na bacia do ribeirão Mato Frio.

TABELA 5.15 – Vazões Específicas das Estações Fluviométricas Selecionadas

Estação Fluviográfica	Estação 01	Estação 02	Estação 03	Estação 04	Estação 05	Estação 06	Estação 07
Ad (km²)	0,8944	1,71	1,46	0,8373	2,3178	0,81	10,6
Q_{Média} (L/s)	12,83	12,69	10,50	9,42	31,88	2,35	202,96
Q_{esp} (L/s/km²)	14,34	7,42	7,19	11,25	13,76	2,90	19,15

Ad = Área de Drenagem; Q_{Média} = Vazão Média do Período; Q_{esp} = Vazão Específica

Cabe ressaltar que a ocorrência de relação inversa entre os totais anuais precipitados (Tabela 5.13) e vazões específicas produzidas (Tabela 5.15), encontrada para as sub-bacias 2 e 5, é mais comum em bacias de pequenas proporções e indicam a não proporcionalidade entre bacia hidrológica e hidrogeológica.

5.5 Características Hidrológicas

Pelas características fisiográficas e hidrológicas, a bacia do ribeirão Mato Frio pode ser considerada como uma pequena bacia hidrográfica, onde os processos de distribuição temporal e espacial das precipitações podem ser considerados homogêneos e a duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia (GOLDENFUM, 2001).

Apesar do grau de homogeneidade da bacia estudada ser considerável pelo tamanho de sua área de drenagem (10,6 km²), qualquer variabilidade das características físicas passa a ter uma importância relativamente maior do que em médias e grandes bacias, onde pequenas variações no valor de uma propriedade física são desconsideradas pelo comportamento médio da mesma. As características fisiográficas da bacia hidrográfica do ribeirão Mato Frio e das seis sub-bacias nela delimitadas estão detalhadas nos itens a seguir.

Quanto à interação entre a hidrologia de superfície e subterrânea, Mourão (2007) descreve que a vazão de um curso d'água é diretamente influenciada pelo regime de recarga e descarga de água subterrânea, o qual também está atrelado aos demais componentes do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração e a infiltração. Logo, as análises das vazões ao longo do tempo, em especial da curva de recessão, e das componentes do balanço hídrico também são descritas nos próximos itens.

5.5.1 Análise da Morfométrica da Bacia

A bacia hidrográfica do ribeirão Mato Frio é a unidade fisiográfica de referência para a análise morfométrica. São consideradas também as seis sub-bacias nas quais a bacia do ribeirão Mato Frio foi dividida, possibilitando a análise das relações entre as características físicas e as vazões específicas produzidas em cada uma delas.

A análise morfométrica incluiu o cálculo do perímetro (P), área de drenagem (Ad), comprimento máximo da bacia (L), coeficiente de compactidade (Kc), índice de circularidade (Ic), fator de forma (F), relação de alongamento (Re) e o diâmetro equivalente (D). Na Tabela 5.16 estão apresentadas as características físicas levantadas para a bacia do ribeirão Mato Frio, incluindo aquelas relacionadas à forma de cada uma de suas seis sub-bacias.

TABELA 5.16 – Características Morfométricas da Área em Estudo

Bacia/ Característica	Sub- Bacia 01	Sub- Bacia 02	Sub- Bacia 03	Sub- Bacia 04	Sub- Bacia 05	Sub- Bacia 06	Bacia Ribeirão Mato Frio
Ad (km²)	0,89	1,71	1,76	0,84	2,32	1,73	10,68
P (m)	4,18	5,86	6,20	4,39	6,52	6,42	16,09
L (m)	1.996	1.847	2.448	1.693	2.815	2.085	4170
Kc	1,241	1,255	1,309	1,341	1,199	1,367	1,379
IC	0,640	0,626	0,576	0,548	0,686	0,528	0,519
F	0,223	0,501	0,294	0,293	0,293	0,398	0,614
Re	0,533	0,799	0,611	0,611	0,610	0,712	0,884

Os índices utilizados para a caracterização da forma da bacia apontam para formas mais alongadas, tanto na bacia do ribeirão Mato Frio quanto em suas seis sub-bacias. De uma forma geral os coeficientes de compacidade distam-se da unidade e os índices de circularidade são relativamente baixos, inferiores a 0,7. O maior fator de forma encontrado foi para a bacia como um todo ($F = 0,614$), para onde o fator relação de alongamento também foi superior ($Re = 0,884$).

Segundo Tucci (1993), *as cabeceiras, em geral, se encontram as maiores precipitações e as maiores declividades do curso de água. À medida que o comprimento do rio aumenta maior é o amortecimento do escoamento devido ao efeito de armazenamento e ao atrito do leito. O efeito de armazenamento é marcante para rios onde ocorre extravasamento e, em geral, a redução da vazão específica varia com a distância a jusante e, em consequência, com o aumento da área da bacia.*

Ao relacionar o uso do solo e cobertura vegetal (Tabela 5.6) com as vazões específicas (Tabela 5.15), observa-se que a produção de vazões nas sub-bacias do ribeirão Mato Frio possui forte relação ao uso do solo, com menores vazões específicas nas bacias com maiores áreas ocupadas por remanescentes de Mata Atlântica e por Mata Alterada. O decréscimo das vazões específicas em áreas com maior concentração de vegetação densa está diretamente relacionado à evapotranspiração, a qual equivale à soma das parcelas de evaporação da água das chuvas dispostas no solo ou nas folhas e caules das plantas mais a transpiração resultante da vaporização da água contida nos tecidos das plantas e remoção deste vapor para a atmosfera.

Observa-se ainda que, para as bacias menores as vazões específicas são maiores, com exceção da sub-bacia 5, delimitada à esquerda pela Serra dos Caboclos, onde a vazão específica pode ser considerada alta mesmo possuindo a maior área de drenagem entre as seis sub-bacias.

A análise das características morfométricas das sub-bacias inseridas na bacia do ribeirão Mato Frio não devem ser associadas às vazões específicas produzidas nestas áreas sem a consideração das características do uso e ocupação do solo, cobertura vegetal e distribuição das declividades.

5.5.2 Curva de Recessão da Hidrógrafa

Com exceção dos dados da estação fluviométrica instalada no exutório da sub-bacia 4, para a qual foi selecionada a série de dados do ano de 2008, com início da recessão em meados de abril, o ano civil selecionado para representação da cauda de recessão da hidrógrafa foi o ano de 2007, com início da recessão em junho, pelo fato de possuir séries mais completas de dados de vazão nas estações fluviográficas instaladas na área de interesse. Nas Figuras 5.37 a 5.43 estão conjugados os eventos de precipitação, apresentadas as hidrógrafas e ajustadas as curvas de tendência, todas com fator de correlação superior a 90%.

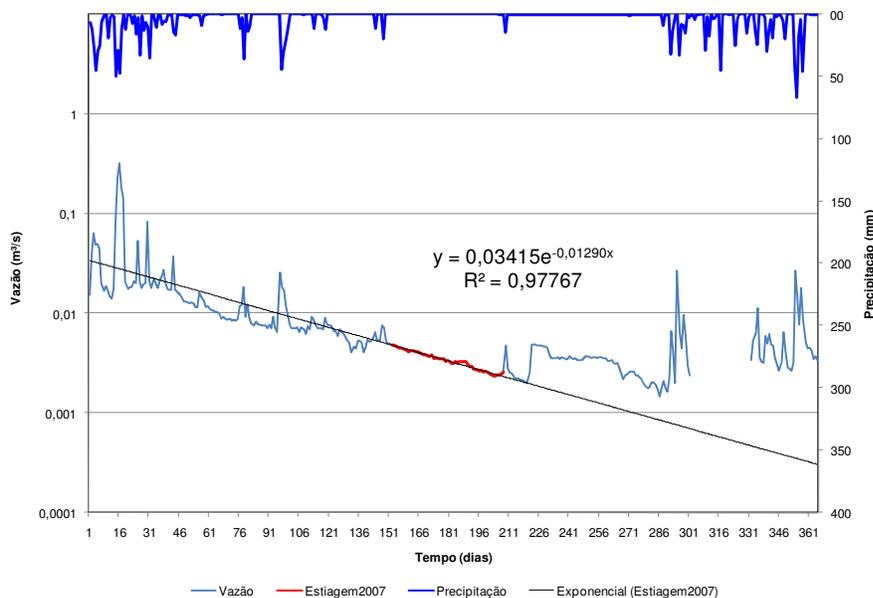


FIGURA 5.37 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 01.

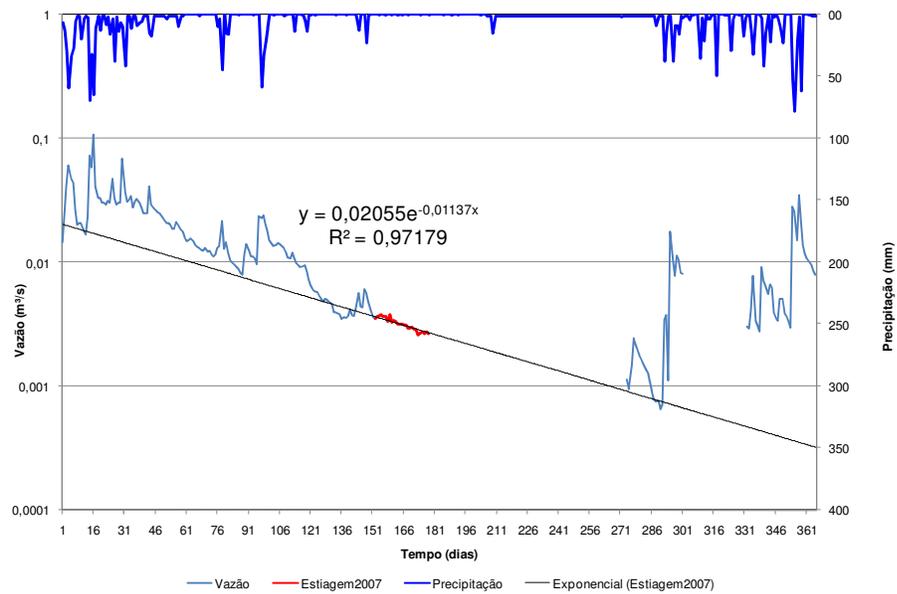


FIGURA 5.38 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 02.

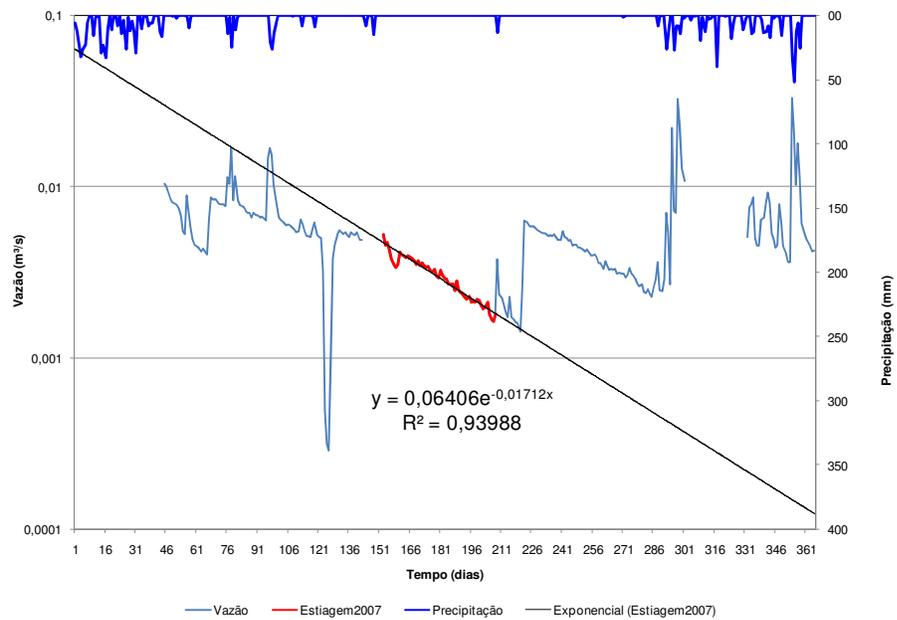


FIGURA 5.39 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 03.

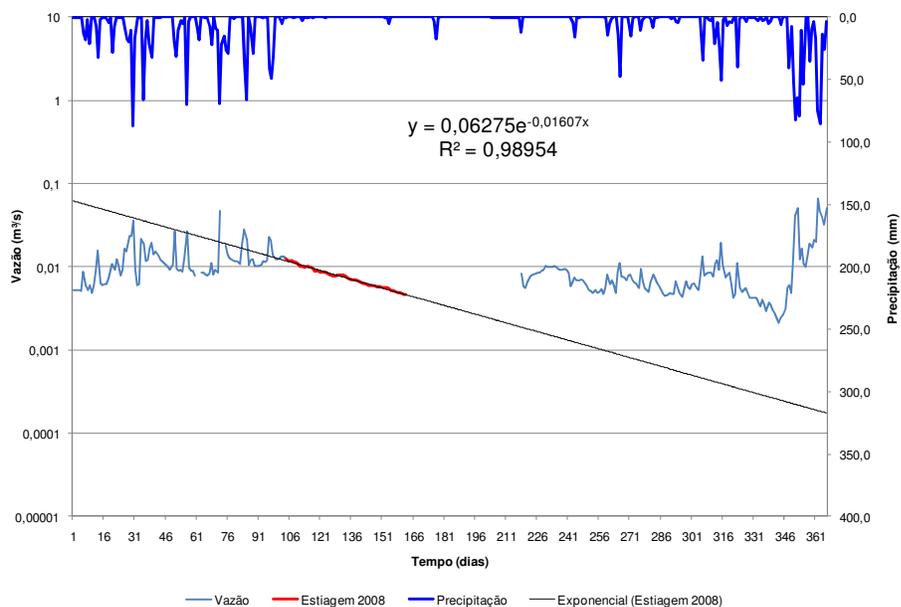


FIGURA 5.40 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 04.

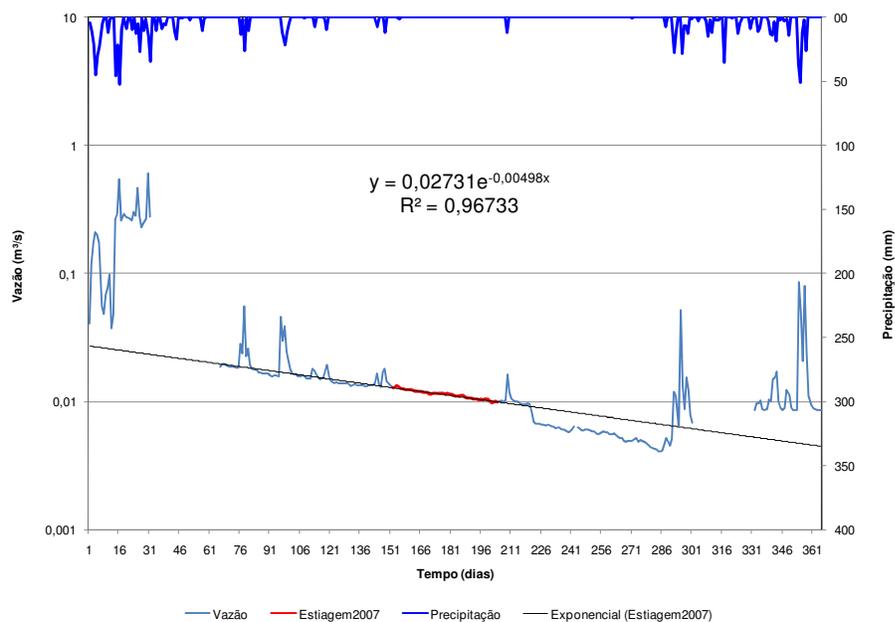


FIGURA 5.41 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 05.

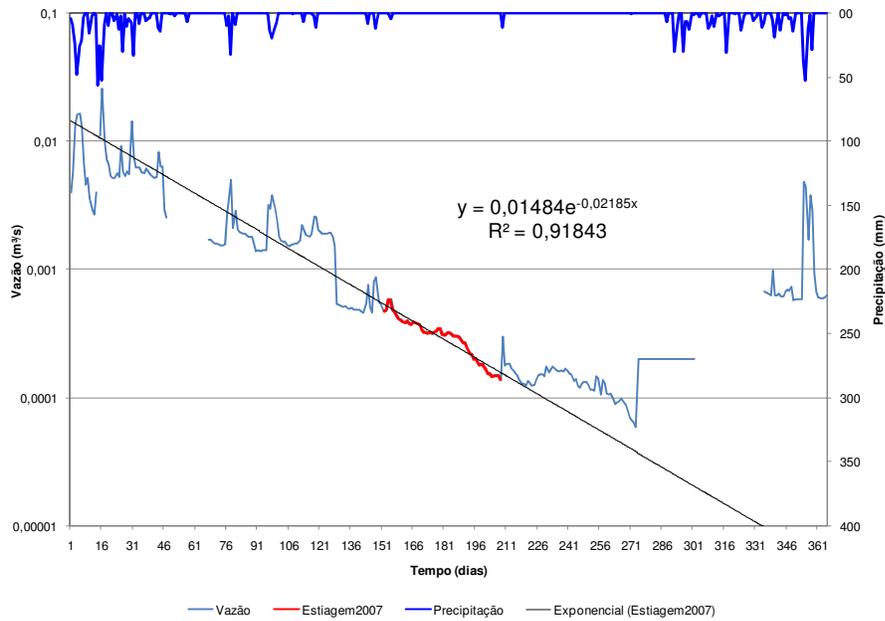


FIGURA 5.42 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Sub-Bacia 06.

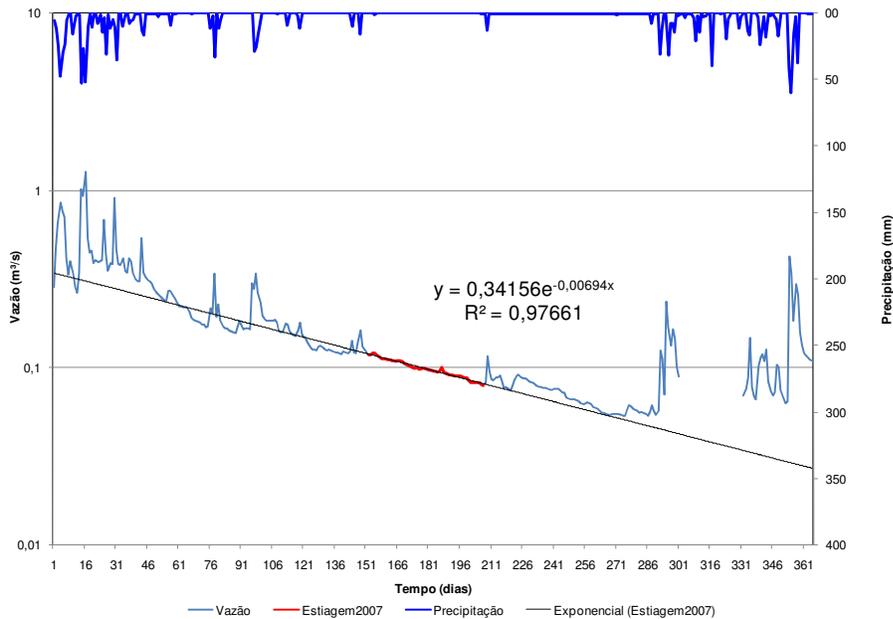


FIGURA 5.43 – Equação de Decaimento das Vazões e Comportamento da Hidrógrafa na Resposta das Vazões as Precipitações – Bacia Ribeirão Mato Frio.

O coeficiente de esgotamento α , ou de recessão, caracteriza a descarga dos aquíferos em regime não influenciado e é inversamente proporcional à extensão dos reservatórios

subterrâneos e ao coeficiente de armazenamento (MOURÃO, 2007). A razão da transmissividade com o coeficiente de armazenamento, ou porosidade drenável do aquífero livre, corresponde à difusividade do aquífero (TUCCI, 1993)

Ponce (1989) descreve a equação do coeficiente de recessão conforme apresentado a seguir:

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4SL^2} \quad (5.1)$$

Onde:

α = coeficiente de recessão em [dias⁻¹];

T = transmissividade em [m²/s];

S = coeficiente de armazenamento em [m]; e,

L = largura do aquífero medida em direção perpendicular ao fluxo em [m].

Analisando a interação rio-aquífero pela equação descrita por Ponce (1989), observa-se que a drenagem do rio para o aquífero aumenta com a difusividade e diminui com o quadrado da largura do aquífero, o que representa maior valor de coeficiente de recessão e menor probabilidade de vazão de base durante todo o período de estiagem. Isso ocorre pela relação inversa entre o coeficiente de recessão e a capacidade de armazenamento subterrâneo. Na Tabela 5.17 podem ser comparados os valores de coeficiente de recessão nas sub-bacias do ribeirão Mato Frio e em sua bacia como um todo.

TABELA 5.17 – Coeficientes de Recessão na Bacia do Ribeirão Mato Frio

Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6	Total
α (dias⁻¹)	0,01290	0,01137	0,01712	0,01607	0,00498	0,02185	0,00694

Em um estudo sobre a influência do desmatamento na evapotranspiração aplicado à bacia do ribeirão Serra Azul, onde a bacia do ribeirão Mato Frio está inserida, Neves *et al.* (2004) utilizou a equação da curva de recessão na estimativa da variação do volume de água armazenada na bacia e alcançou valores de coeficiente de recessão de 0,00747 dias⁻¹, 0,00648 dias⁻¹ e 0,01131 dias⁻¹ para os hidrogramas dos anos civis de 1986, 1997 e 2001, respectivamente.

As séries de dados de vazão média diária dos anos civis utilizadas por Neves *et al.* (2004) correspondem à resposta da bacia do ribeirão Serra Azul a períodos de estiagem do ano mais chuvoso (1997), do ano mais seco (2001) e do ano em que ocorreu uma chuva próxima da média da região (1986). A variação do coeficiente de recessão ao longo dos anos deve-se à variação do volume de água armazenada no subsolo e, conseqüentemente, à variação dos parâmetros dimensionais do aquífero.

Segundo Mourão (2007), as bacias hidrográficas localizadas no Quadrilátero Ferrífero com valores de coeficiente de recessão próximos a $0,01 \text{ dias}^{-1}$ correspondem a terrenos pouco permeáveis e de baixa capacidade de armazenamento. Na área em estudo as sub-bacias 1, 2, 3 e 4 podem ser enquadradas nas mesmas características descritas por Mourão (2007). Por sua vez, para a sub-bacia 5 e para a área total da bacia do ribeirão Mato Frio, as contribuições para o escoamento base são provenientes da descarga de aquíferos rasos e da restituição de aquíferos fraturados, onde os coeficientes de recessão estão em torno de $0,005 \text{ dias}^{-1}$.

Atenção especial deve ser dada ao analisar os resultados alcançados na estimativa de α para a sub-bacia 6, onde as particularidades geológicas, como a presença de faixas de quartzito, e a presença de cobertura vegetal densa resultam em maiores parcelas interceptadas e evapotranspiradas e baixa probabilidade de vazões permanentes durante os períodos de estiagem.

5.5.3 Componentes do Balanço Hídrico

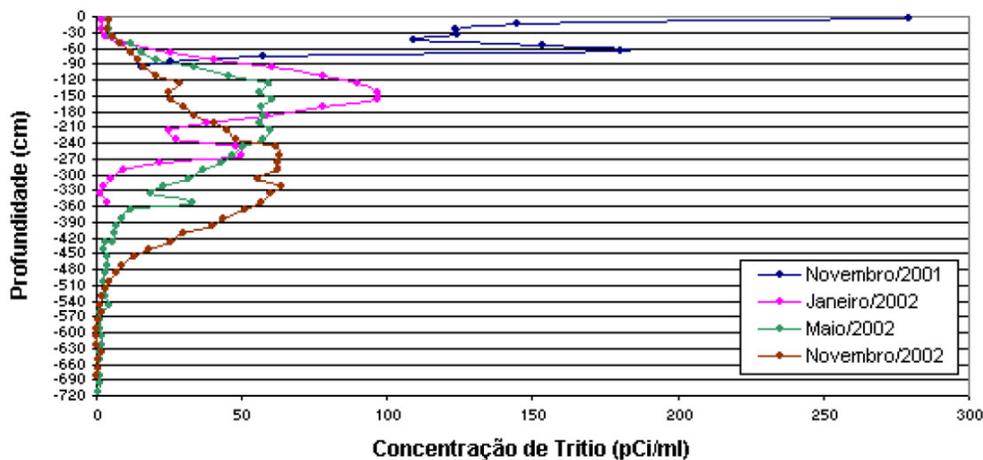
Tucci (1993) descreve o ciclo hidrológico como sendo um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fisicamente pela energia solar associada à gravidade e rotação terrestre. A circulação da água pode ocorrer entre as camadas superficiais, incluindo os aquíferos e massas de água, e entre a atmosfera e a superfície terrestre, sob forma de evaporação, evapotranspiração, chuva e neve.

O escoamento superficial foi estudado por Maia *et al.* (2006), onde a presença de solo de textura fina e elevados graus de saturação do solo no período chuvoso foram associados aos altos valores de CN (em torno de 88), calibrados em experimentos realizados na Bacia Representativa de Juatuba. O valor de CN, equivalente ao número de curva utilizado na calibração do modelo chuva-vazão *Soil Conservation Service* – SCS (TUCCI, 1993), caracteriza as condições de umidade do solo anterior ao evento de precipitação, o tipo geológico e o uso do solo da bacia hidrográfica. Variando de 0 a 100, os maiores valores de

CN estão associados à elevada capacidade de produção de escoamento superficial e solos de texturas mais finas, como os latossolos.

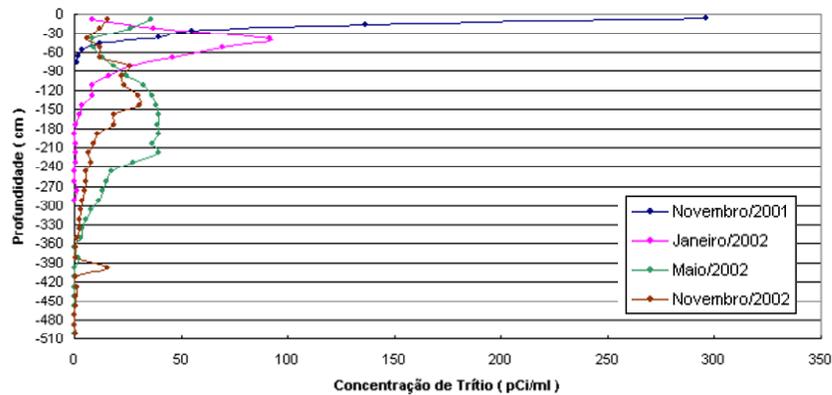
Dentre os resultados dos estudos realizados por Drumond (2004) foram quantificados os termos do balanço hídrico e avaliadas as recargas dos aquíferos. Extrapolando os resultados alcançados para a bacia como um todo, a parcela das precipitações referentes à recarga dos aquíferos foi estimada em 37%.

Dos onze lotes de injeção de trítio do experimento realizado por Drumond (2004) dois deles localizam-se na bacia do ribeirão Mato Frio, um na cabeceira e outro no exutório da bacia. Os pontos com distribuição granulométrica J1.2 e J7.1, apresentados na Figura 5.13, referem-se respectivamente aos pontos JT-4 e JT-11 de injeção de trítio. Furos de sondagem realizados fora da área de injeção de trítio identificaram fuga do traçador no ponto JT-11. Nas Figuras 5.44 e 5.45 podem ser observados os avanços das nuvens de trítio no solo.



Fonte: Drumond (2004)

FIGURA 5.44 – Evolução da Nuvem de Trítio no Lote JT-4 – Cabeceira da Bacia do Ribeirão Mato Frio



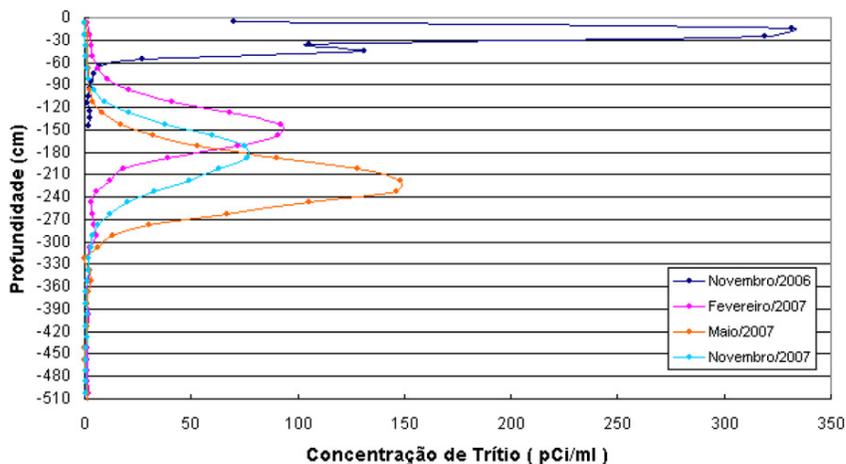
Fonte: Drumond (2004)

FIGURA 5.45 – Evolução da Nuvem de Trítio no Lote JT-11 – Exutório da Bacia do Ribeirão Mato Frio

Os resultados obtidos nos ensaios de infiltração remetem a 40,1% de infiltração no ponto JT-4 e 19,2% no ponto JT-11. Estes resultados podem ser traduzidos em porcentagens médias de recarga dos aquíferos em relação aos totais precipitados no ano hidrológico de 2001/ 2002.

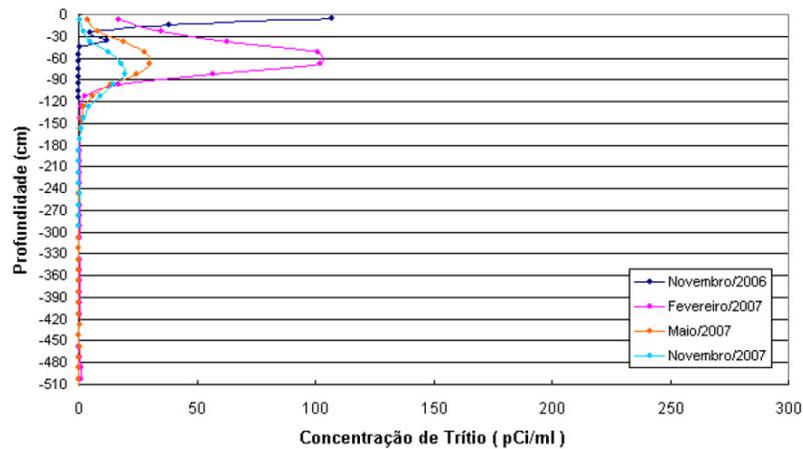
Os resultados dos cálculos de balanço hídrico, utilizando uma média ponderada das taxas de infiltração quantificadas nos experimentos com trítio, correspondente ao escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração na ordem de 7%, 18% e 75%.

A localização dos lotes de infiltração dos estudos realizados por CDTN (2008) referem-se aos pontos com distribuição granulométrica (J1.1, J2.1, J3.1, J4.1, J5.1 e J6.1) apresentados na Figura 5.13. A evolução da nuvem de trítio nas seis sub-bacias em que a área em estudo foi dividida podem ser visualizadas nas Figuras 5.46 a 5.51.



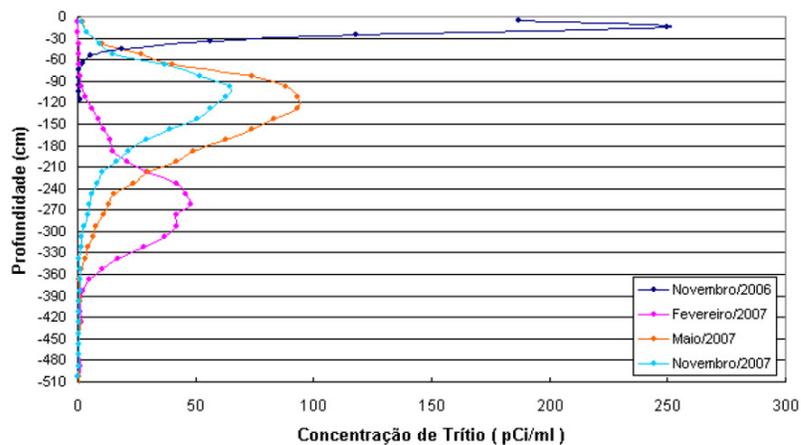
Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.46 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 1 – J1.1



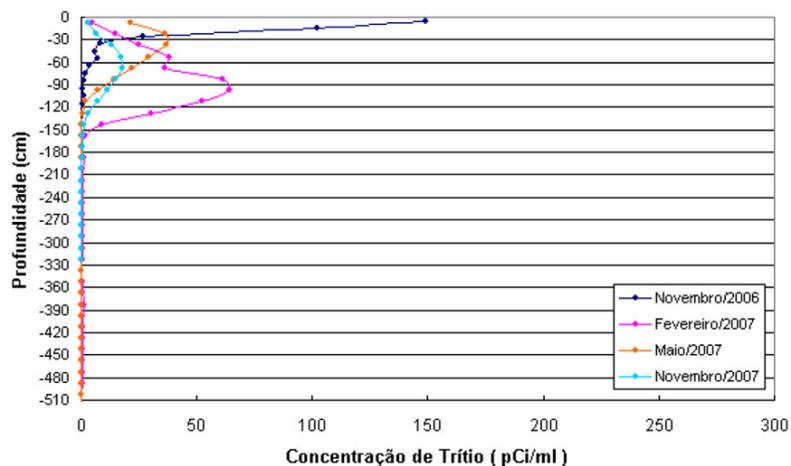
Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.47 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 2 – J2.1



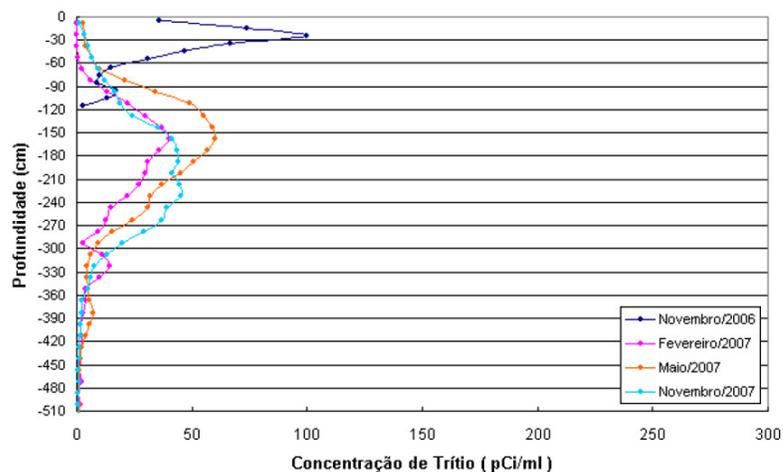
Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.48 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 3 – J3.1



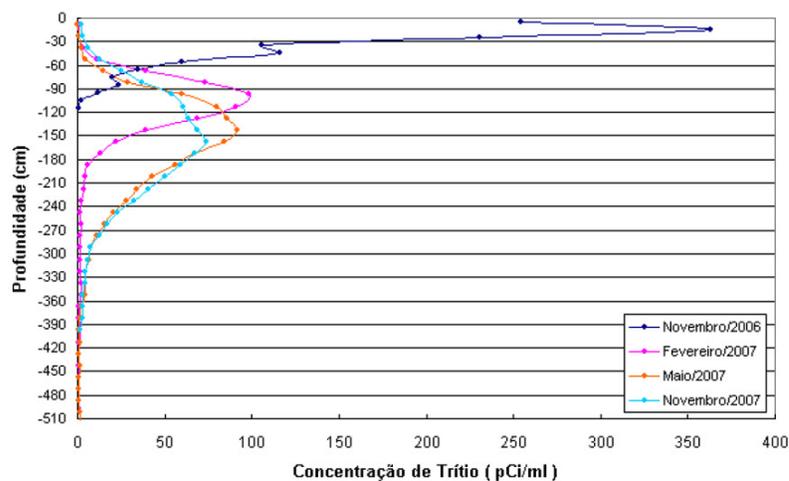
Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.49 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 4 – J4.1



Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.50 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 5 – J5.1



Fonte: CDTN (2008)

FIGURA 5.51 – Evolução da Nuvem de Trítio na Sub-Bacia 6 – J6.1.

As alturas de infiltração para o ano hidrológico de 2006/2007, período em que foram realizados os experimentos de infiltração na bacia do ribeirão Mato Frio, podem ser observados na Tabela 5.18.

TABELA 5.18 – Valores de Infiltração Pontual nas Seis Sub-Bacias do Ribeirão Mato Frio – Ano Hidrológico de 2006/ 2007

Sub-Bacia	1	2	3	4	5	6
Infiltração (mm)	377,2	143,4	298,6	121,0	253,9	291,2
Precipitação (mm)	1.389,5	1.616,6	1.242,7	1.349,4	1.213,4	1.222,3
% Infiltração	27,1	8,9	24,0	9,0	20,9	23,8

Fonte: CDTN (2008)

6 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

De um modo geral a geologia da área em estudo pode ser considerada homogênea. Tal característica direciona a uma interpretação e classificação simplificada das unidades hidrogeológicas, sendo o aquífero das rochas granito-gnáissicas e de seu manto de cobertura a unidade hidrogeológica identificada.

Porém, a hidrogeologia dos meios fraturados é influenciada por diversos condicionantes e sua caracterização como sistema hidráulico de circulação subterrânea é, na maioria das vezes, difícil. As particularidades hidrogeológicas dos meios fraturados, que condicionam o armazenamento e a circulação das águas subterrâneas, estão condicionadas ao clima, à fisiografia, à litologia e à estrutura dessas rochas-reservatório (CETEC, 1983a).

A dinâmica de circulação da água subterrânea é condicionada pela existência de aquíferos livres em meio fissural, onde a circulação das águas subterrâneas é possível pela conectividade hidráulica estabelecida nas fissuras, fraturas e falhas geológicas, e principalmente em meio poroso, constituído pelas coberturas intemperizadas. Sendo assim, admite-se que quanto maior a densidade de fissuras e o manto de alteração das rochas, maior será a capacidade de armazenamento do sistema aquífero local. Além disso, a espessura do manto de alteração reflete diretamente na contribuição para a recarga das fraturas na rocha sã e é responsável por grande parte das restituições para os cursos d'água nos períodos de estiagem (CETEC, 2003b).

Os aquíferos em rochas granito-gnáissicas correspondem a aquíferos fissurados caracterizados por espesso manto de intemperismo (BEATO *et al.*, 2005 *apud* MOURÃO, 2007) e ampla distribuição lateral. De um modo geral, esse sistema encontra-se representado por pacotes de solos de porosidade intersticial, geralmente homogêneos, com espessuras médias que oscilam em torno de 30 a 40 metros constituídos por frações de textura média a muito argilosa, como resultado da ação do intemperismo sobre o gnaisse que recobre os topos dos terrenos. Essas coberturas são denominadas de diversas maneiras, sendo as mais comuns material inconsolidado, mantos de intemperismo, manto de alteração ou solo residual.

O manto de alteração ocorre na presença de material granular, em trechos de profundidade variada, mais espessos nas zonas aplainadas e rasos ou quase aflorantes em terrenos onde há elevada declividade. Podem ser encontrados ainda depósitos de tálus resultantes do transporte

de material que se separam das rochas dos topos dos morros, acomodando-se no sopé das encostas, dando origem, localmente, a aquíferos temporários de grande importância nos processos de descarga. Comumente são encontrados blocos de rocha em meio aos solos intemperizados e sobre a superfície.

O trecho de transição do pacote poroso às rochas fraturadas pode ser considerado mais heterogêneo, caracterizado por uma faixa de fluxos mistos com potencial hidrogeológico considerável, devido ao aumento de espaços para circulação e armazenamento da água subterrânea. Parte dos lineamentos da rede de drenagem deve coincidir com os trechos de maior condutividade hidráulica dos aquíferos fissurados. A produtividade média de poços é da ordem de 20 m³/h, porém a mediana é muito menor (atingindo apenas 7 m³/h). (CPRM, 2008).

A presença de faixas de rochas quartzíticas supõe a influência dessa formação geológica no fluxo das águas subterrâneas. Considerou-se aqui, conforme definido em CPRM (2008), que a denominação “água subterrânea” é atribuída apenas à água que circula na zona saturada do solo.

Segundo CETEC (2003b), a permeabilidade dos quartzitos é maior onde suas formas fraturadas mostram-se conjugadas a planos desenvolvidos de estratificação. A posição topográfica dessas unidades, ocupando partes mais altas do relevo, limita seu potencial como aquífero, justificando sua desconsideração como unidade hidrogeológica para a área em estudo.

Na bacia do ribeirão Mato Frio, as investigações hidrogeológicas realizadas por CETEC (1983a), Drumond (2004), CDTN (2008) e UFMG (2008) produziram dados do nível d'água subterrâneo medidos em piezômetro (PZ 4 - FL), levantamento dos pontos de descarga dos aquíferos e campanhas de amostragem e análise química, física, isotópica e iônica da água das nascentes e dos cursos de água superficiais.

Além dos dados de distribuição granulométrica e a classificação dos solos apresentados no item 5.3.2, os resultados de ensaios de infiltração realizados por Drumond (2004) direcionaram a determinação de valores representativos dos parâmetros hidrogeológicos, em especial da condutividade hidráulica.

6.1 Condutividade Hidráulica

A facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico está ligada à condutividade hidráulica (K), a qual pode ser definida como a velocidade aparente por gradiente hidráulico unitário (CPRM, 2008). A condutividade hidráulica depende da porosidade efetiva, distribuição do tamanho dos poros e da tortuosidade do meio (parâmetros relacionados à permeabilidade específica) e da temperatura e composição do fluido (fluidez).

A condutividade hidráulica saturada foi estimada a partir das frações granulométricas levantadas em oito pontos da bacia do ribeirão Mato Frio (Figuras 5.14 a 5.21) associadas aos valores descritos na bibliografia consultada. Dois desses pontos em que foram realizadas análises granulométricas foram aplicados ensaios com permeâmetro Guelph, são eles os pontos J1.2 e J7.1 (Figuras 5.15 e 5.21).

A condutividade hidráulica dos principais tipos de solo presentes no manto intemperizado (materiais não consolidados) e das rochas granito-gnáissicas podem ser visualizadas na Tabela 6.1. Ressalta-se que os valores apresentados na tabela a seguir não foram estimados para as condições brasileiras, sendo priorizados neste estudo os valores levantados em campo.

TABELA 6.1 – Valores Representativos de Condutividade Hidráulica

Material	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Argila*	10^{-9} a 10^{-6}
Silte; Silte Arenoso*	10^{-6} a 10^{-4}
Areia Argilosa*	10^{-6} a 10^{-4}
Areia Siltosa; Areia Fina*	10^{-5} a 10^{-3}
Areia bem distribuída*	10^{-3} a 10^{-1}
Cascalho bem distribuído*	10^{-2} a 10^0
Rocha granítica alterada**	$3,3 \times 10^{-6}$ a $5,2 \times 10^{-5}$
Rochas ígneas e metamórficas não fraturadas**	$3,0 \times 10^{-14}$ a $2,0 \times 10^{-10}$

Fonte: *Fetter (1988, apud CPRM, 2008) e **Domenico & Franklin (1990)

Maziero & Wendland (2008) associaram os valores de condutividade hidráulica de poços de monitoramento aos tipos de solo na bacia de Jacaré-Guaçu, São Carlos – SP, encontrados os valores mínimos relacionados à camada de argila siltosa ($2,59 \times 10^{-5}$ cm/s) e máximos ao predomínio de areia siltosa ($5,47 \times 10^{-3}$ cm/s)

Os ensaios com permeâmetro Guelph, no ponto J1.2, realizados por Drumond, apresentaram resultados entre $5,48 \times 10^{-4}$ e $4,58 \times 10^{-4}$ cm/s, com valor médio de $5,03 \times 10^{-4}$ cm/s. Para o ponto J7.1, os resultados de condutividade hidráulica estiveram entre $1,43 \times 10^{-3}$, nas maiores profundidades, e $6,26 \times 10^{-5}$ cm/s, com média de $4,83 \times 10^{-4}$ cm/s.

Associando os resultados de condutividade hidráulica medidos com o permeâmetro Guelph em cada profundidade às classes de textura do solo identificadas pelas análises granulométricas nestas mesmas profundidades, foram obtidas as faixas de condutividade hidráulica apresentadas na Tabela 6.2.

TABELA 6.2 – Relação Condutividade Hidráulica e Classes de Textura

Classe de Textura	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Argila	$4,6 \times 10^{-4}$ a $5,5 \times 10^{-4}$
Argilo Arenoso	$6,3 \times 10^{-5}$ a $1,5 \times 10^{-4}$
Franco Argilo Arenoso	$2,1 \times 10^{-4}$ a $1,4 \times 10^{-3}$

Em uma busca por associações entre os tipos de solo e os valores de condutividade hidráulica foram encontradas referências sobre as propriedades físicas do latossolo e do argissolo.

Os Latossolos apresentam, em geral, valores elevados de condutividade hidráulica saturada em razão da sua estrutura microagregada, principalmente quando apresentam maiores teores de argila. Contudo, a condutividade hidráulica saturada pode variar em função da textura, da estrutura e da profundidade do solo.

Segundo Carvalho (2002, *apud* GOÉS *et. al.*, 2005), a condutividade hidráulica do solo na condição saturada depende mais da estrutura do que da textura do solo, podendo as microestruturas de argila em solos mais cauliníticos alcançar condutividade hidráulica saturada próxima a da areia, comportando-se como argissolos.

Estudando tipos variados de latossolos, registraram valores de Ksat variando de $1,2 \times 10^{-3}$ a $2,0 \times 10^{-3}$ cm/s nos horizontes superficiais (horizontes A) e valores inferiores de Ksat em profundidades superiores a 140 cm para os horizontes B ($3,9 \times 10^{-6}$ a $9,2 \times 10^{-5}$ cm/s). A presença de caráter grumoso a ausente com o aumento da profundidade provoca a redução da condutividade hidráulica, acarretando em infiltração lenta da água com uma tendência de desenvolvimento de fluxo interno, fato que dificulta a recarga dos sistemas aquíferos situados a maiores profundidades. (BALBINO *et al.*, 2003; CHAGAS *et al.*, 1997; MONTEIRO & CAMPOS, 2007, *apud* MOURÃO 2007). Ferreira *et al.* (1999) estudou a variação da condutividade hidráulica dos horizontes B em latossolos da região sudeste do Brasil. Os valores encontrados ficaram entre $2,8 \times 10^{-4}$ a $1,9 \times 10^{-2}$ cm/s e os médios próximo a $6,7 \times 10^{-3}$ cm/s. Para os argissolos, os valores de condutividade hidráulica variam entre $6,9 \times 10^{-4}$ e $1,9 \times 10^{-3}$ cm/s (ABREU *et. al.*, 2004).

Ao relacionar os baixíssimos valores de condutividade hidráulica (da ordem de 10^{-7} cm/s) do Embasamento Cristalino (SOUZA & SILVA, 2003) com a condutividade hidráulica dos solos presentes no manto de intemperismo (principalmente argissolos e latossolos) as análises apontam para o comportamento do embasamento similar a de um aquíclode. Desta forma, em relação às unidades muito mais permeáveis situadas acima, o Embasamento Cristalino é considerado como o limite inferior de fluxo das águas subterrâneas, com exceção onde a caracterização geológica e as características físico-químicas e isotópicas apontam lineamentos de fratura coincidentes com os cursos de água principais, como o ribeirão Mato Frio e o Córrego dos Caboclos.

6.2 Descarga dos Aquíferos e Variação do Nível de Água Subterrânea

A cobertura formada pelo intemperismo cresce em espessura à medida que se desce a encosta dos afloramentos rochosos, e é nesta cobertura onde se localizam as principais surgências de água subterrânea (FRANZ, 1981).

A maioria das nascentes existentes no gnaíse ocorre no contato de depósitos de tálus com solo coluvionar e/ou afloramento rochoso. Os depósitos de tálus são constituídos por blocos rolados e inconsolidados de gnaíse alterado e transportados para as áreas de menor elevação topográfica. São formados por fragmentos grosseiros de rocha, de diversos tamanhos e forma angulosa.

O solo coluvionar é geralmente areno-argiloso com coloração que varia de avermelhado a amarelado. A zona de contato do afloramento rochoso com o depósito de tálus recebe um fluxo maior de água, que se infiltra no solo, dando origem às nascentes. O acompanhamento da mobilidade das nascentes, observada nos meses de junho/2008, agosto/2008, outubro/2008, novembro/2008 e fevereiro/2009, puderam ser comparados com a variação do nível de água no piezômetro instalado próximo ao exutório da bacia em estudo (PZ 4 – FL).

Os níveis de água subterrânea da sub-bacia 1 variaram pouco, caracterizando pouca mobilidade da nascente. Por sua vez, as nascentes da sub-bacia 5 foram as que mais se deslocaram no período acompanhado, resultando em diferenças de nível superiores a 50m.

Segue a Figura 6.1 (Mobilidade das Nascentes), Figura 6.2 (Cotas das Nascentes) e Figura 6.3 (Variação do Nível Piezométrico no PZ 4 – FL). O perfil construtivo e o relatório de perfuração do piezômetro instalado próximo à estação fluviométrica de Fazenda Laranjeiras,

o qual foi adquirido no âmbito do Projeto FINDEP: Desenvolvimento de estudos hidrológicos e hidrogeológicos, podem ser consultados no Apêndice II.

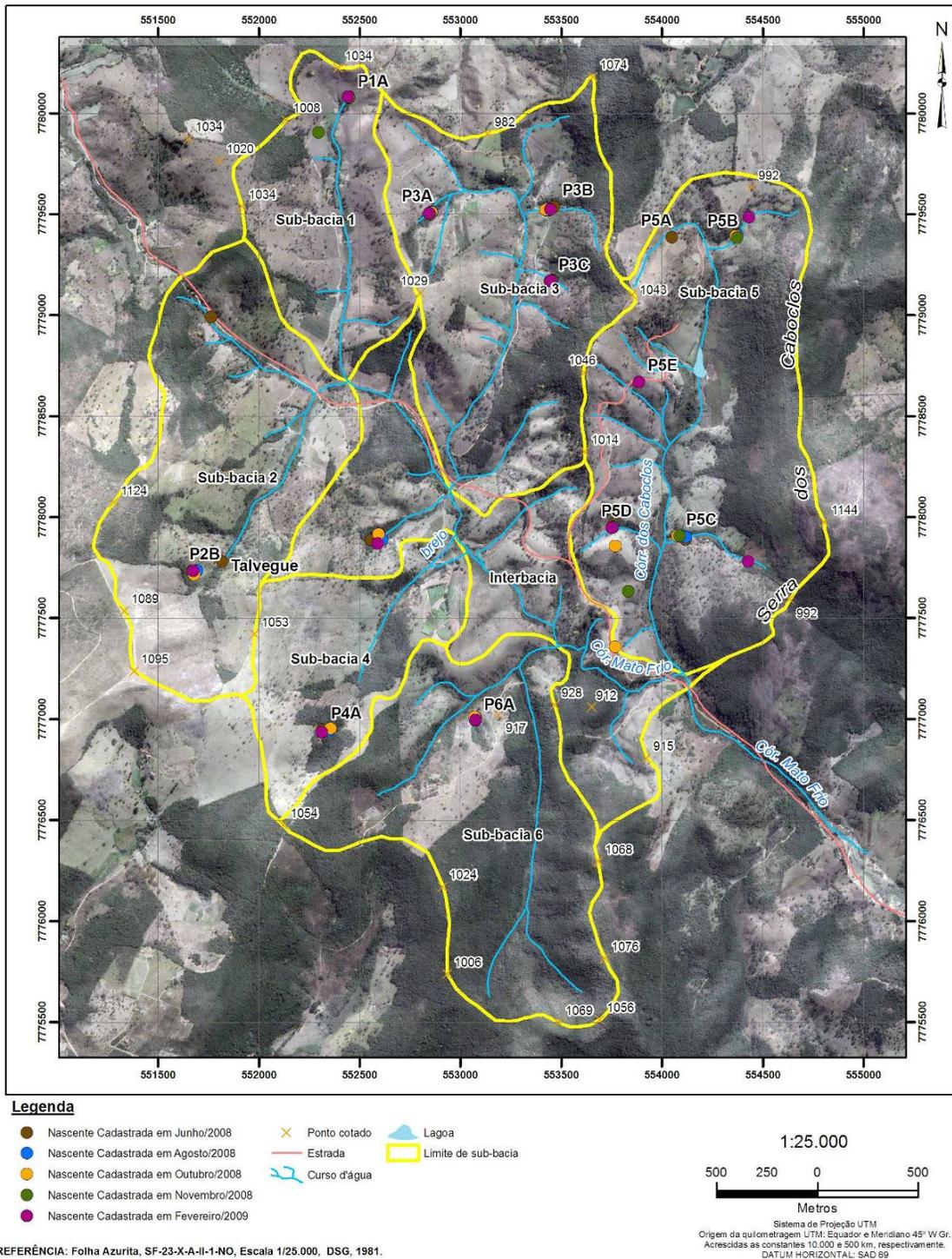


FIGURA 6.1 – Mobilidade das Nascentes Inventariadas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

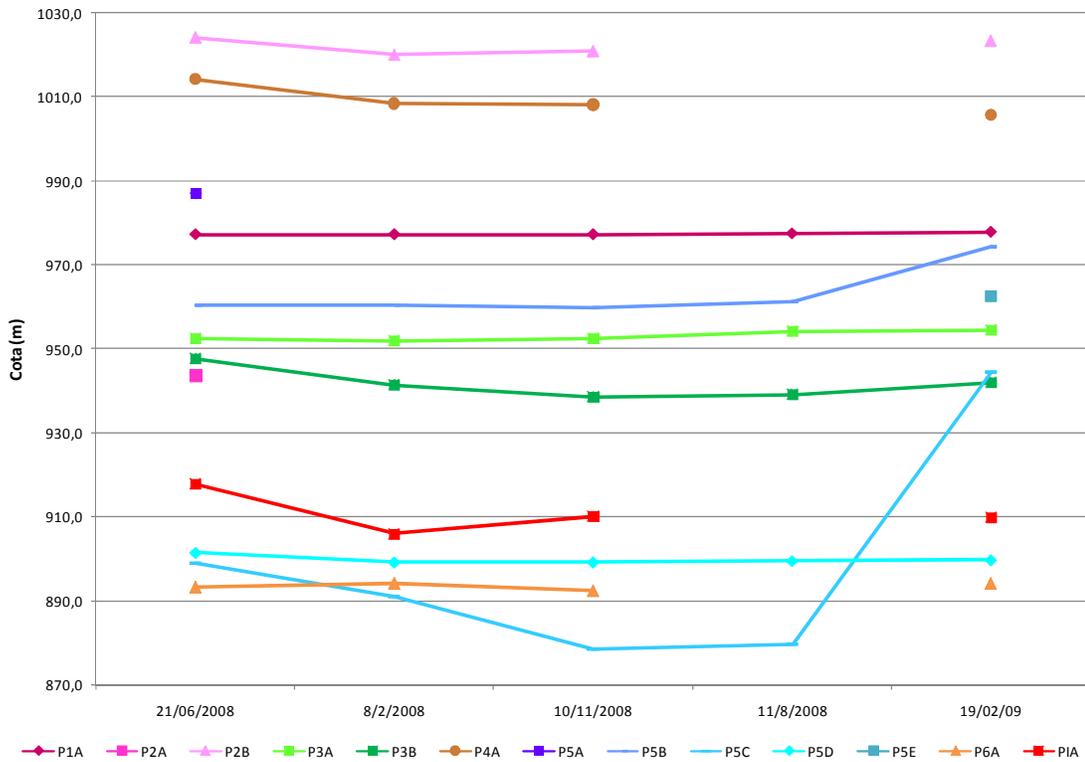


FIGURA 6.2 – Cotas das Nascentes na Bacia do Ribeirão Mato Frio

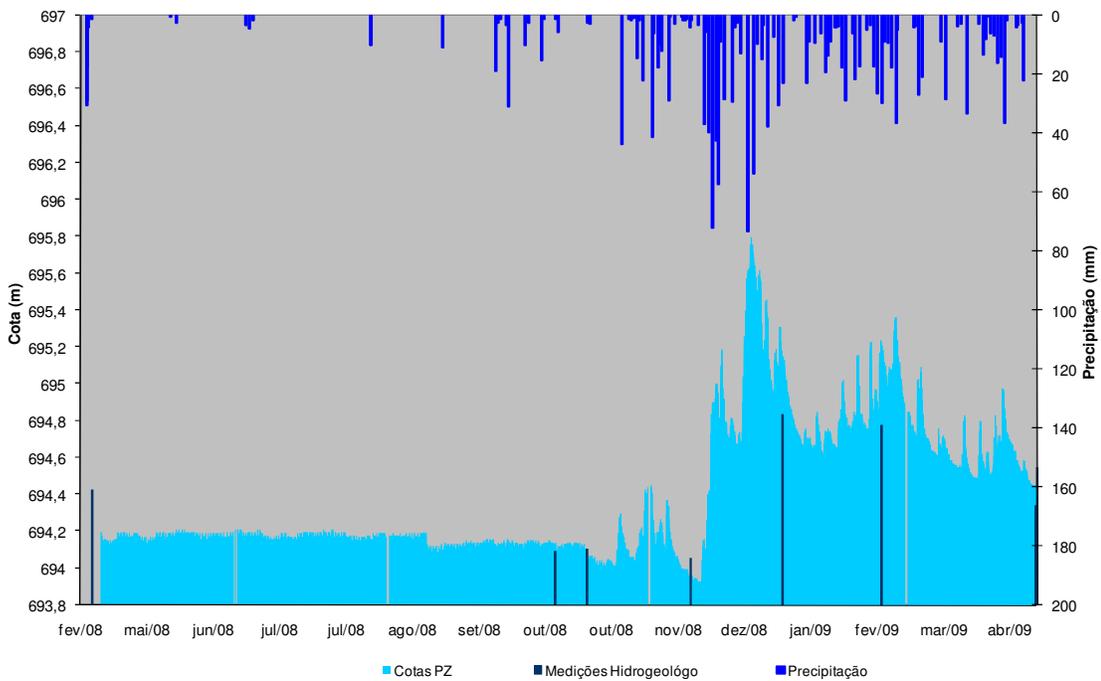


FIGURA 6.3 – Variação Piezométrica – PZ 4 – Fazenda Laranjeiras

6.2.1 Nascentes Sub-Bacia 1

A nascente (P1A) está situada em um ponto de maior dissecação do relevo, onde o nível de água é interceptado pela topografia. Na nascente P1A o relevo é ondulado e o solo foi classificado como Gleissolo. Deste ponto até o divisor de águas ocorrem ainda o Cambissolo e o Latossolo Vermelho-Amarelo. Não foram observados afloramentos de rocha sã, porém, as pequenas variações de cota (0,6 m) observadas durante o acompanhamento da mobilidade das nascentes e a presença de solo de cor acinzentada indicam que a nascente P1A esteja localizada em uma área constantemente encharcada. O ponto P1A coincide com o ponto de amostragem de água AM14 do projeto de separação de escoamentos realizados pelo CDTN (2008).

6.2.2 Nascentes Sub-Bacia 2

Nesta sub-bacia a mobilidade dos afloramentos do lençol freático foi observada em apenas uma nascente (P2B). Tal surgência de água localiza-se em relevo ondulado a forte ondulado, em solo do tipo Cambissolo seguido de Argissolo Vermelho-Amarelo à medida que se sobe a encosta. O curso de água formado a partir deste ponto de surgência corre sobre afloramento de rocha sã, onde a vazão aumenta rapidamente.

A variação de nível de água neste ponto, entre os meses secos (junho e agosto de 2008), foi de 4,1 m. No mês de novembro, durante o acompanhamento da mobilidade das nascentes, um forte evento de chuva impediu que o ponto P2B fosse inventariado.

Uma segunda nascente foi cadastrada durante a primeira campanha de mobilidade das nascentes (P2A), porém pelo fato deste ponto estar localizado em uma área de brejo e ao pé de um talude, onde o afloramento do lençol freático ocorre de forma difusa, este ponto não foi incluído nas demais campanhas de acompanhamento de mobilidade das nascentes. O ponto P2A caracteriza-se por um relevo plano e solo arenoso sem presença de afloramentos de rocha.

Os pontos P2A e P2B coincidem com os respectivos pontos de amostragem de água AM18 e AM19, ambos do projeto de separação de escoamentos realizados pelo CDTN (2008).

6.2.3 Nascentes Sub-Bacia 3

A mobilidade das nascentes nesta sub-bacia foi acompanhada a partir de três pontos distintos, são eles os pontos P3A, P3B e P3C. Os pontos P3A e P3C estão sob relevo ondulado e o ponto P3B sob relevo suave a forte ondulado. Os solos nestas nascentes variam de Gleissolo (P3A) a Latossolo Vermelho-Amarelo.

Conforme explanado anteriormente, a ferridrita se faz presente na nascente P3A, onde a variação do nível de água alcançou 2,5 m. Tal nascente está sob mata ciliar densa e é composta por diversos pontos de surgência. Além da variação de cota, as vazões também são acrescentadas com a entrada do período chuvoso.

A nascente P3B localiza-se na margem direita do curso de água principal desta sub-bacia, onde foi identificada a presença de ferridrita e mosqueados no solo. A mobilidade da nascente neste ponto foi superior em relação aos outros dois nesta mesma sub-bacia, alcançando 9,0 m entre os meses de junho e novembro de 2008, indicando a presença de um aquífero mais espesso, uma vez que não foram identificados afloramentos de rocha sã.

O ponto P3C, por sua vez, coincide com o ponto de amostragem de água AM12 (CDTN, 2008). A variação dos níveis de água nesta nascente foi mínima (0,6 m), condicionada pela presença de uma área alagada (brejo), cascalho e blocos esparsos de quartzo.

6.2.4 Nascentes Sub-Bacia 4

A nascente selecionada para acompanhamento dos níveis de água subterrânea na sub-bacia 4 foi o ponto P4A. Durante a campanha de acompanhamento da mobilidade das nascentes no mês de novembro de 2008, antes que fosse possível o cadastramento da posição da nascente P4A ocorreram precipitações e enxurradas.

O relevo nesta nascente varia de forte ondulado a montanhoso e o solo possui cor cinza com muita presença de matéria orgânica, sendo classificado como Gleissolo. A nascente P4A está sob mata ciliar densa e é composta por diversos pontos de surgência margeados por ferridrita, os quais se deslocaram verticalmente entre os meses de junho/2008 a fevereiro/2009 por 8,4 m, porém de maneira inversa ao que se esperava, indicando que o nível de água subterrânea não havia se recuperado das descargas ocorridas no período de estiagem até o mês de fevereiro.

O leito do curso de água formado a partir desta nascente se desenvolve sobre blocos angulosos de rocha gnáissica. O ponto P4A coincide com o ponto de amostragem de água AM21 (CDTN, 2008).

6.2.5 Nascentes Sub-Bacia 5

O Córrego dos Caboclos se desenvolve sobre a rocha alterada e possui nove afluentes mais expressivos, nos quais cinco nascentes foram cadastradas para o estudo atual. Os pontos P5B, P5C e P5D foram monitorados nas cinco campanhas de acompanhamento de mobilidade das nascentes e os pontos P5A e P5E foram cadastrados somente uma vez.

A nascente P5A localiza-se em relevo forte ondulado e Latossolo Vermelho com grande quantidade de rocha gnáissica aflorante. Foi identificada uma captação de água caracterizada por um tubo de PVC embutido no solo. Grandes blocos angulosos da mesma rocha compõem o cenário deste trecho da sub-bacia 5, onde blocos de quartzo também estão presentes. Esta nascente coincide com o ponto de amostragem de água AM5 (CDTN, 2008).

O ponto P5B está localizado sob mata ciliar densa, no contato do depósito de tálus com o solo residual, classificado como Gleissolo. O relevo nesta nascente varia de suave a forte ondulado, tornando-se mais acidentado à medida que se sobe a Serra dos Caboclos e induzindo grandes variações de nível na água subterrânea (14,5 m). Esta nascente coincide com o ponto de amostragem de água AM6 (CDTN, 2008).

Assim como a nascente P5B, o ponto P5C também se localiza sob mata ciliar na Serra dos Caboclos. Essa nascente apresentou as maiores variações de nível de água subterrânea, alcançando 66,0 m de diferença de cota entre os meses de novembro/2008 e fevereiro/2009. A grande variação do nível de água subterrânea deve-se ao relevo deste afluente, o qual varia de plano a montanhoso. O ponto mais alto cadastrado coincide com o contato do depósito de tálus com o colúvio, classificado como Latossolo Vermelho.

A pequena variação do nível da água na nascente P5D (2,3 m) pode ser justificada pela localização à margem direita do Córrego dos Caboclos, do tipo de solo (Areia Siltosa) e da vegetação típica de brejo. Pequenos seixos angulosos de gnaisse sobre a rocha são compõem o manto intemperizado na área desta nascente, a qual ocorre de forma difusa, e ao decorrer do ano hidrológico varia as vazões mais expressivamente do que o nível de água subterrânea. O relevo varia de ondulado a forte ondulado.

Por sua vez, a nascente P5E foi cadastrada somente na última campanha de acompanhamento de mobilidade das nascentes (fevereiro de 2009). O relevo neste ponto é ondulado e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo.

6.2.6 Nascentes Sub-Bacia 6

A vegetação na sub-bacia 6 é mais densa que nas demais sub-bacias. Tal fato associado ao relevo bastante acidentado dificultou o cadastramento de mais de um ponto de surgência de água subterrânea.

Assim, foi cadastrado o ponto P6A, caracterizado por relevo ondulado, vegetação típica de brejo sobre Gleissolo e pequenos blocos angulosos de rocha gnáissica distribuídos. O afloramento da água subterrânea é disperso e está localizado em um afluente da margem esquerda, o qual compõe o curso de água principal desta sub-bacia. Por se tratar de uma área alagada e com pequena variação de nível de água subterrânea (1,7 m), acredita-se que a camada de rocha alterada se encontre a poucos metros de profundidade.

Assim como para as sub-bacias 2 e 4, não foi possível acompanhar a mobilidade desta nascente no mês de novembro, quando chuvas e enxurradas impediram a finalização dos trabalhos em campo. Neste mesmo afluente, porém mais a montante, localiza-se o ponto de amostragem de água AM3, do projeto do CDTN (2008).

6.2.7 Nascentes Interbacia

Na área delimitada pelas sub-bacias 2 e 4 foi acompanhada a mobilidade da nascente do ponto PIA. Tal nascente localiza-se na margem direita do ribeirão Mato Frio e coincide com o ponto de amostragem de água AM23 (CDTN, 2008).

A nascente PIA variou de forma significativa entre os meses de junho e agosto de 2008 (11,8 m). O curso de água formado por esta nascente é caracterizado por um relevo suave a forte ondulado, solo escuro hidromórfico seguido de Argissolo Vermelho-Amarelo e mata ciliar densa.

6.3 Compilação de Estudos Hidroquímicos e Isotópicos Anteriores

Nos estudos sobre o funcionamento hidráulico dos aquíferos realizados por CETEC (1983a), foram coletadas amostras para análises físico-químicas, isotópicas e iônicas, incluindo medidas *in situ* de condutividade elétrica, Eh, pH e temperatura. O objetivo das análises da água na bacia foi a caracterização geoquímica dos aquíferos, a origem da água subterrânea armazenada e as feições dos diferentes fenômenos modificadores que influenciam a composição dos aquíferos. Dentre os resultados alcançados, concluiu-se que a descarga natural na área estudada não está globalmente associada às zonas aquíferas desenvolvidas por fissuramentos, sendo a principal contribuição de água subterrânea os escoamentos provenientes dos reservatórios constituídos pelas rochas alteradas e solos residuais, as coberturas detríticas e os demais depósitos terciários/ quaternários sobrejacentes.

Em CETEC (1983a), as análises geoquímicas realizadas na área de interesse apontam ainda para a presença de águas bicarbonatadas a fortemente bicarbonatadas mistas sódicas e com baixa salinidade. A evaporação pode ser considerada moderada a alta, com maior taxa de infiltração no manto de alteração, alta lixiviação do solo e interação água-rocha moderada a alta.

Para a verificação da possibilidade de utilização de traçadores ambientais na separação de escoamentos foram coletadas amostras de água pelo CDTN (2008), em agosto de 2006. As análises das amostras incluíram a determinação de parâmetros físico-químicos (pH, Condutividade, Alcalinidade à fenolftaleína, Alcalinidade a indicador misto, Dureza total, SiO₂ e Sólidos dissolvidos), de formas iônicas (Fe, Mn, Mg, Ca, K, Na, Al, Cl, NO₃, e SO₄) e de isótopos (¹⁸O e Trítio) em 24 pontos da bacia do ribeirão Mato Frio.

Minard *et al.* (2008) descrevem as concentrações dos isótopos ²H (deutério) e ¹⁸O como sendo verdadeiras “impressões digitais”, marcando as distintas partes do ciclo hidrológico, como a origem da água, os processos de mudança de fase que sofreu e de mistura com outras águas. Assim, as águas das nascentes tendem a ser menos evaporadas, apresentando menores concentrações de ¹⁸O enquanto para as águas escoadas superficialmente as concentrações de ¹⁸O podem se apresentar mais significativamente.

As concentrações resultantes da análise do isótopo ¹⁸O e os tempos de renovação calculados por CDTN (2008) a partir de séries históricas de concentração de trítio nas chuvas, das análises de trítio nas amostras coletadas e do modelo de renovação exponencial (FRITZ &

FONTES, 1986 *apud* CDTN, 2008), podem ser visualizados na Tabela 6.3. Ressalta-se que a nomenclatura adotada por CDTN (2008) na identificação dos pontos de amostragem está apresentada a frente da descrição de cada ponto, e quando coincidente, a identificação da nascente levantada no estudo atual também é citada.

TABELA 6.3 – Tempos de Renovação das Águas e Concentrações de ^{18}O

Ponto de Amostragem	Tempo de Renovação	^{18}O (%o, V-SMOW)
Margem esquerda sub-bacia 6 (P6A)/AM3	38 anos	-7,79
Exutório do Córrego dos Caboclos/AM9	27 anos	-7,58
Afluente direito do ribeirão Mato Frio (jus. sub-bacia 6) /AM4	19 anos	-
Cabeceira esquerda sub-bacia 5 (P5B) /AM6	17 anos	-
Cabeceira sub-bacia 1 (P1A) /AM14	Entre 2 e 10 anos	-7,87
Afluente direito sub-bacia 1 /AM15	Entre 2 e 10 anos	-
Exutório sub-bacia 1/AM16	Entre 2 e 10 anos	-7,40
Cabeceira direita sub-bacia 2 (P2B) /AM19	Entre 2 e 10 anos	-7,48
Mina afluente direito sub-bacia 2 /AM20	Entre 2 e 10 anos	-
Exutório sub-bacia 2/AM17	Entre 2 e 10 anos	-6,92
Margem esquerda sub-bacia 3 (P3C) /AM12	Entre 2 e 10 anos	-
Exutório sub-bacia 3/AM11	Entre 2 e 10 anos	-7,48
Exutório sub-bacia 4/AM22	Entre 2 e 10 anos	-8,18
Cabeceira direita sub-bacia 5 (P5A) /AM5	Entre 2 e 10 anos	-7,53
Afluente direito sub-bacia 5 /AM10	Entre 2 e 10 anos	-
Afluente esquerdo sub-bacia 6 (próx confluência) /AM2	Entre 2 e 10 anos	-
Exutório ribeirão Mato Frio – Estação Fazenda Laranjeiras/AM8	Entre 2 e 10 anos	-7,39
Margem esquerda sub-bacia 2 (P2A) /AM18	< 2 anos	-
Cabeceira da sub-bacia 3/AM13	< 2 anos	-7,60
Cabeceira sub-bacia 4 (P4A) /AM21	< 2 anos	-7,42
Afluente ribeirão Mato Frio, entre sub-bacias 2 e 4 (PIA) /AM23	< 2 anos	-
Represa a montante na sub-bacia 5/AM7	< 2 anos	-6,63
Afluente da margem direita da sub-bacia 6/AM1	< 2 anos	-7,72

SMOW: Standard Mean Ocean Water

Fonte: CDTN (2008)

Observa-se que em nascentes das sub-bacias 1, 3, 5 e 6 os resultados de ^{18}O foram baixos, apontando para águas menos evaporadas, e nos exutórios das sub-bacias 1, 2 e na represa localizada na sub-bacia 5, as concentrações deste mesmo isótopo foram maiores. De maneira adversa, nas nascentes das sub-bacias 2 e 4 as concentrações de ^{18}O foram superiores às esperadas, podendo representar águas estagnadas, e nos exutórios das sub-bacias 3, 4, 5 e no afluente esquerdo da sub-bacia 6, tais concentrações estiveram inferiores ao esperado, apontando para aportes consideráveis de água subterrânea a estes pontos de amostragem. Os estudos isotópicos realizados por CDTN (2008) concluem que as águas da bacia são predominantemente recentes (trítio $\geq 2\text{UT}$) e têm origem em aquíferos freáticos locais.

As análises iônicas e físico-químicas realizadas por CDTN (2008), por terem sido realizadas em apenas uma campanha (agosto de 2006), não são suficientes para classificar e comparar os distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes (cloretada, sódica, carbonatada etc.), porém a distribuição espacial desses resultados está apresentada a seguir.

O pH medido em campo variou entre 5,31 (sub-bacia 5) e 6,80 (sub-bacia 6), com média em 6,03 (ligeiramente ácidas). Esses valores de pH, próximos ao da água de chuva, podem indicar a presença de águas recentes em fluxo subsuperficial. A variação espacial do pH na bacia está apresentada na Figura 6.4.

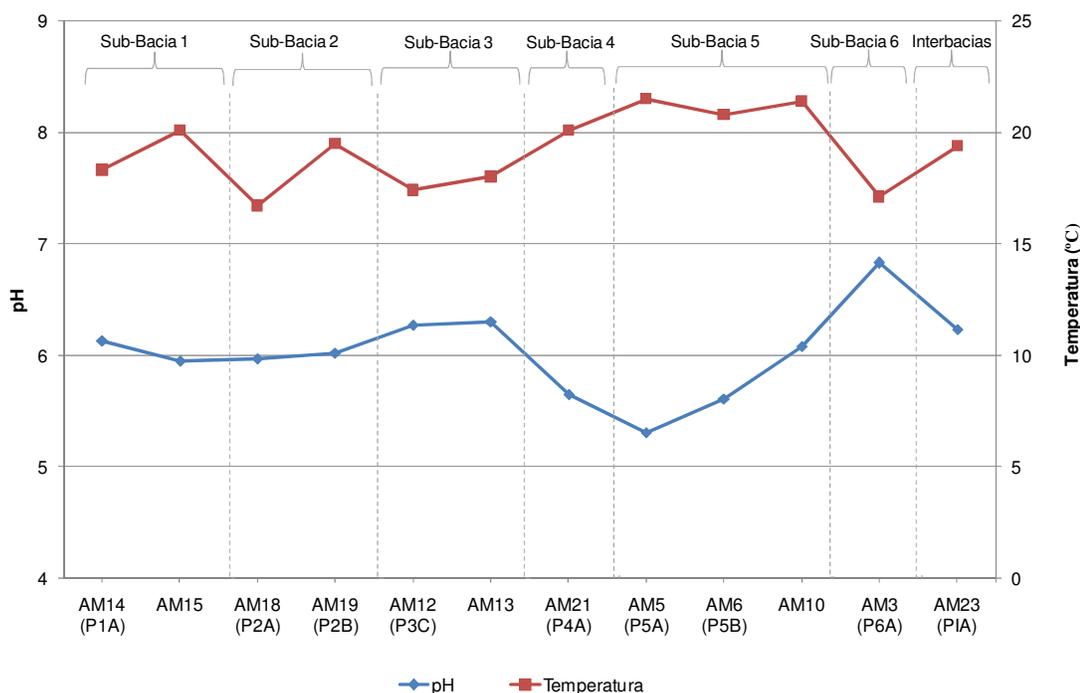


FIGURA 6.4 – Variação Espacial do Potencial Hidrogeniônico Medidos *in situ*- pH

Quanto aos resultados de condutividade elétrica, as medidas realizadas em campo foram corrigidas segundo Logan (1965, *apud* CPRM, 2008), que considera a temperatura na aplicação de fatores de correção. Os valores mínimo, máximo e médio de condutividade elétrica são respectivamente 15,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 64,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 36,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Segundo Fernandes (2005), constata-se que a quantidade de sais dissolvidos na água aumenta com a temperatura, devido a reações de dissolução de minerais e de troca iônica, fazendo com que aumente também os valores medidos de condutividade elétrica. Comparou-se então a

distribuição espacial das concentrações dos principais íons liberados pelas rochas cristalinas (Figura 6.5) com a variação da condutividade elétrica. Ressalta-se que as concentrações médias de sódio na água em ambiente de gnaiss intemperizado estão em torno de 5 mg/L.

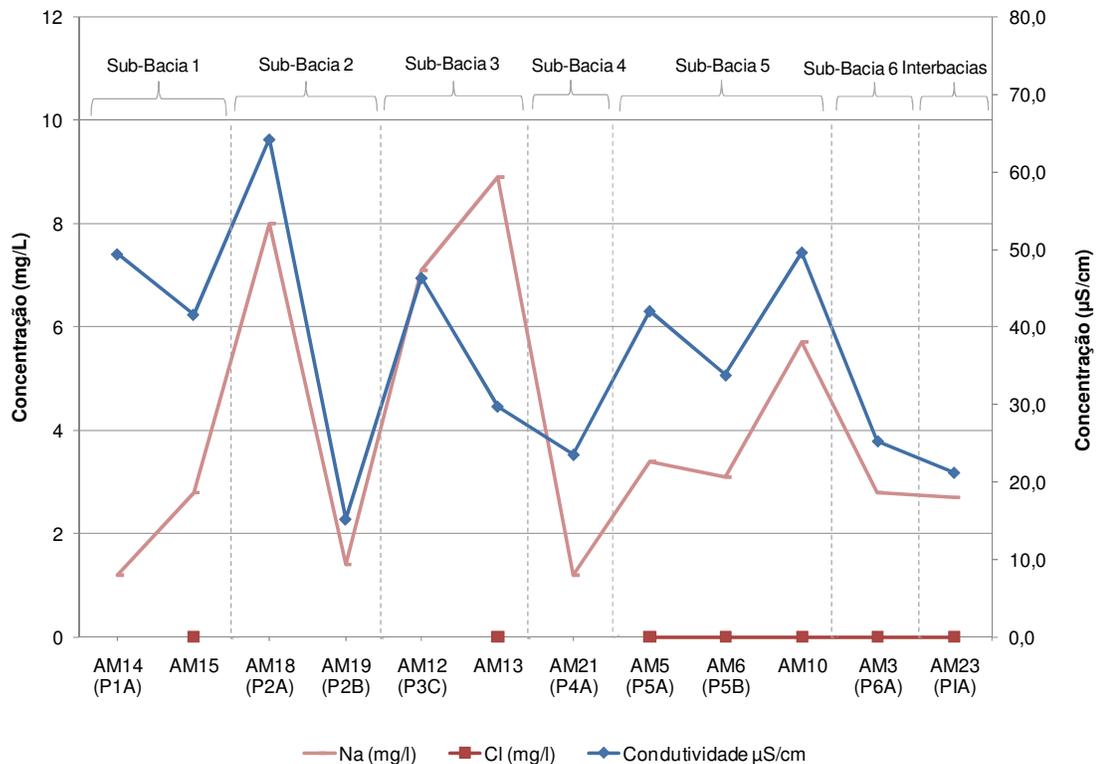


FIGURA 6.5 – Variação Espacial dos Íons de Na e Cl e sua Relação com a Condutividade Elétrica

Os minerais ferromagnesianos presentes nas rochas do embasamento normalmente se comportam de forma semelhante e sua distribuição espacial está representada na Figura 6.6. Quanto aos íons, a presença de Fe ocorre normalmente em baixas concentrações, com exceção das sub-bacias 2 e 6, onde os resultados ultrapassam 25 mg/L. As concentrações de manganês são inferiores às de ferro.

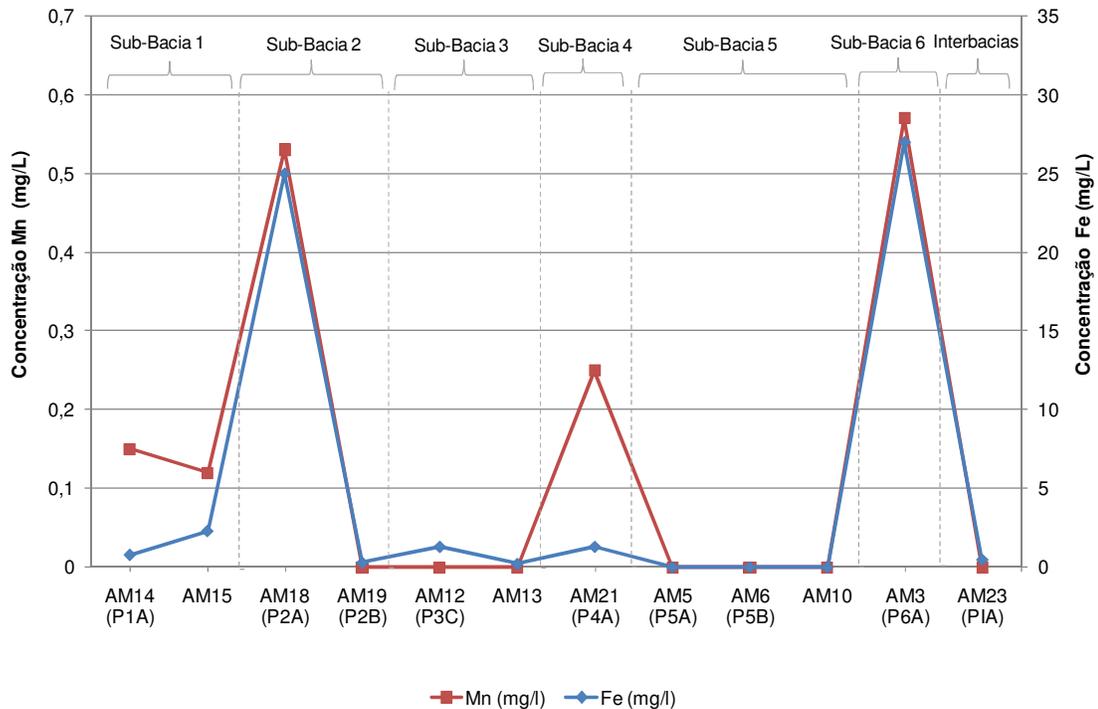


FIGURA 6.6 – Variação Espacial dos Íons de Manganês e Ferro

Para o íon Ca os resultados indicam concentrações inferiores às esperadas para águas subterrâneas, com valores médios em torno de 1,5 mg/L. As ocorrências dos íons K e Cl são relativamente baixas, com valores máximos em $3,5 \pm 0,4$ mg/L de K e $1,2 \pm 0,1$ µg/ml de Cl. O íon Na ocorre com concentrações entre $1,2 \pm 0,1$ e $8,9 \pm 0,9$ mg/L. Os valores máximos de Na foram observados nas sub-bacias 2 e 3. Os maiores valores de SiO₂ foram encontrados nas sub-bacias 1, 3 e 5, em torno de 30 mg/L. A distribuição espacial dos elementos móveis, aqui representados pelos íons potássio, cálcio, sódio e cloro, e ainda sua comparação com a distribuição espacial da sílica, podem ser visualizados na Figura 6.7.

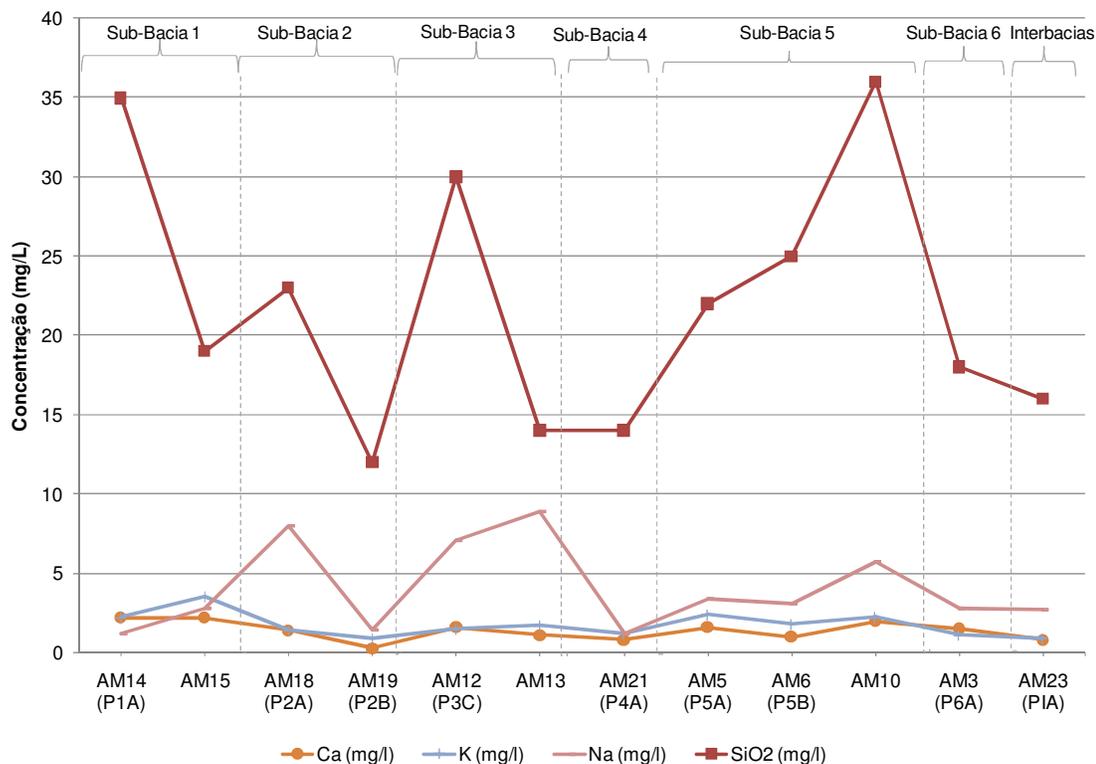


FIGURA 6.67 – Variação Espacial dos Elementos Móveis e da Sílica

Para o íon Mg os resultados indicam concentrações inferiores às esperadas para águas subterrâneas, com valores médios em torno de 0,5 mg/L. As concentrações de SO_4 são relativamente baixas, apresentando valores inferiores a 0,35 $\mu\text{g/L}$.

Segundo classificação de Custódio e Llamas (1983, *apud* CPRM, 2008), os resultados das análises químicas da dureza indicam que as águas da bacia são brandas, com valores máximos de $22,1 \pm 1$ mg/L de CaCO_3 (sub-bacia 1).

Assim como para os sólidos totais dissolvidos, os maiores valores de alcalinidade foram encontrados nas sub-bacias 1, 3 e 5 (em torno de 20 mg/L de CaCO_3 e 60 mg/L de STD). Por sua vez, os nitratos estão em concentrações inferiores a 0,25 $\mu\text{g/mL}$, com exceção das sub-bacias 1, 5 e interbacias, onde alcançam concentrações de até $8,9 \pm 0,09$ $\mu\text{g/mL}$ de NO_3 . Ressalta-se que concentrações de nitrato superiores a 5 $\mu\text{g/mL}$ podem indicar contaminação no aquífero (CPRM, 2008).

7 MODELO HIDROGEOLÓGICO

7.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

O modelo hidrogeológico conceitual representa a simplificação das características levantadas na revisão bibliográfica e em campo na interpretação de um sistema hidrogeológico. Além de facilitar a análise de um problema real, o modelo conceitual direciona a implementação de um aplicativo computacional capaz de simular as condições de circulação das águas subterrâneas da forma mais fiel possível à realidade do local, porém com as limitações associadas aos dados básicos da área em estudo. Os parâmetros de entrada do modelo computacional definidos no modelo conceitual referem-se à hidrografia, climatologia, geologia e hidrogeologia, e, por sua vez, os elementos condicionantes são as unidades hidroestratigráficas, as condições de contorno e os parâmetros hidrodinâmicos.

Segundo CPRM (2008), a ocorrência das águas subterrâneas em domínio de rochas cristalinas, onde o manto intemperizado recobre a zona fissurada, está condicionada principalmente pela abundância da precipitação e sua distribuição no tempo, formando um sistema aquífero livre com variação do nível de água entre o manto decomposto e a zona fraturada. Na região sudeste o manto decomposto do solo, ou cobertura eluvial, possui espessura da ordem de 40 m, com valor mediano de 30 m (CPRM, 2008).

A velocidade da água subterrânea, aqui relacionada à condutividade hidráulica, aumenta com a densidade de fissuras no sistema hidrogeológico constituído pelo gnaisse ou com a porosidade efetiva para fluxo da camada de cobertura intemperizada. Por outro lado, as diferenças de carga hidráulica (ou gradiente hidráulico) também influenciam nas velocidades de fluxo das águas subterrâneas no meio. A condutividade hidráulica no meio poroso varia entre $1,6 \times 10^{-6}$ e $1,6 \times 10^{-3}$ cm/s, conforme variação de textura do solo nos latossolos e nos argissolos. Na camada de transição entre o meio poroso e o meio fraturado, quando existente, varia em torno de $3,3 \times 10^{-6}$ e $5,2 \times 10^{-5}$ cm/s. Na camada de rocha sã a velocidade de fluxo é praticamente nula, em torno de $3,0 \times 10^{-14}$ e $2,0 \times 10^{-10}$ cm/s. Para o meio fraturado, por sua vez, a condutividade hidráulica pode variar muito, a depender da espessura e densidade de canais de fluxo interligados no meio rochoso.

A interpretação de sistemas aquíferos fraturados, onde a circulação e o armazenamento da água subterrânea dependem de inúmeros condicionantes, se torna difícil na maioria das vezes. A transferência da configuração real observada em campo num modelo conceitual

simplificado consistiu basicamente na separação da circulação subterrânea em dois compartimentos, um de fluxo profundo através de fraturamentos e outro de escoamento mais subsuperficial, através do manto decomposto e dos depósitos coluviais e de tálus. Existe ainda uma região de fluxo misto nas camadas de transição dos aquíferos porosos para os fraturados.

Para a delimitação da região aquífera com interação entre o fluxo subsuperficial e de zonas fraturadas focou-se nos resultados da caracterização da geologia estrutural, hidrológica, isotópica e hidroquímica. Abaixo das faixas de rocha fraturada ou do saprolito, onde as fraturas estão ausentes, tem-se a camada do gnaiss coeso (rocha sã), que funciona como uma camada impermeável.

Logo, pode-se caracterizar a unidade estratigráfica das rochas granito-gnáissicas do Embasamento Cristalino como um sistema composto por aquíferos porosos nos mantos de alteração, aquíferos mistos de transição entre os fluxos subsuperficiais e profundos, aquíferos fissurados de porosidade secundária e maiores tempos de renovação, e abaixo destes aquíferos, camada impermeável de rocha sã, aqui considerada como aquífugo.

7.1.1 Regime de Descarga das Águas Subterrâneas

As sub-bacias delimitadas no domínio de interesse possuem, em geral, baixos valores de coeficiente de recessão. Os cursos de água da bacia comportam-se de forma perene durante todo o ano hidrológico. O trânsito da água subterrânea no aquífero, seja este a cobertura porosa ou os meios fraturados, pode oscilar em intervalos curtos ou longos e, conseqüentemente, num menor ou maior tempo de residência nos aquíferos.

Com exceção dos cursos de água condicionados por fraturamentos, a contribuição subterrânea aos elementos de drenagem (escoamento base), provém da circulação subsuperficial em meios porosos. Por sua vez, a contribuição ao escoamento superficial proveniente do fluxo das zonas fraturadas está presente nas drenagens do ribeirão Mato Frio, no Córrego dos Caboclos e seus afluentes, ocorrendo com mais expressão nos afluentes da margem esquerda, no afluente da margem direita do ribeirão Mato Frio logo após sua confluência com a sub-bacia 6 e na drenagem esquerda da sub-bacia 6.

Ressalta-se, porém que onde o latossolo encontra-se mais desenvolvido, como na sub-bacia 6, o coeficiente de recessão apresenta-se um pouco maior que nas demais sub-bacias, provavelmente relacionado à baixa capacidade de armazenar água em profundidade e à

presença de vegetação densa, que contribui para maiores alturas de evapotranspiração. O maior valor de coeficiente de recessão ocorreu na sub-bacia 4 e o menor valor deste mesmo coeficiente incidu sobre o hidrograma de vazão resultante da drenagem de toda a área de interesse, relacionando-se a um maior aporte de água subterrânea ao curso de água superficial pela fratura coincidente ao leito de drenagem principal do ribeirão Mato Frio.

Dessa forma constatou-se que os tipos de solo, para a maior parte da área em estudo, exercem maior influência no regime fluviométrico das sub-bacias. O controle realizado pelas zonas fraturadas na descarga dos aquíferos também é bastante expressivo, porém sua influência é atenuada nas áreas onde os solos apresentam maiores teores de argila (solos mais evoluídos). As demais características do meio, como a declividade, a cobertura vegetal e o uso do solo têm importância secundária na descarga dos aquíferos.

Na Figura 7.1 foram plotadas as médias mensais de vazão da série monitorada na bacia do ribeirão Mato Frio.

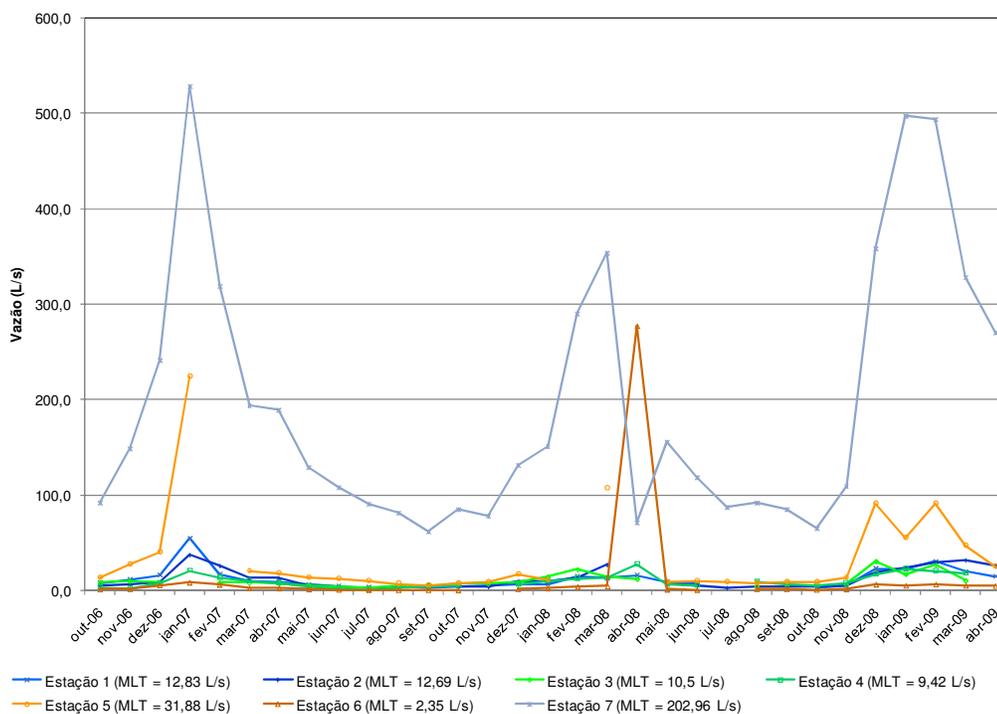


FIGURA 7.1 – Vazões Médias Mensais nas Estações Fluviográficas Monitoradas na Bacia do Ribeirão Mato Frio

As zonas de descarga dos aquíferos são marcadas pela ocorrência de nascentes. As particularidades de cada sub-bacia são discutidas a seguir.

7.1.1.1 Sub-bacia 1

Na sub-bacia 1, onde não foram identificados afloramentos de rocha, a camada solo decomposto mais rocha alterada podem variar em torno de 30 m. A profundidade do nível de água supera 10 m nos divisores de águas e aflora em cotas inferiores a 980 m, onde pode ser encontrado em profundidades de até 5 m. O fluxo da água subterrânea ocorre do topo dos morros em direção às vertentes, paralelamente às curvas de nível, comportando-se como um aquífero livre. A variação de nível da nascente cadastrada nesta sub-bacia foi praticamente nula, alcançando diferenças máximas de 0,6 m entre os meses de agosto/2008 e fevereiro/2009.

7.1.1.2 Sub-bacia 2

O afluente direito da sub-bacia 2 encontra-se sobre substrato rochoso enquanto as drenagens da margem esquerda correm sobre material um pouco mais espesso, caracterizado por texturas grosseiras, como areia e cascalho. Destas vertentes aos divisores de água da sub-bacia, em função da alta declividade do terreno que promove o transporte rápido dos sedimentos, o solo pouco se desenvolve, alcançando profundidades em torno de 30 m.

A camada de argissolo desenvolvida sob relevo plano a ondulado funciona como uma unidade porosa que recebe a água infiltrada e a redistribui através das rochas alteradas. Essa água ressurge como nascente, no contato com a camada de rocha sã, que não oferece condições de permeabilidade (primária ou secundária) para percolação no maciço rochoso. Dessa forma, o fluxo subterrâneo se comporta como em um aquífero livre, sendo direcionado pela topografia dos divisores às vertentes.

Como característica principal dos argissolos, a mudança textural do horizonte superior do solo para os inferiores (grupamento textural médio para argiloso), impõe um tempo maior de recarga na transição entre a primeira e a segunda camada de solo, onde o nível de água subterrâneo está localizado. O acompanhamento da mobilidade das nascentes nesta sub-bacia apontou para respostas rápidas de variação de nível de água subterrânea aos eventos de precipitação.

7.1.1.3 Sub-bacia 3

Na sub-bacia 3, conforme análise pedológica, a espessura do solo mais a camada de rocha alterada deve variar entre 40 e 50 m. Nas áreas da sub-bacia onde a presença de vegetação mais densa interferem no balanço hídrico, aumentando a evapotranspiração, e ainda onde o relevo mais acidentado promove o aumento do escoamento superficial, a recarga do aquífero ocorre mais lentamente. Na margem direita da sub-bacia e no divisor de águas ao sul, onde o relevo varia de plano a ondulado e o solo é usado como pasto, são reportados volumes menos consideráveis de água ao aquífero, porém a água se infiltra mais rapidamente do que nas áreas com vegetação mais densa.

As variações dos níveis de água subterrânea nas cabeceiras desta sub-bacia respondem mais prontamente aos eventos de precipitação e, inversamente, nas porções da margem esquerda do curso de água principal, onde o solo apresenta-se mais espesso, a resposta das variações de níveis de água no subsolo às precipitações ocorrem de forma mais retardada.

Nesta sub-bacia o aquífero é livre com escoamento subterrâneo originado nas cotas superiores seguindo em direção aos talwegues, onde ressurge sob forma de escoamento base. Próximo aos divisores de água o nível do lençol freático encontra-se a profundidades superiores a 10 m. Tal profundidade é reduzida nas cotas inferiores, alcançando no máximo 5 m.

7.1.1.4 Sub-bacia 4

A espessura do pacote poroso (argissolo + rocha alterada) que abriga o aquífero desta sub-bacia varia em torno de 30 m nas cabeceiras e de 10 m nos talwegues. O nível do lençol freático não ultrapassa 10 m, sendo mais superficial nas partes mais baixas da sub-bacia. Assim como nas demais sub-bacias, a recarga ocorre de forma mais pronunciada onde o relevo varia de plano a ondulado e onde a vegetação é mais densa. O fluxo de água subterrânea segue das cabeceiras em direção aos talwegues, paralelamente às curvas de nível, conforme esperado em um aquífero livre, e a variação do nível de água subterrânea responde de forma retardada aos eventos de precipitação.

Apesar de bastante fraturado, o quartzito presente no divisor de águas localizado entre as sub-bacias 4 e 6, não deve contribuir ao fluxo de água subterrâneo. Isso ocorre pelas altas declividades onde a rocha é aflorante e pela pequena área ocupada na sub-bacia em relação às rochas granito-gnáissicas.

7.1.1.5 Sub-bacia 5

A região em estudo foi marcada por diversos eventos tectônicos que conferiram ao substrato rochoso lineamentos e fraturamentos. São essas estruturas, geradas durante os eventos tectônicos, que contribuem para a formação de uma permeabilidade secundária, responsável pelo escoamento das águas subterrâneas na Serra dos Caboclos.

A natureza das estruturas tectônicas que condicionam o fluxo subterrâneo é bastante variada, destacando-se os falhamentos de direção em torno de SWS, coincidente ao curso de água principal da sub-bacia.

O fluxo subterrâneo na sub-bacia 5 é fortemente condicionado pelas rochas fraturadas, ocorrendo em maiores profundidades na margem esquerda do Córrego dos Caboclos, onde as variações dos níveis de água subterrânea respondem mais prontamente aos eventos de precipitação. A zona de recarga desta sub-bacia está localizada ao longo dos divisores topográficos, nos depósitos de tálus e ao longo da camada aflorante de gnaiss. Ressalta-se que a água infiltrada nos depósitos de tálus e latossolos dos divisores topográficos também participa dos escoamentos de base do Córrego dos Caboclos, restituindo as vazões nos períodos de estiagem em escoamento subsuperficial ou, após percolar por muitos anos na zona fraturada do gnaiss, por escoamentos profundos.

Os escoamentos subsuperficiais estão mais presentes na margem direita do Córrego dos Caboclos, onde a espessura do solo varia em torno de 40 m retardando a variação dos níveis de água no subsolo em relação aos eventos de precipitação. Por sua vez, a camada de latossolo presente na margem esquerda da sub-bacia se estende por poucos metros e muitas vezes sua profundidade é aumentada onde os depósitos de tálus encontraram estabilidade. De uma forma geral, o nível de água subterrânea não ultrapassa 10 m de profundidade.

7.1.1.6 Sub-bacia 6

Apesar da presença de vegetação densa em quase 72% da área desta sub-bacia, o latossolo não alcança grandes profundidades, estando limitado a 40 m. A partir desta profundidade a rocha alterada e a zona de contato entre o gnaiss e o quartzito pode participar do fluxo subterrâneo da água. Dessa forma, o fluxo das águas subterrâneas na sub-bacia 6 é caracterizado por escoamentos subsuperficiais na margem direita e profundos na margem esquerda. O nível do lençol freático pode ser encontrado a pequenas profundidades, inferiores a 10 m.

Assim como nas demais sub-bacias, a recarga ocorre nos divisores topográficos, onde o relevo varia entre plano a ondulado, sendo mais expressivo onde a vegetação é mais densa e menos significativo onde o solo foi pisoteado nas pastagens. A presença de textura argilosa a muito argilosa nas camadas superficiais (0 a 6,0 m) dificulta, localmente, a infiltração das águas de chuva para o aquífero. A baixa condutividade hidráulica desses materiais reflete nas baixas vazões nos períodos de estiagem.

7.1.1.7 Interbacias

O fluxo no ribeirão Mato Frio é fortemente condicionado pela geologia, recebendo contribuições expressivas de águas profundas, provenientes de zonas fraturadas do embasamento. Nos afluentes menores localizados no médio e alto curso do ribeirão Mato Frio o escoamento predominante é o subsuperficial. Por sua vez, afluentes localizados próximo a seu exutório apresentaram tempos de recorrência maiores, indicando a participação de circulação profunda proveniente das zonas fraturadas da rocha.

Poucas são as zonas de recarga nas áreas de interbacias, onde são predominantes os pontos de descarga do aquífero. O solo nesta área é pouco espesso, onde as profundidades variam de poucos metros a 30 m. O lençol freático pode ser encontrado a menos de 5 m de profundidade.

7.1.2 Recarga dos Aquíferos

A renovação da água subterrânea ocorre anualmente sob um regime pluviométrico médio anual de 1540 mm (média anual estação Fazenda Laranjeiras), o que garante a perenidade dos cursos de água na bacia do ribeirão Mato Frio. As áreas de recarga, aqui consideradas como aquelas onde predominam as condições de infiltração (recarga) sobre as de restituição (descarga), localizam-se nos divisores topográficos com relevo variando de plano a ondulado.

Na maioria das sub-bacias a água infiltra verticalmente no meio poroso (argissolos ou latossolos) até alcançar o lençol freático, a profundidades entre 5 e 10 m, ou mais. A partir daí segue sob a ação da gravidade, em fluxo subsuperficial, em direção aos talwegues localizados nas cotas inferiores. Nas sub-bacias onde o manto de regolito interage com o meio rochoso decomposto a semi-decomposto, parte da água infiltrada segue pelas fraturas a maiores profundidades, promovendo a recarga dos meios fraturados.

Além da influência do relevo nas áreas de recarga, a magnitude dessa recarga depende, entre outros fatores, da natureza do solo e do tempo de permanência dos excedentes do balanço hídrico (CPRM, 2008). O uso do solo e tipo de cobertura vegetal também influem nos processos de recarga, observadas parcelas da precipitação que contribuem para a recarga em áreas de remanescente de Mata Atlântica variando entre 24% e 27% (sub-bacias 1, 3 e 6), em áreas de pasto sobre argissolo em torno de 9% (sub-bacias 2 e 4) e em áreas de pasto sobre latossolo igual a 21% (sub-bacia 5).

Estudando os efeitos da substituição de áreas florestadas por áreas agrícolas ou urbanizadas, Vieira & Palmier (2006) descreve a importância da aplicação de resultados experimentais nas estimativas de recarga, considerando os resultados de repetidos experimentos mais confiáveis do que conclusões baseadas na teoria da evapotranspiração.

Considerando que as campanhas de acompanhamento da mobilidade das nascentes ocorreram entre junho de 2008 e fevereiro de 2009, as porcentagens de recarga definidas nos testes de infiltração utilizando traçadores radioativos (Tabela 5.18) foram aplicadas sobre a precipitação ponderada pelo método de Thiessen (CHOW, *et al.*, 1988) para cada uma das sub-bacias, com referência no ano de 2008. A Tabela 7.1 resume os valores de recarga para cada sub-bacia e para a bacia do ribeirão Mato Frio. Por sua vez, a Figura 7.2 ilustra as áreas de recarga delimitadas a partir da distribuição do relevo, tipo e uso do solo e da cobertura vegetal.

TABELA 7.1 – Distribuição Espacial dos Valores de Recarga na Bacia do Ribeirão Mato Frio (ano civil 2008)

Bacia	Recarga Vegetação Densa (mm/ano)	Recarga Pasto (mm/ano)
Sub-bacia 1	505,6	423,2
Sub-bacia 2	631,4	225,3
Sub-bacia 3	344,1	288,0
Sub-bacia 4	552,0	196,9
Sub-bacia 5	367,7	307,8
Sub-bacia 6	418,6	350,4
Interbacias	495,4	295,7
Bacia Ribeirão Mato Frio	458,0	273,4

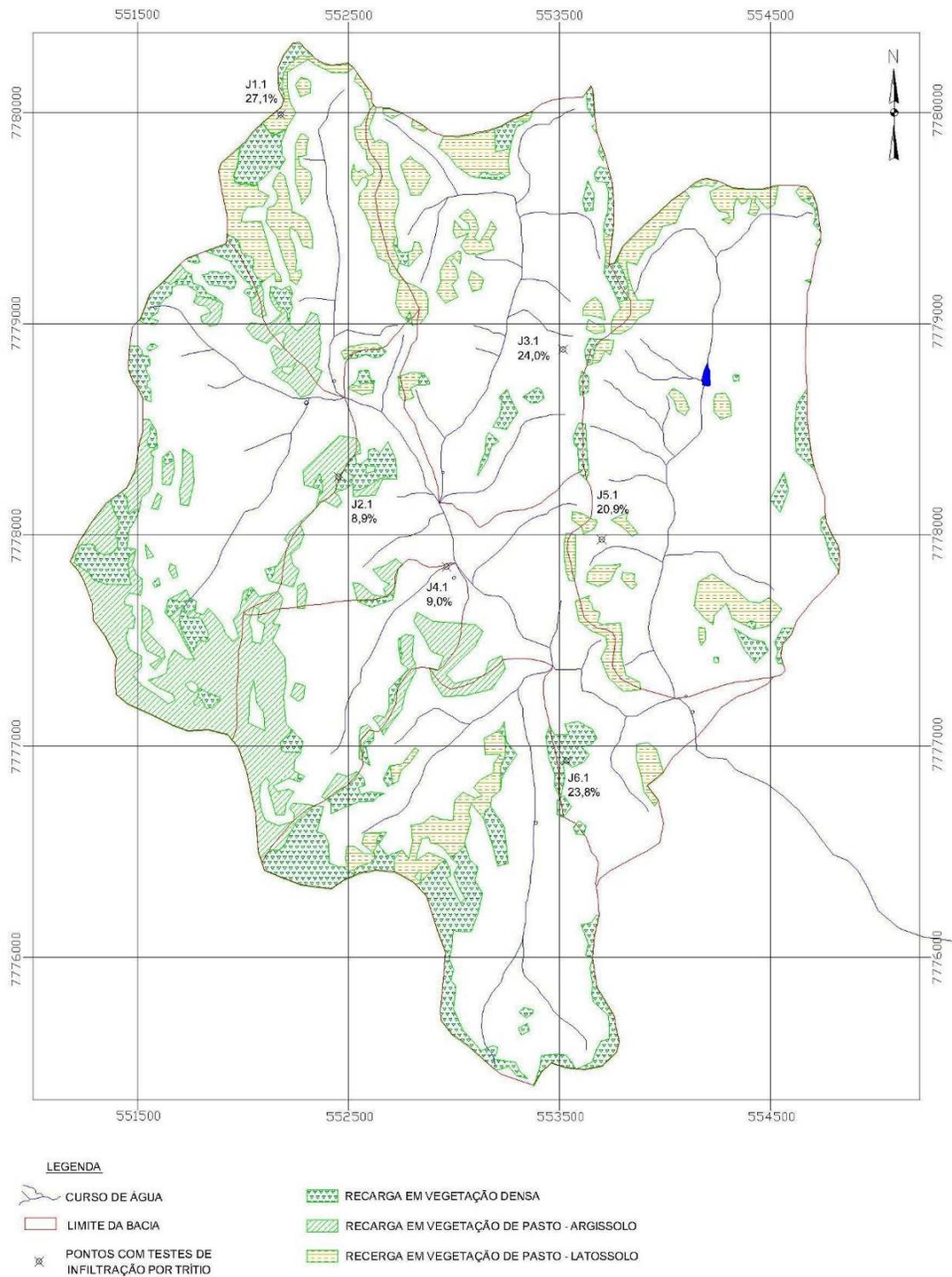


FIGURA 7.2 – Áreas Preferenciais de Recarga – Relação com o Relevo e Cobertura Vegetal

7.2 Modelo Hidrogeológico Computacional

Para reproduzir o modelo conceitual do sistema hídrico subterrâneo da bacia do ribeirão Mato Frio, em um aplicativo computacional, procurou-se utilizar uma ferramenta capaz de simular o comportamento hidrodinâmico tridimensional do aquífero, em um modelo numérico, considerando uma situação estacionária.

As etapas do trabalho desenvolvidas até que os resultados do modelo fossem alcançados foram, em sua maioria, detalhadas nos capítulos anteriores. Essas etapas de trabalho, conforme Anderson & Woessner (1992), são: a definição dos objetivos; elaboração de um modelo conceitual com os resultados da caracterização da área de interesse (condições de contorno, unidades hidroestratigráficas, áreas de recarga e de descarga dos aquíferos); escolha do modelo matemático mais adequado e sua alimentação conforme o modelo conceitual; calibração e verificação do modelo computacional a partir de comparações dos resultados alcançados e dados levantados em campo e, finalmente, resultados com previsões das condições futuras e atuais.

Conforme descrito anteriormente, a escolha do aplicativo *Visual-Modflow* para a realização deste estudo deve-se ao fato de se tratar de uma ferramenta exaustivamente utilizada na área técnica para a solução de problemas de fluxo subterrâneo, contando com pré e pós-processadores gráficos que auxiliam na entrada de dados e interpretação de resultados (FERNANDES, 2005). Na solução numérica adotada pela ferramenta computacional selecionada, as equações diferenciais parciais de fluxo são aplicadas utilizando-se o Método das Diferenças Finitas, onde o domínio de interesse é dividido em células para o cálculo das cargas hidráulicas a partir de condições de contorno conhecidas.

A seguir está apresentada uma descrição do desenvolvimento do modelo computacional assim como os valores finais adotados após o processo de calibração para os parâmetros hidrogeológicos.

7.2.1 Domínio de Cálculo

A partir dos conceitos sobre o método de cálculo descrito e da caracterização realizada foi definido um *Grid* para incorporação das condições de contorno e propriedades hidrogeológicas. O polígono em que o modelo está incorporado possui as seguintes coordenadas (UTM): 551.100E / 7.775.350N e 554.850E / 7.780.350N. Tal polígono foi

dividido em 125 colunas e 200 linhas, de modo que a largura e comprimento das células fossem respectivamente 30 e 25 m.

As cotas de fundo e de topo da malha de cálculo adotada são 500 e 1300 m. Toda a profundidade da malha foi dividida em 13 camadas, definidas após a inserção da conformação topográfica no topo do terreno. A primeira camada, com espessura de apenas 2 metros, foi assim definida para que pudesse representar o primeiro horizonte (horizonte A) dos latossolos, onde esses estão presentes. A segunda camada, em complemento à primeira e com 3 metros de espessura, procura representar o horizonte B desses solos, o qual pode se estender a maiores profundidades em alguns pontos da bacia englobando a terceira camada (5 m de espessura) e da quarta à sexta (10 m de espessura cada). As demais camadas possuem 50 m de espessura cada.

A área de interesse foi definida a partir da malha de monitoramento fluviográfico implantada na bacia do ribeirão Mato Frio, sendo selecionada como ponto exutório da bacia em estudo a estação de Fazenda Laranjeiras (2044041). Os divisores topográficos da bacia hidrográfica delimitada foram considerados como limites laterais da área de cálculo e a conformação topográfica como o limite superior das unidades hidroestratigráficas. Os contatos entre o pacote poroso e rocha fraturada, assim como entre a rocha fraturada e a rocha sã, foram variados durante a calibração do modelo.

Alguns limites estruturais e lineamentos de fratura no interior do domínio de cálculo foram considerados, como as camadas de rocha quartzítica nos divisores topográficos (sub-bacias 4 e 6), as cúpulas ou pães de açúcar formados pela rocha gnáissica aflorante (sub-bacia 5) e os leitos de drenagem que se desenvolvem sobre o gnaisse fraturado (sub-bacias 2 e 5).

7.2.2 Condições de Contorno

Conforme descrito na metodologia, inicialmente foram apontadas as células com fluxo nulo localizadas fora da área de drenagem da bacia em estudo (condição de contorno de segundo tipo) e as cargas hidráulicas conhecidas pela localização dos principais drenos (condição de contorno de primeiro tipo).

Adotou-se para o cálculo da condutância a condutividade hidráulica de 10 m/dia (textura arenosa), a largura média do curso de água principal (ribeirão Mato Frio) de 10 m e dos demais cursos de água de 5 m e a espessura da camada drenante do leito desses cursos de

água de 1 m. Aplicando esses valores à Equação 4.9 e considerando que a largura das células onde foram atribuídos os drenos é de 30 m, as condutâncias assumidas para o ribeirão Mato Frio e demais cursos de água são respectivamente 3000 m²/dia e 1500 m²/dia.

O domínio de cálculo assim como as condições de contorno relacionadas às cargas hidráulicas constantes, a configuração geométrica de topo e as células inativas (fluxo nulo) podem ser visualizados nas Figuras 7.3 e 7.4.

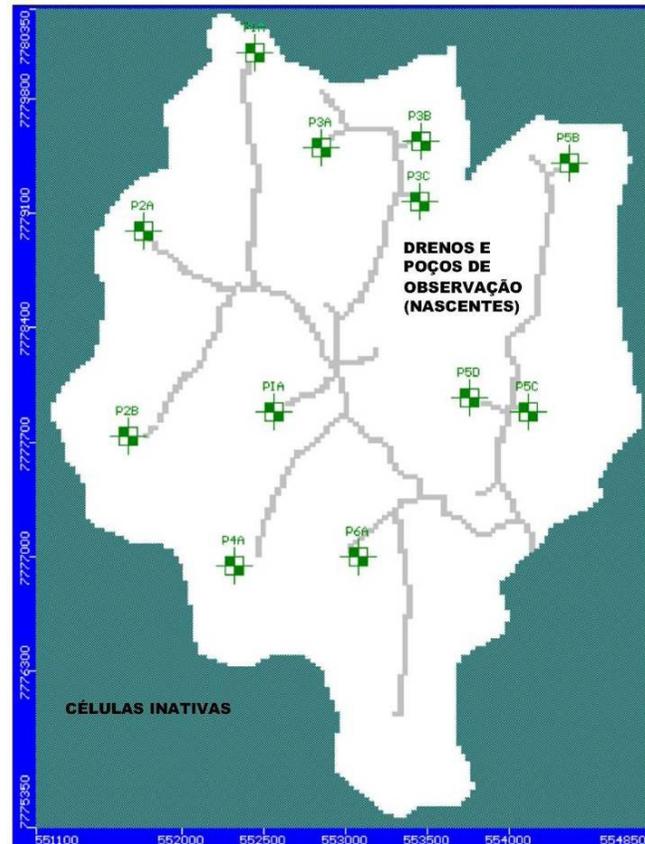


FIGURA 7.3 – Configuração do Domínio de Cálculo no Plano Horizontal



FIGURA 7.4 – Configuração do Domínio de Cálculo no Plano Vertical – Corte na Coordenada UTM N7.778.350

Para que durante a calibração do modelo os resultados de carga hidráulica alcançassem valores mais próximos dos observados na campanha de acompanhamento da mobilidade das nascentes ocorrida no dia 21 de junho de 2008 (primeira campanha), as porcentagens de recarga estimadas conforme tipo de solo e cobertura vegetal foram aplicadas às precipitações acumuladas no período de 22 de junho de 2007 a 21 de junho de 2008. A seguir estão apresentados os valores de recarga resultantes para tal período (Tabela 7.2) e a distribuição espacial da recarga na área em estudo (Figura 7.5)

TABELA 7.2 – Distribuição Espacial dos Valores de Recarga na Bacia do Ribeirão Mato Frio (junho/07 a junho/08)

Bacia	Recarga Vegetação Densa (mm/ano)	Recarga Pasto (mm/ano)
Sub-bacia 1	441.27	369.35
Sub-bacia 2	532.00	189.79
Sub-bacia 3	317.86	266.05
Sub-bacia 4	452.33	161.37
Sub-bacia 5	308.36	258.10
Sub-bacia 6	318.54	266.62
Interbacias	399.77	238.62

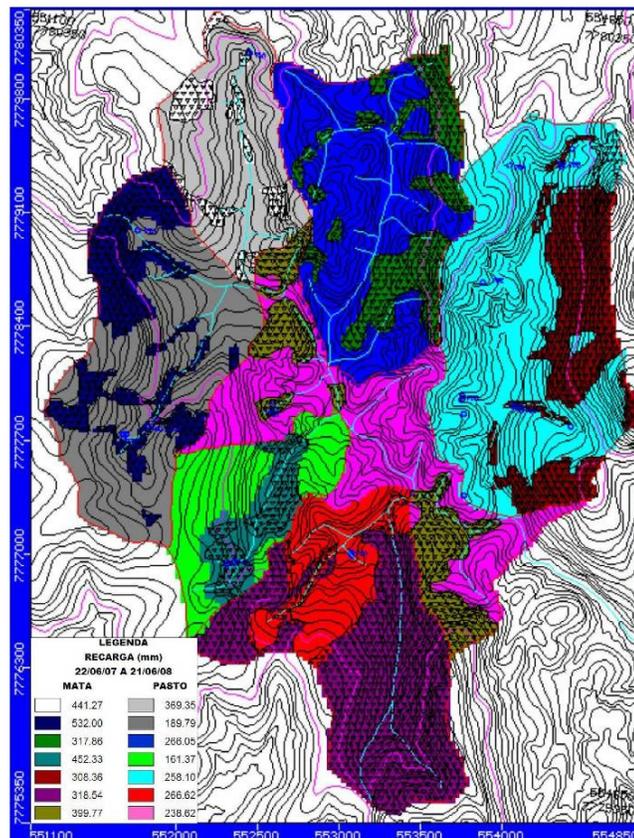


FIGURA 7.5 – Distribuição das Recargas no Modelo Computacional

7.2.3 Parâmetros Hidrogeológicos

Segundo CPRM (2008), as propriedades responsáveis por todo o comportamento do aquífero são aquelas relacionadas à água - como a densidade, viscosidade e compressibilidade - e as propriedades do meio - como a porosidade, permeabilidade intrínseca e compressibilidade. Tais propriedades interferem diretamente na capacidade de um aquífero armazenar e transmitir água e estão embutidos no cálculo da condutividade hidráulica (K).

Antes da inclusão dos valores de condutividade hidráulica no modelo computacional, foram inseridas informações sobre a porosidade e o armazenamento. Os valores adotados para esses parâmetros estão apresentados na Tabela 7.3.

TABELA 7.3 – Armazenamento Específico e Porosidade Total e Efetiva

Porosidade Total - η	0,2
Porosidade Efetiva - η_e	0,1
Armazenamento Específico - S_s (m^{-1})	0,001
Coefficiente de Armazenamento - S_y	0,1

Na representação da condutividade hidráulica foram adotados sete valores distintos. Dois desses valores foram atribuídos aos horizontes A e B dos solos classificados como Latossolos, representados no modelo pelas cores magenta ($3,0 \times 10^{-3}$ cm/s) e verde ($3,5 \times 10^{-4}$ cm/s), respectivamente, dentro das faixas de condutividade hidráulica estimadas para classes de textura franco-argilo-arenoso e argiloso, a partir dos dados obtidos com o permeâmetro Guelph.

Para os solos classificados como Argissolos o valor de condutividade hidráulica adotado foi de ($7,0 \times 10^{-6}$ cm/s), representado no modelo pela cor azul clara. Para os Cambissolos e solos menos desenvolvidos foi atribuído valor de condutividade próximo ao de areia siltosa ou areia fina (FETTER, 1988 *apud* CPRM, 2008), representado pela cor branca e com valor igual a $1,0 \times 10^{-3}$ cm/s. Para os solos hidromórficos, presentes nas áreas alagadas, leitos de drenagem e maiores profundidades, o valor de condutividade hidráulica atribuído foi de $8,5 \times 10^{-5}$ cm/s, representado no modelo computacional pela cor azul escura.

Os valores de condutividade hidráulica encontrados em Domenico & Franklin (1990) para rocha granítica alterada e rochas ígneas e metamórficas não fraturadas direcionaram a definição dos valores desse parâmetro para a camada fraturada e não fraturada do

embasamento. Os valores finais alcançados para as duas camadas após a calibração do modelo computacional foram respectivamente $3,3 \times 10^{-6}$ cm/s (vermelho escuro) e $2,0 \times 10^{-10}$ cm/s (marrom).

Com relação à anisotropia da condutividade hidráulica, admitiu-se não haver diferenciação entre as propriedades nas componentes de K_x , K_y , K_z . A configuração final da distribuição dos valores de condutividade hidráulica na área de interesse pode ser visualizada na figura esquemática 7.6.

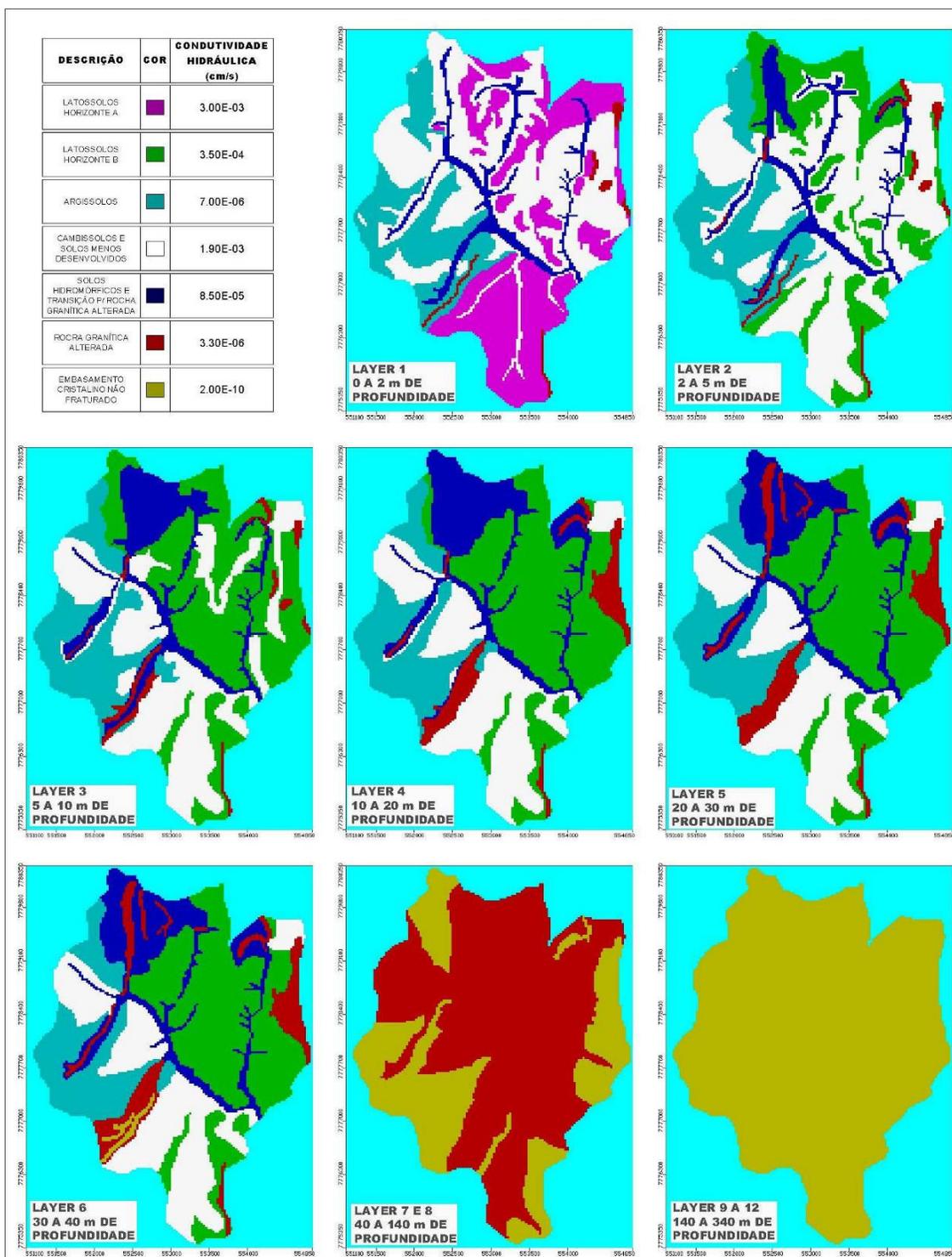


FIGURA 7.6 – Distribuição dos Valores Atribuídos de Condutividade Hidráulica

7.2.4 Calibração do Modelo

O módulo de saída do aplicativo computacional utilizado na modelagem contém, além de variadas apresentações para as cargas hidráulicas calculadas, os vetores de velocidade e o balanço das entradas e saídas do sistema. A partir da compilação das informações primárias, a recarga foi considerada como condição de contorno e não variou durante a calibração do modelo. Logo, o parâmetro variado durante a referida calibração foi a condutividade hidráulica, respeitando as faixas descritas na literatura e adotando-se valores iniciais equivalentes aos dados levantados em campo com o permeâmetro Guelph.

Para a calibração foram consideradas as nascentes cadastradas na primeira campanha de acompanhamento de mobilidade das nascentes (21 de junho de 2008). Foi desconsiderada da calibração dos níveis de água a nascente P5A, por se tratar de uma nascente com interferência antrópica causada por uma tubulação de PVC cravada no solo para captação de água. Os resultados da calibração pelos níveis de água subterrânea podem ser observados na Figura 7.7. As cargas hidráulicas calculadas assim como os valores observados podem ser comparados na Tabela 7.4.

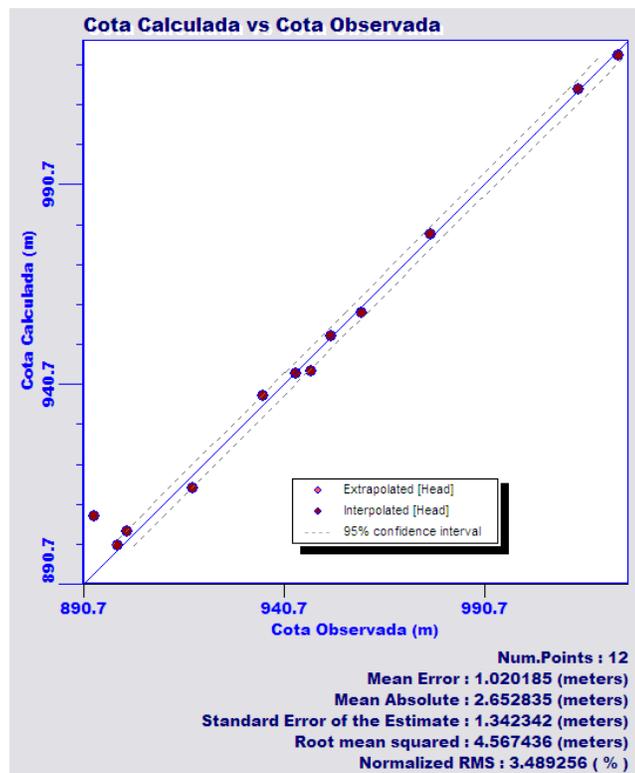


FIGURA 7.7 – Resultado da Calibração do Modelo Computacional

TABELA 7.4 – Confronto entre Valores Medidos e Calculados de Carga Hidráulica

Ponto de Observação	Cota Observada (m)	Cota Calculada (m)	Diferenças (%)
P1A	977,3	978,18	0,09
P2A	943,7	943,24	0,05
P2B	1024,2	1023,00	0,12
P3A	952,5	952,75	0,03
P3B	947,6	944,09	0,37
P3C	935,6	937,88	0,24
P4A	1014,3	1014,62	0,03
P5B	960,2	958,66	0,16
P5C	899,1	900,44	0,15
P5D	901,5	903,96	0,27
P6A	893,3	907,81	1,62
PIA	917,8	914,71	0,34

Na Tabela 7.5 são apresentados os resultados e diferenças percentuais entre as vazões calculada no modelo computacional e os resultados de vazão média no período monitorado, no período de estiagem e no ano hidrológico de 2007/2008. O cálculo das diferenças foi realizado com base nas vazões medidas nas estações fluviométricas instaladas na área em estudo.

TABELA 7.5 – Confronto entre Valores Medidos e Calculados de Vazão

Estação Fluviográfica	Vazão Calculada (L/s)	Média Série Histórica		Média Estiagem 2007/2008		Média Ano Hidrológico 2007/2008	
		Vazão (L/s)	Diferença (%)	Vazão (L/s)	Diferença (%)	Vazão (L/s)	Diferença (%)
Sub-bacia 1	4,66	12,83	63,65	4,44	-5,02	6,28	25,80
Sub-bacia 2	12,74	12,69	-0,43	5,25	-142,45	9,90	-28,67
Sub-bacia 3	9,49	10,50	9,58	3,39	-179,66	8,81	-7,81
Sub-bacia 4	2,58	9,42	72,63	3,92	34,23	7,11	63,76
Sub-bacia 5	24,86	31,88	22,04	8,34	-198,18	13,74	-80,92
Sub-bacia 6	0,00	2,35	100,00	0,26	100,00	1,06	100,00
Rib. Mato Frio	102,05	202,96	49,72	102,59	0,54	160,26	36,33

A apresentação dos vetores de velocidade de fluxo e das linhas equipotenciais de carga hidráulica estão apresentados nas Figuras 7.8 a 7.10.

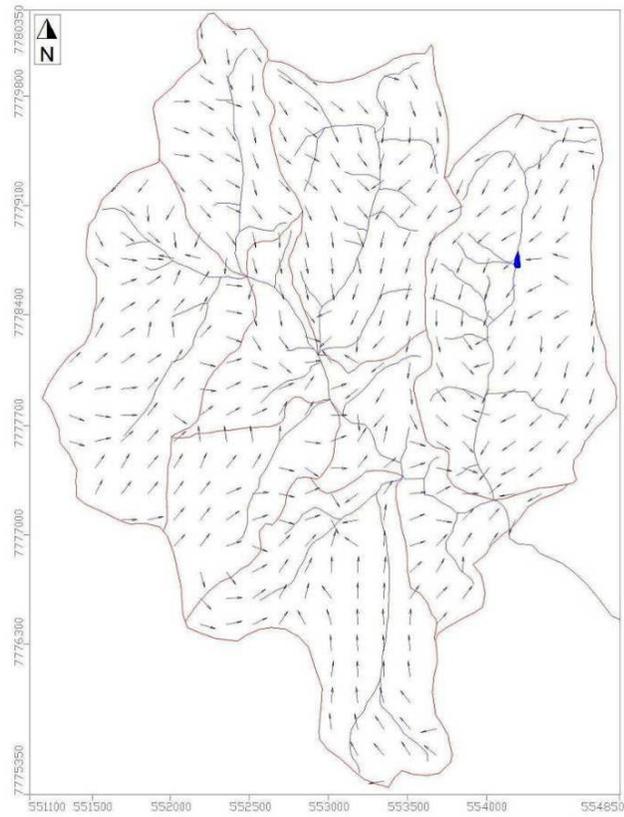


FIGURA 7.8 – Direção dos Vetores de Velocidade de Fluxo - Planta

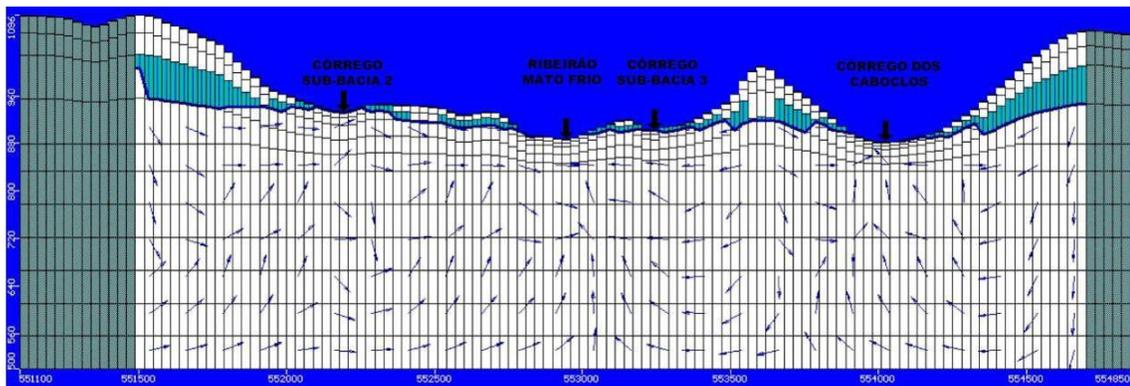


FIGURA 7.9 – Direção dos Vetores de Velocidade de Fluxo (Exagero Vertical 1:2) – Corte na Coordenada UTM N 7.778.350

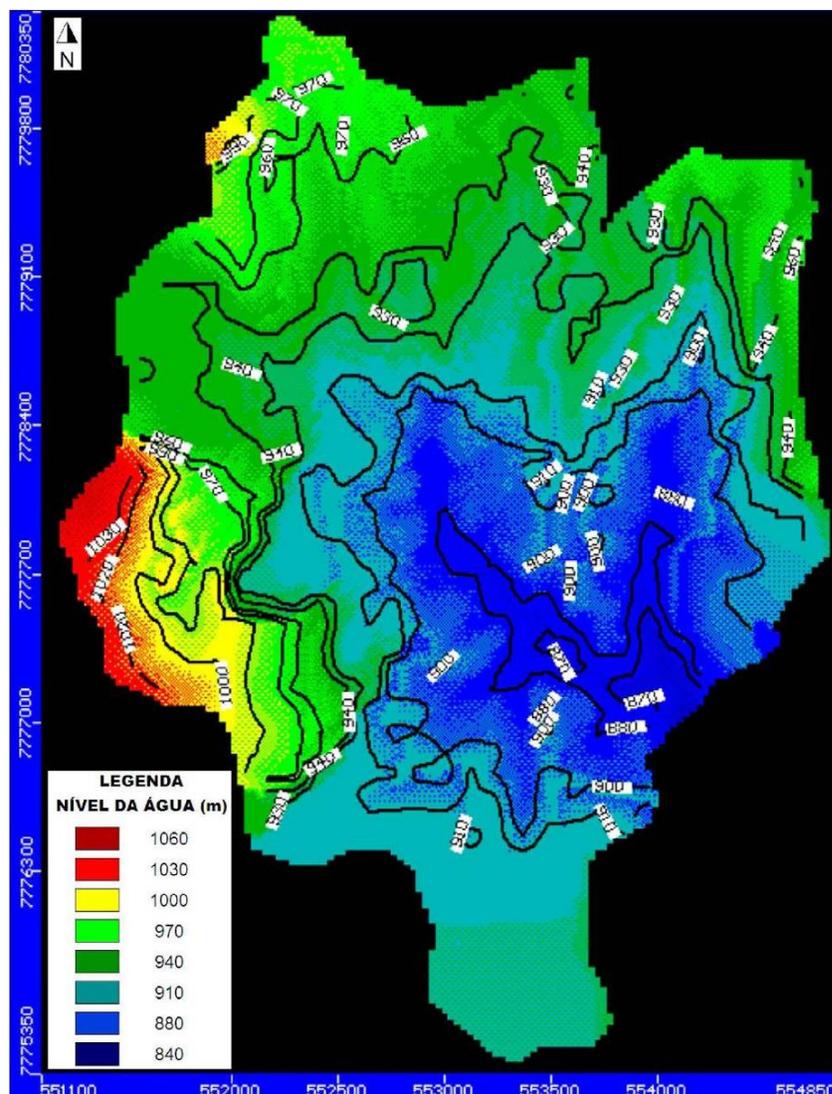


FIGURA 7.10 – Linhas Equipotenciais de Carga Hidráulica da Área em Estudo

Ressalta-se que as nascentes utilizadas na calibração do modelo computacional localizam-se, em sua maioria, muito próximas aos drenos inseridos como carga constante associada à distribuição da rede de drenagem superficial (condição de contorno de primeiro tipo), aproximando as cargas hidráulicas às células onde as nascentes foram locadas para a calibração dos níveis de água.

A utilização das nascentes para calibração do modelo computacional deve-se à inexistência de poços de captação ou de monitoramento nas áreas localizadas entre os talvegues. As informações existentes em tais áreas referem-se aos furos de sondagem realizados durante os

estudos experimentais de infiltração (DRUMOND, 2004 e CDTN, 2008), onde as amostras de solo retiradas em profundidades de até 10 m ainda se encontravam em camada não saturada.

Dessa forma, apesar de não poder afirmar que as diferenças resultantes da calibração entre as cotas calculadas e medidas nas nascentes também se aplicam às cargas hidráulicas reais e calculadas nas áreas localizadas entre os talwegues, os níveis de água resultantes do modelo computacional encontram-se entre 5 m nas áreas mais baixas e 20 m nos topos dos morros, em conformidade às cargas hidráulicas observadas em aquíferos porosos sobrepostos ao Embasamento Cristalino apresentados em estudos similares (CETEC, 1983a).

7.3 Avaliação da Disponibilidade Hídrica Subterrânea

A estimativa da recarga em um aquífero é parâmetro fundamental na avaliação de sua exploração sustentável, assim como para conhecer meios de prevenção e remediação de impactos causados por contaminantes (MONDIN *et al.*, 2006) e pela superexploração.

Conforme apresentado em CPRM (2008), devem ser consideradas reservas renováveis aquelas associadas aos valores médios obtidos na série histórica para o balanço hídrico das águas subterrâneas, representados pelo equilíbrio dinâmico entre a recarga e as descargas (vazão do escoamento base). Os resultados alcançados na avaliação quantitativa das reservas renováveis devem ser considerados ainda como valores aproximados, dada a complexidade geológica desses reservatórios e a variabilidade natural das disponibilidades hídricas no ciclo hidrológico.

As reservas renováveis podem ser estimadas pela variação do volume entre um tempo após o fim do período chuvoso e um tempo após o fim da estiagem, quando os níveis de água da camada saturada no subsolo alcançam as cotas máximas e mínimas, respectivamente. Para estimar as reservas renováveis utilizando-se desta metodologia é necessária uma malha de monitoramento piezométrico com coleta de dados contínua.

Outra forma de avaliação das reservas renováveis está na estimativa dos volumes médios aportados ao aquífero ao longo dos anos, promovida pela recarga resultante da infiltração da água de chuva, ou pelos volumes escoados superficialmente provenientes da parcela de restituição do aquífero às vazões de escoamento base.

Na Tabela 7.6 são apresentados as recargas e os volumes restituídos pelo aquífero, por sub-bacia, na área em estudo. Para os volumes anuais de recarga foram consideradas as precipitações dos anos 2007 e 2008. Por sua vez, os volumes restituídos pelo aquífero aos cursos de água superficiais foram obtidos pelas variáveis da expressão de decaimento (vazão inicial e coeficiente de recessão) das curvas de recessão estimados conforme metodologia apresentada no capítulo 4 (Equações 4.5 e 4.6) e aplicada no capítulo 5 (Figuras 5.36 a 5.42), também para os anos 2007 e 2008.

TABELA 7.6 – Volumes Aportados ao Aquífero pelas Recargas e Restituídos aos Cursos de Água nos Períodos de Estiagem

Sub-bacia	Recarga (mm/ano)		Escoamento Base (mm/ano)	
	Ano 2007	Ano 2008	Ano 2007	Ano 2008
Sub-bacia 1	323,1	438,1	255,7	333,6
Sub-bacia 2	238,0	337,0	91,3	*
Sub-bacia 3	241,7	302,5	221,4	*
Sub-bacia 4	185,1	269,1	*	402,9
Sub-bacia 5	239,0	327,6	204,4	183,4
Sub-bacia 6	256,1	399,2	72,4	*
Bacia Ribeirão Mato Frio	245,1	344,7	401,2	522,8

*Série de dados insuficiente no período de estiagem.

O balanço entre as entradas e saídas do sistema aquífero promovidos pelas recargas e pelo escoamento base, respectivamente, deve tender a zero com o aumento da escala temporal. Cabe ressaltar que a recarga aqui apresentada refere-se à aplicação das porcentagens de infiltração levantadas pontualmente em campo com a aplicação de traçador radioativo, já descontados os volumes de evapotranspiração, extrapolados para toda a bacia de acordo com o tipo de solo e de cobertura vegetal. Para a estimativa do volume restituído ao escoamento base foram utilizados os trechos das séries de vazões dos anos 2007 e 2008 que melhor se encaixaram na expressão de decaimento correspondentes aos caudais de recessão.

Considerou-se no presente estudo que os resultados apresentados na tabela acima apresentada correspondem às faixas de variação dos volumes de reserva renovável por sub-bacia. Por sua vez, os volumes armazenados nos aquíferos localizados abaixo das cotas mínimas de variação do nível de água subterrânea representam a reserva permanente. Essa última acrescida da reserva renovável resulta a reserva total. As maiores imprecisões na estimativa das reservas permanentes estão na determinação dos limites do domínio e do coeficiente de armazenamento, esse último relacionado à porosidade efetiva (CUSTODIO & LLAMAS, 1983 *apud* CPRM, 2008).

As faixas aqui estimadas para reserva renovável não podem ser totalmente revertidas à disponibilidade hídrica subterrânea (reservas explotáveis), devendo sempre ser considerada a presença de interação com outros aquíferos, os efeitos de longo prazo do bombeamento sobre essas reservas e os impactos ambientais relacionados ao uso do solo e alteração da cobertura vegetal.

Analisando os termos superexploração e potencialidade, CPRM (2008) descreve que muitas vezes a idéia de que os volumes bombeados em um aquífero excederam as reservas explotáveis pode ser induzida por falhas na gestão dos aquíferos, pela baixa eficiência do uso da água subterrânea, pela má construção de poços ou por decisões equivocadas quanto às opções de abastecimento.

A quantificação das reservas explotáveis em aquíferos livres e com pouca ou nenhuma captação de água subterrânea, como na bacia do ribeirão Mato Frio, deve levar em conta que apesar das recargas reabastecerem as reservas renováveis em curto prazo a interação com as águas de superfície promove a restituição desses volumes à rede hidrográfica. Essa resposta relativamente rápida ao ciclo hidrológico implica em redução dos escoamentos base, supressão de nascentes e abatimento dos níveis de água de áreas alagadas (brejos, lagoas...), caso toda a reserva renovável seja explotada.

Ressalta-se ainda que a falta de conhecimento sobre os aquíferos de uma região, principalmente onde as águas subterrâneas possuem pouco ou nenhuma utilização, dificultam bastante a quantificação das reservas explotáveis, sendo necessário nestes casos a operação de um monitoramento hidrogeológico para a gestão adequada dessas reservas e sua consideração como alternativa para suprimento das demandas de água.

Cabral (2006) relaciona, além da gravidade dos riscos envolvidos na ocorrência da exploração desordenada dos recursos hídricos, a susceptibilidade de ocorrência de subsidência do solo, mais comum em aquíferos cársticos e sedimentares. Também merece atenção a fragilidade de um aquífero quanto à poluição induzida pelas atividades antrópicas.

Segundo Nobre *et al.* (2008), a vulnerabilidade de águas subterrâneas está relacionada à possibilidade do aquífero se tornar ou não contaminado como resultado de práticas realizadas na superfície. Neste caso, o risco de poluição cresce quanto mais próximo do aquífero a atividade poluidora estiver ocorrendo.

Os parâmetros que interferem na vulnerabilidade intrínseca do meio natural são a profundidade do nível de água subterrâneo, a recarga, o meio aquífero, a condutividade hidráulica, a declividade, os tipos de solos e a cobertura vegetal. Quanto às propriedades dos poluentes, devem ser observados a toxicidade, mobilidade, degradabilidade e a quantidade disposta no solo.

A profundidade do nível de água determina a distância que o poluente irá percorrer até atingir o lençol freático, permitindo sua oxidação. A recarga facilita a percolação do composto poluidor no meio não saturado aumentando o risco de poluição das águas subterrâneas, estando associado à precipitação, declividade do terreno, tipo de solo e de cobertura vegetal. As características do meio aquífero, aqui relacionadas com a condutividade hidráulica, influem diretamente na permeabilidade do contaminante.

De acordo com Segura e Loureiro (1997), a atividade agrícola exerce grande influência no ecossistema solo, na qualidade das águas subterrâneas e controla fortemente as taxas de recarga do aquífero. Considerando que a bacia em estudo está localizada em uma área rural, os riscos potenciais de poluição relacionam-se à utilização de defensivos agrícolas e fertilizantes (fontes difusas), além da infiltração de esgotos domésticos no solo, com possibilidade de elevados teores de nitrato em suas águas.

8 PROGRAMA DE MONITORAMENTO – UMA PROPOSTA

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela lei federal nº 9.433 de janeiro de 1997, deverá ser assegurada para as gerações atuais e futuras a disponibilidade de água necessária aos respectivos usos, em padrões de qualidade adequados (Art. 2º, Cap. II, Tit. I, Lei nº 9.433). São diretrizes gerais para implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos, dentre outras, a gestão sistemática dos recursos hídricos sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade, a integração da gestão dos recursos hídricos com a gestão ambiental e a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo (Art 3º, Cap. III, Tit. I, Lei nº 9.433).

Conforme introduzido anteriormente, a gestão integrada dos recursos hídricos deve incluir, em termos quantitativos e qualitativos, as águas superficiais, subterrâneas, meteóricas e suas interações com o uso e ocupação do solo, cobertura vegetal e características físicas das bacias, de forma a possibilitar a identificação das fontes de poluição e estimar os impactos nos recursos hídricos decorrentes de interferências antrópicas no uso do solo e da água.

Pode ser considerada uma ferramenta favorável à gestão da quantidade e qualidade hídrica a classificação e o enquadramento das águas subterrâneas proposta pela Resolução CONAMA 396 de 03.04.2008, que "Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências". Segundo esta resolução as águas subterrâneas podem ser classificadas em:

- Classe Especial: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como classe especial;
- Classe 1: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 2: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado,

dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;

- Classe 3: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
- Classe 4: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo; e
- Classe 5: águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso.

Nesse contexto, as informações necessárias para um gerenciamento adequado dos recursos hídricos associado a uma política de proteção dos recursos ambientais, abrangem, além dos dados meteorológicos e de hidrologia de superfície, dados sobre a interação com as águas subterrâneas, litologia e geoquímica, informações sobre fontes potenciais de poluição dos recursos hídricos e o monitoramento da água subterrânea. Dadas as demais informações citadas, este último deve considerar a dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e aos efeitos antrópicos.

Nos próximos subitens é apresentada uma proposta de uma malha de monitoramento subterrâneo, levando-se em conta o monitoramento existente e a caracterização hidrogeológica realizada. A integração do monitoramento proposto ao existente será fundamental para subsidiar as ações de controle da poluição ambiental e gestão dos recursos hídricos. Os resultados alcançados possibilitarão o estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade – VRQs (DIAS *et al.*, 2008), subsidiando o enquadramento das águas subterrâneas, conforme as classes definidas na Resolução CONAMA 396/08.

8.1 Definição dos Objetivos do Monitoramento

Na definição dos objetivos do monitoramento foram considerados os seguintes questionamentos: “por que e onde monitorar?”, e “quais informações são esperadas do monitoramento da água?” (SIMONETI, 1999 *apud* DIAS *et al.*, 2008).

Ressalta-se que uma malha de monitoramento não deve ser considerada como definitiva, uma vez que a partir dos resultados alcançados o monitoramento deve ser constantemente “otimizado”. A “otimização” da malha de monitoramento inclui a redefinição da frequência de monitoramento, seguida da reavaliação dos parâmetros a serem monitorados até a eliminação ou inclusão de pontos de monitoramento.

Segundo European Communities (2003 *apud* DIAS *et al.*, 2008), em função dos custos, uma rede de monitoramento deve ser implantada gradualmente, considerando inicialmente um modelo conceitual sobre a delimitação tridimensional do corpo hídrico a ser monitorado, suas características químicas e hidrológicas e sua vulnerabilidade a fontes de poluição e super exploração. Com a avaliação dos dados obtidos, é possível melhorar o modelo conceitual e também o próprio monitoramento. Este processo continua até que os objetivos propostos sejam atingidos com elevado nível de confiança, a um custo possível.

Os objetivos da rede de monitoramento proposta são os seguintes:

- Identificar as características hidrogeológicas dos aquíferos;
- Relacionar as variações de níveis com as variações sazonais das vazões superficiais e das precipitações;
- Estabelecer valores naturais de nível d’água e identificar tendências de rebaixamento destes níveis relacionados ao uso do solo e cobertura vegetal;
- Obter informações sobre a disponibilidade potencial do recurso hídrico e projetar as condições futuras de disponibilidade para planejamento de abastecimento público;
- Integrar as informações quantitativas e qualitativas do monitoramento superficial e subterrâneo;

- Caracterizar a qualidade natural das águas subterrâneas e identificar áreas com alterações de qualidade;
- Subsidiar a formulação de ações de gestão da qualidade do recurso hídrico subterrâneo;
e
- Subsidiar a classificação para o enquadramento e cobrança das águas subterrâneas a fim de efetuar sua proteção.

8.2 Distribuição Espacial dos Pontos de Monitoramento

Para a seleção dos pontos de monitoramento foram considerados os sistemas hidrogeológicos definidos no modelo conceitual, os quais são basicamente os reservatórios formados nas fraturas da rocha gnaisse, o manto intemperizado de solo e a camada de transição entre a rocha sã e a cobertura intemperizada.

A distribuição dos pontos propostos ao monitoramento do meio poroso abrange os principais tipos de solo presentes na área em estudo - argissolos e latossolos. Uma atenção especial foi depositada na seleção dos pontos de monitoramento que irão interagir com o monitoramento superficial da sub-bacia 6, onde grande parte da área ainda é coberta por vegetação densa.

Para a cobertura intemperizada (meio poroso), onde a superfície freática se comporta como aquífero livre, poderão ser instalados medidores de nível de água – MNA's, com profundidades máximas de 30 metros. Nos pontos de monitoramento destinados à coleta de informações do meio fraturado deverão, preferencialmente, ser construídos piezômetros. A profundidade dos piezômetros deverá variar de acordo com a posição das fraturas na rocha sã, onde os filtros deverão estar localizados e o aquífero superior isolado para evitar sua interferência no monitoramento das cargas hidráulicas.

Em segundo plano, a localização das vias de acesso, a topografia e as sub-bacias delimitadas no monitoramento hidrológico em operação foram direcionadores para a locação dos pontos de monitoramento.

Os dispositivos de monitoramento hídrico subterrâneo (MNA's ou piezômetros) deverão ser construídos seguindo as recomendações técnicas da norma NBR 15.495/2007 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, onde estão especificados o projeto e construção de

Poços de Monitoramento de Águas Subterrâneas em Aquíferos Granulares. As coordenadas dos pontos de monitoramento propostos podem ser observadas na Tabela 8.1.

TABELA 8.1 – Localização dos Pontos de Monitoramento Propostos

Sub-bacia	Ponto	Coordenadas UTM	
		Norte	Leste
01	MNA01	7.779.916	552.283
02	MNA02	7.778.351	552.422
02	PZ01	7.778.655	552.291
03	MNA03	7.779.440	553.092
04	MNA04	7.777.368	552.105
05	MNA05	7.779.193	554.201
05	PZ02	7.779.404	554.375
06	MNA06	7.776.416	552.434
06	MNA07	7.777.187	553.258
06	PZ03	7.776.577	552.625
Interbacias	PZ04	7.776.862	553.727

Segue a descrição dos pontos de monitoramento selecionados:

MNA01 – Sub-bacia 1

Este medidor de nível de água está localizado em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos, onde o relevo varia de ondulado a forte ondulado. O MNA01 poderá ser acessado por uma estrada de terra paralela ao curso de água principal, em seu lado direito, da sub-bacia 1.

MNA02 – Sub-bacia 2

O MNA02 localiza-se em Argissolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos. O relevo no local é ondulado e a presença de afloramentos de gnaiss nesta sub-bacia apontam para camada porosa menos profunda que na sub-bacia 1. O acesso ao MNA02 pode ser realizado pela estrada de terra localizada na margem direita do afluente direito da sub-bacia 2.

PZ01 – Sub-bacia 2

O PZ01 localiza-se em relevo ondulado a suave ondulado, à margem esquerda do afluente esquerdo da sub-bacia 2, pouco a montante da confluência dos dois cursos de água principais desta sub-bacia. O PZ01 pode ser acessado pela estrada principal que corta a área em estudo

em direção a Itaúna. Em relação ao meio fraturado, localiza-se ao nordeste da fratura que condiciona o ribeirão Mato Frio e o afluente esquerdo da sub-bacia 2.

MNA03 – Sub-bacia 3

O MNA03 localiza-se em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos. O relevo no local varia de ondulado a suave ondulado. O acesso ao MNA03 pode ser realizado pela estrada de terra localizada na margem esquerda do afluente principal da sub-bacia 3, a qual segue pela cabeceira desta sub-bacia até a sub-bacia 1.

MNA04 – Sub-bacia 4

Este medidor de nível de água está localizado em Argissolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos, onde o relevo varia de ondulado a suave ondulado. O MNA04 poderá ser acessado por uma estrada de terra paralela ao curso de água principal da sub-bacia 4, a qual segue até sua cabeceira retornando até as proximidades do ponto proposto para o monitoramento.

MNA05 – Sub-bacia 5

O MNA05 localiza-se em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos. O relevo no local varia de ondulado a forte ondulado. O acesso ao MNA05 pode ser realizado pela estrada de terra que segue à cabeceira da sub-bacia 5 por sua margem direita. Ressalta-se a importância do monitoramento qualitativo neste ponto, já que foram encontradas concentrações de nitrato superiores a 5 µg/ml nas campanhas realizadas por CDTN (2008), podendo indicar contaminação no aquífero.

PZ02 – Sub-bacia 5

O PZ02 localiza-se em relevo ondulado, sob mata ciliar do afluente esquerdo, mais a montante da sub-bacia 5. Este piezômetro pode ser acessado pela estrada de terra que segue à cabeceira da sub-bacia 5 por sua margem direita. Em relação ao meio fraturado, localiza-se nas proximidades do ponto P5B cadastrado durante as campanhas de acompanhamento da mobilidade das nascentes. A análise de trítio realizada na amostra de água coletada na nascente deste curso de água indicou um tempo de renovação de 17 anos para as águas aportadas pelos aquíferos locais.

MNA06 – Sub-bacia 6

O MNA06 localiza-se em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por remanescente de Mata Atlântica e relevo ondulado. O acesso ao MNA06 pode ser realizado pela estrada de terra que deriva da estrada principal que corta a área em estudo em direção a Itaúna na saída da bacia hidrográfica.

MNA07 – Sub-bacia 6

O MNA07 localiza-se em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos e relevo ondulado, a montante da confluência dos dois cursos de água principais da sub-bacia 6. O acesso ao MNA07 pode ser realizado pela mesma estrada de terra de acesso ao MNA06.

PZ03 – Sub-bacia 6

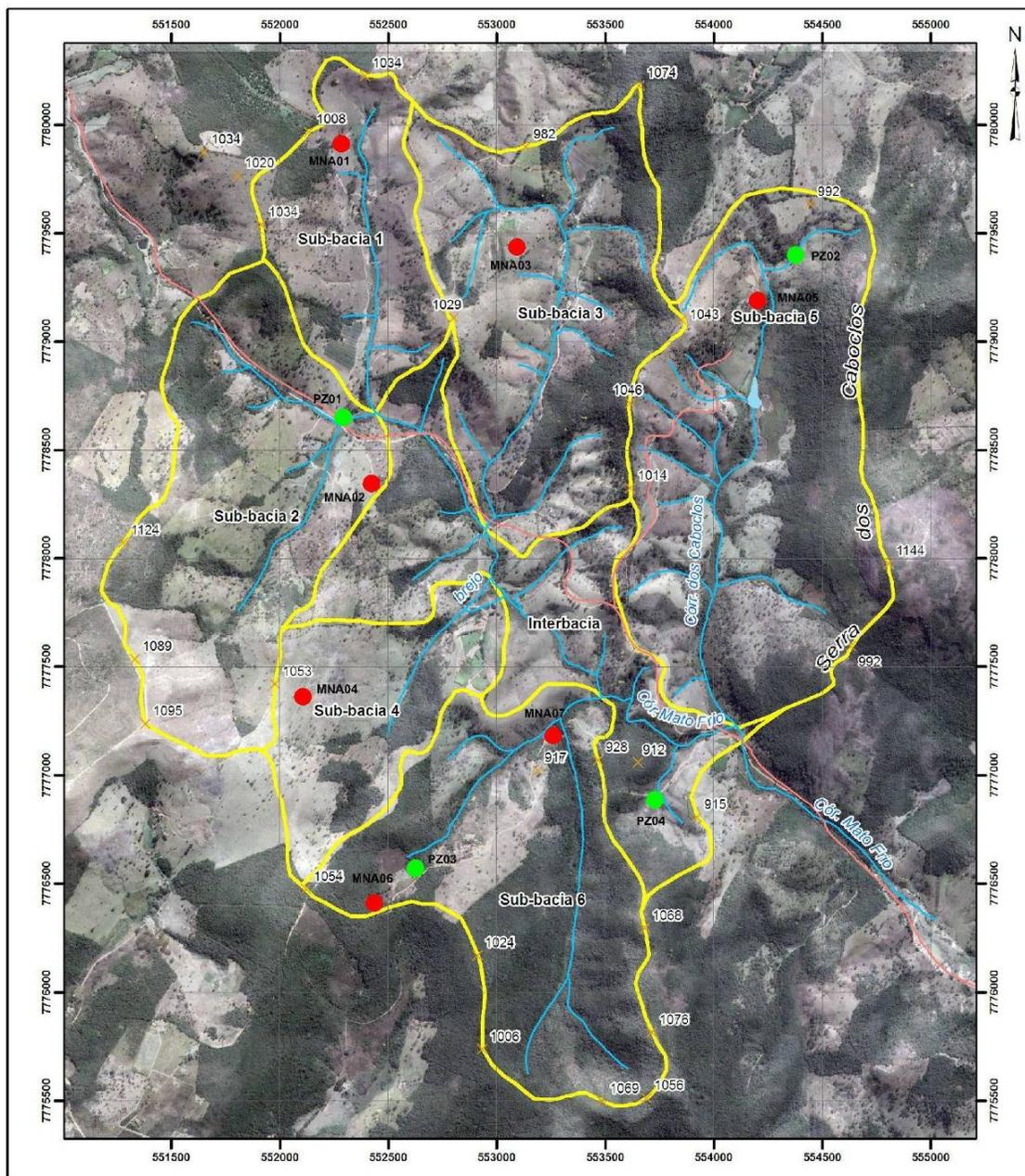
O PZ03 localiza-se em relevo ondulado sob remanescente de Mata Atlântica. Este piezômetro pode ser acessado pela mesma estrada de terra de acesso ao MNA06. Em relação ao meio fraturado, localiza-se nas proximidades do ponto AM3, cadastrado nos trabalhos de CDTN (2008). A análise de trítio realizada na amostra de água coletada na nascente deste curso de água indicou um tempo de renovação de 38 anos para as águas aportadas pelos aquíferos locais.

PZ04 – Interbacias

O PZ04 localiza-se em Latossolo Vermelho-Amarelo, ocupado por pastos e relevo ondulado. Este piezômetro pode ser acessado pela mesma estrada de terra de acesso ao MNA06. Em relação ao meio fraturado, localiza-se nas proximidades do ponto AM4, cadastrado nos trabalhos de CDTN (2008). A análise de trítio realizada na amostra de água coletada na nascente deste curso de água indicou um tempo de renovação de 19 anos para as águas aportadas pelos aquíferos locais.

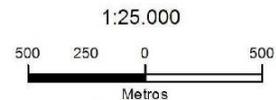
Ressalta-se que os dados coletados no monitoramento proposto deverão ser complementados pelo piezômetro instalado pelo CPRM próximo ao exutório da sub-bacia 5.

A locação dos MNAs e PZs pode ser visualizada na Figura 8.1.



Legenda

- x Ponto cotado
- Lagoa
- Estrada
- Limite de sub-bacia
- Curso d'água
- MNA01
- PZ01



REFERÊNCIA: Folha Azurita, SF-23-X-A-II-1-NO, Escala 1/25.000, DSG, 1981.

Sistema de Projeção UTM
 Origem da quilometragem UTM: Equador e Meridiano 48° W Gr.
 Acrecidas as constantes 10.000 e 500 km, respectivamente.
 DATUM HORIZONTAL SAD 69

FIGURA 8.1 – Malha de Monitoramento Hidrogeológica Proposta

8.3 Parâmetros a serem Monitorados

Nos pontos de monitoramento deverão ser acompanhadas as variações de nível de água (MNA) e das cargas piezométricas (PZ) para a caracterização do comportamento hidrodinâmico dos aquíferos. O monitoramento quantitativo poderá ser realizado utilizando-se equipamento automático, dotado de memória capaz de armazenar as leituras de carga hidráulica por longos períodos.

Neste item estão apresentados ainda os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos propostos para o monitoramento qualitativo da área em estudo. Recomenda-se que as amostragens nos pontos indicados no item anterior sejam realizadas segundo os procedimentos da ABNT, de acordo com a norma CETESB 6.410/1998 (Amostragem e Monitoramento das Águas Subterrâneas).

TABELA 8.2 – Parâmetros de Monitoramento Propostos e Limites Legais por Usos Preponderantes da Água

Parâmetro	Consumo Humano	Dessedentação de Animais	Irrigação	Recreação
Físico-Químico (µg/L)				
pH**	6,0 a 9,5 *	-	-	-
Condutividade Elétrica**	-	-	-	-
Temperatura da Água**	-	-	-	-
Turbidez (UNT)	5,0 *	-	-	-
Cor Aparente	15 *	-	-	-
Sólidos Totais Dissolvidos	1.000.000	-	-	-
Manganês	100	50	200	100
Ferro	300	-	5.000	300
Cloreto	250.000	-	100.000 a 700.000	400.000
Sódio	200.000	-	-	300.000
Nitrato (expresso em N)	10.000	90.000	-	10.000
Nítrito (expresso em N)	1.000	10.000	1.000	1.000
Bacteriológicos (em 100 ml)				
Coliformes Termotolerantes	AUSENTE	200	-	1.000
<i>Escherichia Coli</i>	AUSENTE	200	-	800

* Limites legais segundo Portaria 518 de 2004

** A análise de pH, condutividade elétrica e temperatura da água devem ser realizadas *in loco*.

Para que o resultado das análises seja considerado confiável, além dos procedimentos recomendados para a coleta, recomenda-se ainda que as análises sejam realizadas por laboratório competente e de acordo com os métodos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Os valores de referência adotados para a análise dos resultados deverão ser aqueles descritos na Resolução CONAMA 396/08. Os parâmetros indicados para o monitoramento estão relacionados na Tabela 8.2.

8.4 Freqüência da Coleta de Dados no Monitoramento

Para a coleta e análise de águas subterrâneas nos pontos indicados deverá ser mantida uma periodicidade trimestral para que seja garantida uma boa representatividade dos dados.

Entretanto, segundo Simoneti (1999 *apud* DIAS *et al.*, 2008), uma pergunta deve ser ainda respondida: “Quem terá a atribuição de coordenar e executar a implantação e a operação da rede de monitoramento?” A resposta está diretamente ligada aos objetivos do monitoramento e à legislação vigente.

Uma forma de minimizar os custos com a operação da rede de monitoramento qualitativa está na seleção de pontos fixos para coleta e análise de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos em todas as campanhas (trimestralmente), de forma a possibilitar o registro das tendências temporais em um mesmo local, e no rodízio de coleta e análise dos mesmos parâmetros nos demais pontos com monitoramento quantitativo, aumentando a distribuição espacial do monitoramento.

Dessa forma considerou-se aqui que no mínimo os pontos de monitoramento elencados a seguir deverão pertencer à rede fixa de monitoramento qualitativa: PZ01, MNA01, MNA05 e MNA06. Para que os objetivos do monitoramento proposto sejam alcançados em todos os pontos relacionados na Tabela 8.1 deverão ser acompanhadas, com freqüência mínima diária, as variações de nível de água (MNA) e de carga hidráulica (PZ).

9 CONCLUSÕES

A porção sudoeste da Bacia Representativa de Juatuba, mais especificamente a bacia do ribeirão Mato Frio, foi selecionada para a caracterização da hidrodinâmica subterrânea e de sua interação com as águas superficiais e com o uso e ocupação dos solos. A integração, consistência e tratamento dos dados e estudos existentes, assim como a execução de estudos complementares de caráter multidisciplinar, permitiram o conhecimento mais amplo a respeito das águas subterrâneas e um avanço expressivo no conhecimento do comportamento hídrico da área selecionada.

Após a compilação dos dados primários existentes e levantados em campo, os resultados alcançados para a geologia estrutural, classes de solos, geomorfologia, clima, hidrologia de superfície e hidrogeologia estiveram próximos aos registrados na referência bibliográfica.

Numa escala regional, a sub-bacia do ribeirão Mato Frio está localizada a oeste do Quadrilátero Ferrífero, inserida no Complexo Granito-Gnáissico Belo Horizonte, da era Mesoarqueano. Em termos estruturais, os domos nucleados pelos complexos gnáissicos foram facilmente visualizados nas imagens de satélite e faixas quartzíticas associadas às zonas de cisalhamento foram mapeadas nos divisores topográficos das sub-bacias 4 e 6. Os três principais lineamentos estruturais na área de estudo são de direção N-S (fratura córrego dos Caboclos), NW-SE (fratura ribeirão Mato Frio) e SW-NE (drenagens margem direita do ribeirão Mato Frio).

Por se tratar de uma geologia praticamente homogênea a interpretação e classificação das unidades hidrogeológicas foi simplificada, sendo o aquífero das rochas granito-gnáissicas e de seu manto de cobertura a unidade hidrogeológica identificada. Dessa forma, a dinâmica de circulação da água subterrânea na área em estudo está condicionada pela existência de aquíferos livres em meio fissural e principalmente em meio poroso, constituído pelas coberturas intemperizadas.

De um modo geral, esse sistema encontra-se representado por pacotes de solos de porosidade intersticial, geralmente homogêneos, com espessuras médias que oscilam em torno de 30 a 40 metros constituídos por frações de textura média a muito argilosa, como resultado da ação do intemperismo sobre o gnaisse que recobre os topos dos terrenos. Sobre a cobertura intemperizada podem ser encontrados ainda depósitos de tálus, onde preferencialmente

ocorrem os processos de descarga. No trecho de transição do pacote poroso às rochas fraturadas, onde os espaços para circulação e armazenamento da água subterrânea encontram-se aumentados, os fluxos ocorrem de forma mista e o potencial hidrogeológico é considerável.

As coberturas inconsolidadas representativas dos aquíferos porosos são responsáveis pelo escoamento de base na maior parte das drenagens durante as estiagens. O controle realizado pelas zonas fraturadas na descarga dos aquíferos também é bastante expressivo, porém sua influência é atenuada nas áreas onde os solos apresentam maiores teores de argila (solos mais evoluídos). As demais características do meio, como a declividade, a cobertura vegetal e o uso do solo têm importância secundária na descarga dos aquíferos, sendo mais representativos na formação dos hidrogramas de cheias.

A vazão específica na bacia é de 15,03 L/s/km², a qual varia nas sub-bacias com forte relação ao uso do solo, tamanho da bacia e comprimento do talvegue principal. Observa-se, porém, que na sub-bacia 5, delimitada à esquerda pela Serra dos Caboclos, apesar de ser ocupada em 21% por vegetação densa e possuir a maior área de drenagem entre as seis sub-bacias, as vazões específicas apresentam-se relativamente altas. Nesta sub-bacia as altas declividades e a presença de afloramento rochoso aceleram o escoamento superficial durante os eventos de chuva, e as fraturas localizadas no lineamento do Córrego dos Caboclos permitem a contribuição do escoamento subterrâneo profundo às vazões do escoamento base.

A curva de recessão foi analisada em cada sub-bacia, permitindo a avaliação da amplitude do armazenamento de água subterrânea nos aquíferos livres que interagem com a drenagem de superfície. Os coeficientes de recessão encontrados para as sub-bacias 1, 2, 3 e 4, próximos a 0,01 dia⁻¹, indicam a presença de terrenos pouco permeáveis e de baixa capacidade de armazenamento. Por sua vez, para a sub-bacia 5 e para a área total da bacia do ribeirão Mato Frio, as contribuições para o escoamento base são provenientes da descarga de aquíferos rasos e da restituição de aquíferos fraturados, onde os coeficientes de recessão estão em torno de 0,005 dia⁻¹. Na sub-bacia 6, onde o coeficiente de recessão alcançou valor próximo a 0,02 dia⁻¹, a presença de faixas de quartzito e de cobertura vegetal densa resultam em maiores parcelas interceptadas, maior evapotranspiração e vazões de estiagem muito baixas a nulas.

Em concordância, destaca-se que os valores de recarga nos pontos onde o uso do solo e cobertura vegetal é característico de vegetação densa foram inferiores aos valores de recarga em áreas de pasto. A parcela das alturas de chuva convertidas em recarga no balanço hídrico

está em torno de 25% para áreas com vegetação densa, 20% em área de pasto com solo do tipo latossolo e 10% em área de pasto sobre argissolo.

A variação dos valores de condutividade hidráulica dentro das faixas levantadas no modelo conceitual durante o processo de calibração do modelo computacional resultou, de forma satisfatória e coerente com a literatura.

Confirmando os resultados apresentados nos estudos hidroquímicos realizados por CETEC (1983a), concluiu-se que a descarga natural na área estudada está globalmente associada aos reservatórios constituídos pelos meios porosos, com participação pontual dos fluxos provenientes das rochas fraturadas. Essa mesma conclusão também é embasada nos estudos isotópicos realizados por CDTN (2008). A partir das informações sobre a concentração de trítio, conclui-se ainda que a contribuição de águas profundas provenientes das zonas fraturadas com porosidade secundária ocorre principalmente onde o leito de drenagem coincide com fraturas, como no Córrego dos Caboclos e no ribeirão Mato Frio.

Os dados resultantes da análise das águas coletadas na área em estudo por CDTN (2008) apontam para águas ligeiramente ácidas, brandas, com valor médio de condutividade elétrica em 36,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A análise dos nitratos resulta em concentrações inferiores a 0,25 $\mu\text{g}/\text{mL}$, com exceção das sub-bacias 1, 5 e interbacias, onde alcançam concentrações de até 8,9 $\mu\text{g}/\text{mL}$, podendo indicar contaminação no aquífero.

O desenvolvimento do modelo computacional a partir do modelo conceitual respondeu de maneira satisfatória durante a calibração dos níveis de água subterrânea. Ao analisar o módulo de saída do modelo computacional as características descritas no modelo conceitual foram confirmadas, configurando a infiltração vertical das águas de chuva no meio poroso (argissolos ou latossolos) até o lençol freático por trechos não saturados que variam entre 5 m nas cotas inferiores e 20 m nas áreas mais altas da bacia. A partir da camada saturada do pacote poroso a água infiltrada segue em fluxo subsuperficial, em direção aos talwegues. Onde o manto de regolito interage com o meio decomposto a semi-decomposto a direção dos vetores de velocidade de fluxo apontam para a recarga dos meios fraturados.

Na tentativa de promover uma avaliação prévia das reservas renováveis, foram identificadas as faixas de variação dessas reservas pelo cálculo dos volumes anuais de recarga e de restituição dos aquíferos ao escoamento base. Considerando os anos 2007 e 2008 as reservas

renováveis variam de 230.000 a 390.000 m³ na sub-bacia 1, 160.000 a 580.000 m³ na sub-bacia 2, 390.000 a 530.000 m³ na sub-bacia 3, 150.000 a 340.000 m³ na sub-bacia 4, 430.000 a 760.000 m³ na sub-bacia 5, 130.000 a 690.000 m³ na sub-bacia 6 e 2.620.000 a 5.580.000 m³ na bacia do ribeirão Mato Frio.

Cabe ressaltar que a quantificação das reservas é dificultada pela inexistência de monitoramento dos aquíferos da área em estudo, onde não existem poços tubulares que possam produzir informações sobre a resposta do aquífero ao bombeamento. Dessa forma foi proposta uma malha de monitoramento hidrogeológico contínua para a bacia, que, integrada ao monitoramento existente, subsidiará as ações de controle da poluição ambiental e gestão dos recursos hídricos.

10 RECOMENDAÇÕES

A partir das conclusões apresentadas foi possível a recomendação de alguns cuidados a serem tomados para a implantação da malha de monitoramento proposta, além da indicação de estudos complementares para o aprofundamento do conhecimento hidrogeológico na bacia do ribeirão Mato Frio. As recomendações são então as seguintes:

- construção de dispositivos de monitoramento hídrico subterrâneo propostos (MNA's ou piezômetros) seguindo as recomendações técnicas da norma NBR 15.495/2007 da ABNT, mantendo os filtros abertos somente no meio que se pretende monitorar (poroso ou fraturado, impedindo a interferência do meio adjacente na coleta de dados piezométricos e de qualidade das águas desses meios;
- realização de coleta de água segundo os procedimentos da ABNT, de acordo com a norma CETESB 6.410/1998 (Amostragem e Monitoramento das Águas Subterrâneas), com no mínimo a periodicidade trimestral, e encaminhar as amostras de água a laboratórios competentes e de acordo com os métodos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*;
- adotar valores de referência para a análise dos resultados de qualidade das águas de acordo com a Resolução CONAMA 396/08;
- executar campanhas geofísicas para buscar delimitar com maior precisão a forma e a profundidade dos contatos do meio poroso com o embasamento e suas fraturas e atualizar continuamente a estimativa da recarga e sua comparação por distintas metodologias;
- caso sejam implantados sistemas de captação de água subterrânea devem ser acompanhados os volumes explorados, os rebaixamentos promovidos pelo bombeamento e a eficiência hidráulica dos poços, coletando informações, analisando e reavaliando as disponibilidades; e,
- estabelecer e manter um banco de dados georreferenciados com as informações quali-quantitativas levantadas nos dispositivos de monitoramento hídrico existentes e propostos na área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, S. L. *et al.*, **Escarificação Mecânica e Biológica para a Redução da Compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob Plantio Direto**. Revista Brasileira Ci. Solo, Santa Maria - RS, v28, p 519 – 531.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S., **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero**. Precambrian Research, v. 90, p.29-58, 1998.
- ALMEIDA, F. F. M., **O Cráton São Francisco**. In: REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS. [S.l.], ano 4, v. 7, p.349-364, 1977.
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W., **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. Califórnia: Academic Press, 1992. 381 p.
- BALTAZAR, O. F., ZUCCHETTI, M., **Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits**. Ore Geology Reviews, 2005.
- BRANDALISE, L. A., **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Belo Horizonte**, Folha SE.23-Z-C-VI. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. – Brasília: CPRM, 1999.
- CABRAL, J. J. S. P., **Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo**. In: REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, n.3, v. 11, p.147-157, 2006.
- CARDOSO, C. A., **Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Dobossan**, Nova Friburgo, RJ - Revista Árvore – año/ vol. 30 – número 002 – Sociedade de Investigações Florestais – Viçosa – Brasil, 2006 – pp. 241 – 248.
- CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, **Relatório Final do Projeto de Pesquisa “Estudos da formação de escoamentos utilizando a técnica de traçadores na bacia representativa de Juatuba” – Alto São Francisco**. Projeto FINDEP: Desenvolvimento de estudos hidrológicos e hidrogeológicos – Belo Horizonte: CDTN, 2008.
- CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, **Determinação do Funcionamento Hidráulico dos Aquíferos, Através de Parâmetros Químicos**. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento de Métodos e Técnicas de Recursos Naturais – Bacia do Alto São Francisco e Parte Central da Área Mineira da SUDENE. Belo Horizonte, 1983a.
- CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, **Diagnóstico Ambiental do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1983b.
- CHEMALE Jr., F.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I., **The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Precambrian Research, Amsterdam, v.65, p.25-54, 1994.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W., **Applied Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.
- CHRISTOFOLETTI, A., **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo, 1987. v1, 313 p.
- CLEARY, R., **Águas Subterrâneas**. ABRH 1989. <<http://www.clean.com.br/cleary.pdf>>. Acesso em março 2007.
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2008. 812p.

DELGADO, C. D., ALBERICH, M. V. E., LOPES-VERA, F., **Recursos Hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso em Iberoamérica**. COATEPEC, Estado de México, México, 2005.

DIAS, C. L.; BARBOUR, E. D. A.; MODESTO, R. P. & CASARINI, D. C. P., **A Importância do Monitoramento das Águas Subterrâneas na Gestão dos Recursos Hídricos**. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal, RN, 2008.

DNAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica - 5º Distrito, **Bacia representativa de Juatuba**; série E-02 (dados atualizados até 1975). Brasília: DNAEE, 1981. 364 p.

DOMENICO, P. A., FRANKLIN, W. S., **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley and Sons, New York, USA, 1990. 824 p.

DRUMOND, M. M., **A Técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à bacia representativa de Juatuba – MG**. 2004. 304p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos: Sistema Brasileiro de classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, **Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo**. Viçosa: Embrapa Solos, 2005.

FERNANDES, R. A., **Gestão integrada de águas subterrâneas: critérios gerais orientadores para definição e caracterização de áreas estratégicas de abastecimento**, 2005. 419p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

FERREIRA, C. A., **Tipos de Solo na bacia do ribeirão Mato Frio**. Entrevista concedida e SOARES, R. C. V., 2009.

FERREIRA, M. M., FERNANDES, B. & CURI, N., **Influência da Mineralogia da Fração Argila nas Propriedades Físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil**. XXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Recife (PE), 23-31 de julho de 1989. Recebido para publicação em abril de 1998 e aprovado em janeiro de 1999.

FRANZ, P. R. F., **Composição botânica dos campos naturais da Bacia Representativa de Juatuba municípios de Mateis Leme, Igarapé e Itaúna em Minas Gerais**. In: Bacia Representativa de Juatuba; série E-02. Brasília: DNAEE, p. 21-24, 1981.

GOÉS, G. B. *et al.*, **Efeito do Cultivo da Cana de Açúcar na Estabilidade de Agregados e na Condutividade Hidráulica do Solo**. Irriga, Botucatu - SP, v10, n2, p 116 – 122, maio - julho de 2005. Recebido em 13 de setembro de 2004 e aprovado para publicação em 27 de janeiro de 2005.

GOLDENFUM, J. A., **Pequenas Bacias Hidrológicas: Conceitos Básicos**. In: Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas; Projeto RECOPE/ REHIDRO - Rede Cooperativa de Pesquisa em Engenharia e Gestão de Recursos Hídricos. Santa Maria, RS: ABRH, p. 3-14, 2001.

GUIGUER, N. & FRANZ, T., **Visual MODFLOW**. Waterloo Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Canada, 1998.

HARDER, E. C., CHAMBERLIN, R.T., **The geology of Central Minas Gerais, Brazil**. Chicago: J. Geol., 23: 341 - 424. 1915.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Manual Técnico de Pedologia**; Rio de Janeiro- RJ, 2007.

IGA – Instituto de Geociências Aplicadas. Secretaria de Ciências e Tecnologia do Estado de Minas Gerais, **Mapeamento Geológico – Folha Igarapé**. Belo Horizonte: 1984.

LANNA, A. E. L., **Províncias hidrológicas e bacias representativas**. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 1983, Blumenau. Anais Florianópolis: ABRH. p3-24

LIMA, C. H. R., **Avaliação da Interação Rio-Aqüífero a Partir de Dados Experimentais e de um Modelo Analítico**. In: REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS, n.1, v. 12, p.217-230, 2007.

MAIA, A. L., AMARAL, I. R.; VERSIANI, B. R., **Metodologia DPFT de identificação do hidrograma unitário e das precipitações efetivas: estudo de caso para a bacia hidrográfica de Juatuba – MG**, RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 1, p 79-90, 2006.

MAZIERO, T. A., WENDLAND, E., **Variabilidade Espacial da Recarga em Área Urbana** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 3, p 35-46, 2008.

MINARDI, P. S. P., Velásquez, L. N. M.; Bomtempo, V. L.; Cota, S. D. S.; Rodrigues, P. C. H., **Técnicas Isotópicas Aplicadas em Estudos Hidrogeológicos no Município de Araguari, MG**. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2008, ABAS, Natal, RN.

MONDIN, M. *et al.*, **Mecanismos de Controle da Recarga em Aquíferos Sedimentares Livres – Estudo na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, São Paulo (Brasil)** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 3, p 89-99, 2006.

MOURÃO, M. A. A., **Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2007. 297p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NEVES, B. V. B., DUTRA, L. V.; DRUMOND, M. M.; RODRIGUES, P. C. H.; VERSIANI, B. R., **Influência do Desmatamento na Evapotranspiração: Estudo na Micro-Bacia do Ribeirão Serra Azul - MG com Apoio do Geoprocessamento**. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, MA, 2004.

NOBRE, R. C. M. *et al.*, **Mapeamento do Índice de Perigo ao Consumo de Águas Subterrâneas Vulneráveis à Contaminação** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 2, p 101-112, 2008.

NOCE, C. M. *et al.*, **O Complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, MG**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, 1994.

PONCE, V. M., **Research and Development. Baseflow Augmentation by Streambank Storage**. San Diego: San Diego State University. Report 009.4-89.13.1989. 88 p. Disponível em: <<http://www.feather-river-crm.org/pdf/baseflow.pdf>> Acesso em: 28 jan. 2010.

RURALMINAS – Fundação Rural Mineira, **Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias dos Afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais. Solos e aptidão agrícola das terras**. Belo Horizonte – MG, 2002.

SEGURA, J. E. S.; LOUREIRO, C. O., **Avaliação da Vulnerabilidade da Água Subterrânea à Contaminação com Praguicidas - Uma Proposta Metodológica**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e

Recursos Hídricos. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 1997. 190p.

SOUZA E SILVA, J. C., **Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de Influência da Mina Lapa Vermelha, na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG.** 2003. 293p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F., **Decifrando a Terra.** IBEP Nacional. 624p, 2008.

TUCCI, C. E. M., **Hidrologia. Ciência e aplicação.** Porto Alegre: Ed. Da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, IVANILDO; NETTO, O. M. C. **Gestão da Água no Brasil.** Brasília: UNESCO, 2001.156p.<www.unesco.br/publicações>. Acesso em março 2007.

UFMG e Fundação Christiano Ottoni, **Relatório de Poço Tubular Profundo – Serra Azul PZ 12**, Estudo dos processos hidrológicos em bacias representativas do cerrado e semi-árido mineiro - Projeto FINDEP: Desenvolvimento de estudos hidrológicos e hidrogeológicos – Belo Horizonte: UFMG/ Fundação Christiano Ottoni, 2008.

VIEIRA, C. P.; PALMIER, L. R., **Medida e Modelagem da Intercepção da Chuva em uma Área Florestada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais RBRH** – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 3, p 101-112, 2006.